UTech
Umtec Technologie AG

Potenziale von Flüssigboden im Tiefbau

Quelle Titelbild: Eigene Aufnahme des Einbaus von Flüssigboden auf einer Baustelle im Kanton Zürich

Hombrechtikon, 7. Juli 2026

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU) CH-3003 Bern
Auftragnehmer	Umtec Technologie AG Eichalstrasse 54 8634 Hombrechtikon
Autorin und Autor	Angie Celis Thomas Pohl
Begleitgruppe	Niklas Nierhoff, Bundesamt für Umwelt (BAFU) David Hiltbrunner, Bundesamt für Umwelt (BAFU) Pierryves Padey, Bundesamt für Umwelt (BAFU) Jelena Dolecek, Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Hinweis

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

Zusammenfassung

Flüssigboden ist ein zeitweise fliessfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff, der überwiegend aus aufbereitetem Aushubmaterial besteht und durch geringe Zugaben hydraulischer Bindemittel (in der Regel Zement), Wasser und Zusatzstoffe stabilisiert wird. Nach dem Einbau härtet das Material aus und erreicht eine Tragfähigkeit, die bauphysikalisch mit dem umgebenden Boden vergleichbar ist. Dadurch kann Aushubmaterial verwertet und der Einsatz von Primärrohstoffen reduziert werden.

Der vorliegende Bericht bewertet das ökologische Potenzial von Flüssigboden im Schweizer Tiefbau auf Basis einer Ökobilanz. Untersucht wird eine durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur, die aus zwölf Praxisrezepturen abgeleitet wurde (in diesem Bericht auch «herkömmlicher Flüssigboden» genannt). Darauf aufbauend werden eine verbesserte Variante mit angepasster Zementsorte sowie Varianten mit Pflanzenkohle auf Basis von Herstellerangaben untersucht. Die Ergebnisse der betrachteten Flüssigbodenvarianten werden danach mit konventionellen Grabenverfüllungen aus Kiessand sowie aus Kiessand mit Hüllbeton verglichen. Dabei wird auch berücksichtigt, dass bei Flüssigboden aufgrund der fliessfähigen Eigenschaften und des entfallenden Verdichtungsaufwands eine reduzierte Grabenbreite möglich ist, was den Materialbedarf und damit die Umweltwirkungen zusätzlich senkt.

Ergänzend zur ökologischen Bewertung werden die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Flüssigbodenkomponenten, die technischen Rahmenbedingungen und Anwendungsfelder sowie die abfallrechtliche Einordnung, die Hemmnisse und die Lösungsansätze von Flüssigboden umfassend beleuchtet.

Rahmenbedingungen, Systemgrenzen und Methodik der Ökobilanz

Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verfüllvarianten (Kiessand mit Hüllbeton, Kiessand ohne Hüllbeton, Flüssigboden, Flüssigboden mit Pflanzenkohle und Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil) wurde ein vereinfachter Leitungsgraben als Referenzsystem definiert. Die funktionelle Einheit ist die Verfüllung von 1 m³ Graben unter Erfüllung definierter technischer Anforderungen. Für die in dieser Studie betrachteten Anwendungsfälle werden die Systeme als funktional äquivalent angenommen.

Die Ökobilanz umfasst die Herstellungsphase (A1 – A3), den Transport und Einbau (A4 – A5) sowie den Rückbau und die Entsorgung am Lebensende (C1 – C4).

Die Umtec Technologie AG (UTech) erarbeitete die Ökobilanz gemäss den KBOB-Richtlinien v8.1 [1]. Zur Bewertung der Umweltwirkungen wurden die Methoden Treibhauspotenzial (GWP), ökologische Knappheit (UBP) und kumulierter Energieaufwand (KEA) verwendet. Die in diesem Projekt erarbeiteten Ökobilanzdaten werden in der Ökobilanzdatenbank des BAFU veröffentlicht.

Ergebnisse der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

Die gesamten Treibhausgasemissionen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur betragen 54.6 kg CO_2-eq pro m³ Grabenverfüllung (Abbildung 0-1). 74 % der Emissionen entfallen auf die Herstellungsphase (A1 – A3), 7 % auf den Einbau (A4 – A5) und 19 % auf die Entsorgungsphase (C1 – C4).

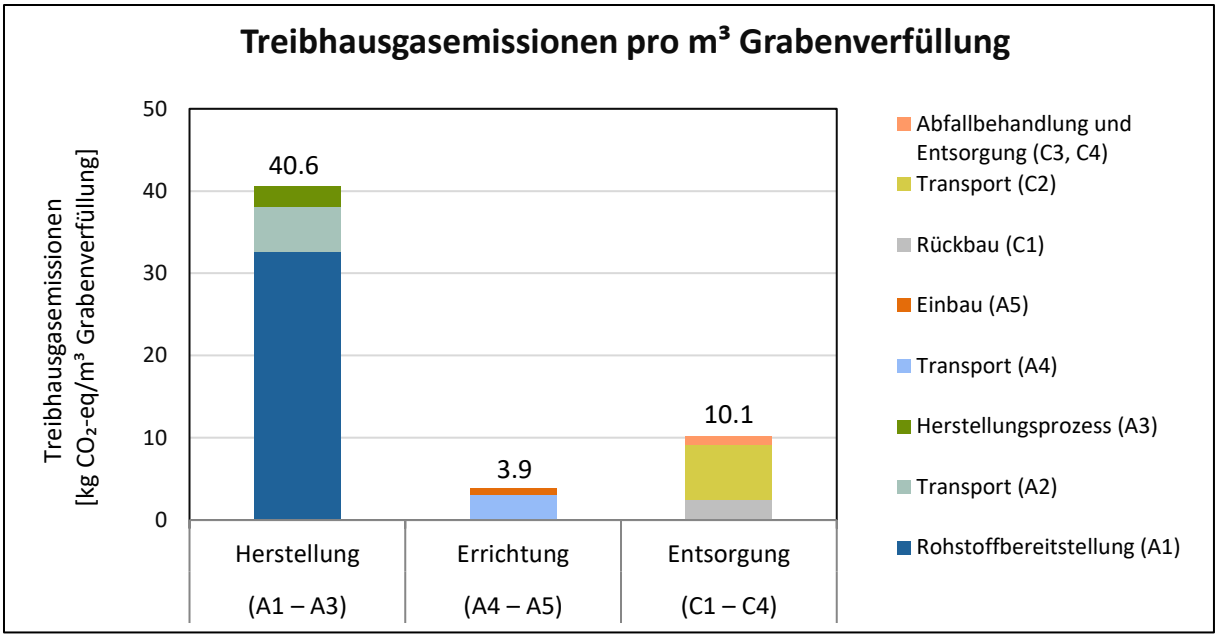


Abbildung 0-1: Gesamte Treibhausgasemissionen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4).

Die Gesamtumweltbelastung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur beträgt 120’588 UBP pro m³ Grabenverfüllung (Abbildung 0-2). Hier zeigt sich ein anderes Bild als bei den Treibhausgasemissionen: Haupttreiber ist die Entsorgungsphase (C1 – C4), auf die 49 % der Gesamtumweltbelastung entfallen. Grund hierfür ist die Gewichtung des Landverbrauchs für die Deponierung. Die Herstellungsphase (A1 – A3) verursacht 45 % der Gesamtumweltbelastung, während auf den Einbau (A4 – A5) 6 % entfallen.

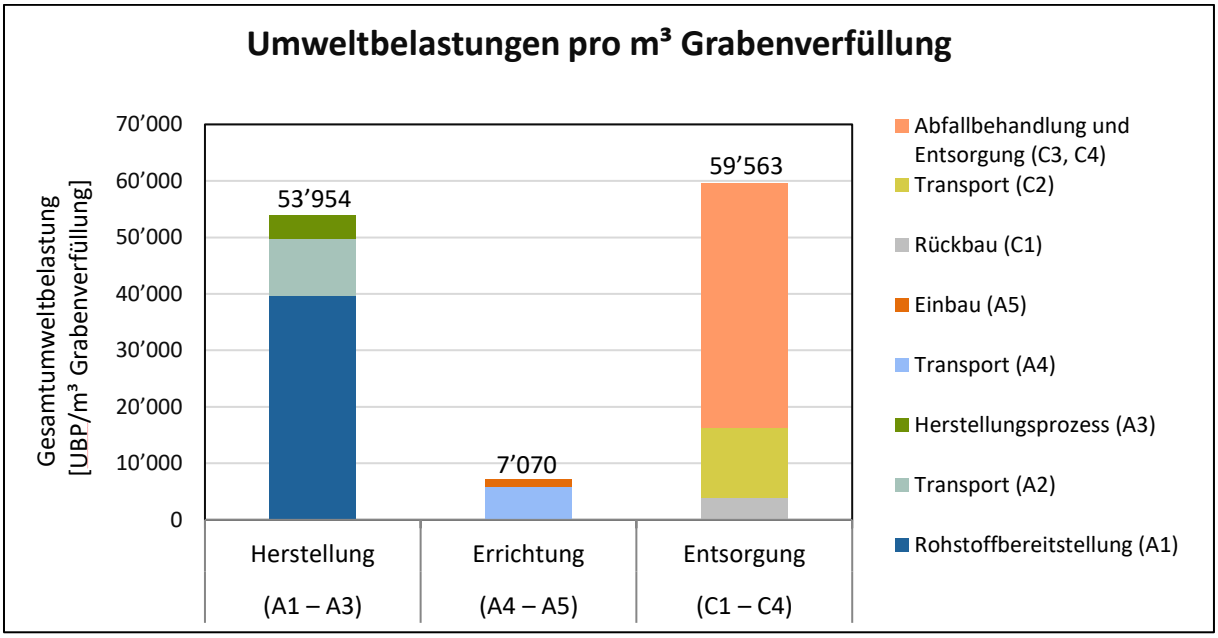


Abbildung 0-2: Gesamtumweltbelastung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4).

Zementsorte

Da der Zement einen wesentlichen Beitrag zu den Umweltwirkungen des Flüssigbodens leistet, ist die Wahl der Zementsorte ein zentraler Hebel zur Reduktion dieser Umweltwirkungen. Durch den Einsatz von CEM III A anstelle von CEM I 42.5 R können die Treibhausgasemissionen um 23 % und die Gesamtumweltbelastung um 11 % reduziert werden.

Ergebnisse des Vergleichs von Grabenverfüllungen

Für den Vergleich wurden verschiedene Verfüllsysteme auf Ebene von 1 m³ Grabenverfüllung über den gesamten betrachteten Lebenszyklus (A1 – A5, C1 – C4) bilanziert. Dabei wurden nicht nur einzelne Materialien, sondern Bauweisen mit vergleichbarer technischer Funktion gegenübergestellt. Für die Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» wurde vereinfachend eine feste Volumenaufteilung von 20 % Hüllbeton und 80 % Kiessand angenommen.

Abbildung 0-3 zeigt die Treibhausgasemissionen der untersuchten Verfüllmaterialien pro m³ Grabenverfüllung über den betrachteten Lebenszyklus (A1 – A5, C1 – C4) bei Verwendung von Zement CEM I 42.5 R bei Hüllbeton und Flüssigboden. Die höchsten Emissionen weist Kiessand mit Hüllbeton auf, die Tiefsten Kiessand ohne Hüllbeton. Die verschiedenen Flüssigbodenvarianten liegen dazwischen.

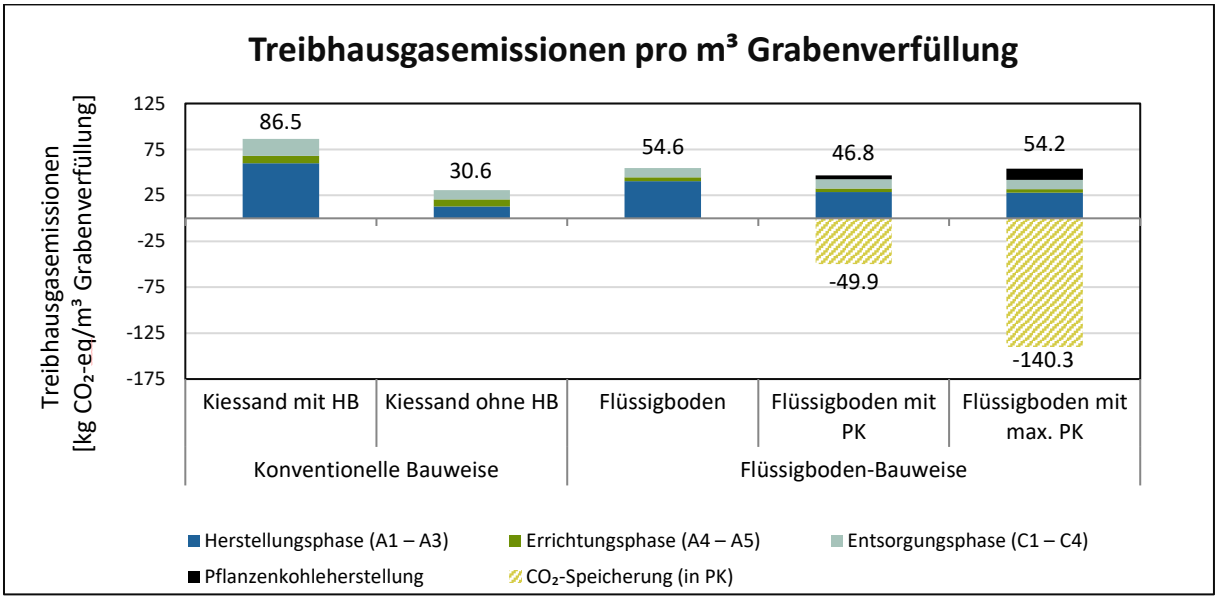


Abbildung 0-3: Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 0-4 zeigt die Gesamtumweltbelastungen der untersuchten Verfüllmaterialien pro m³ Grabenverfüllung über den betrachteten Lebenszyklus (A1 – A5, C1 – C4) bei Verwendung von Zement CEM I 42.5 R bei Hüllbeton und Flüssigboden. Alle betrachteten Flüssigbodenvarianten weisen tiefere Gesamtumweltbelastungen auf als die konventionellen Bauweisen. Die geringste Gesamtumweltbelastung zeigt dabei der Flüssigboden mit Pflanzenkohle.

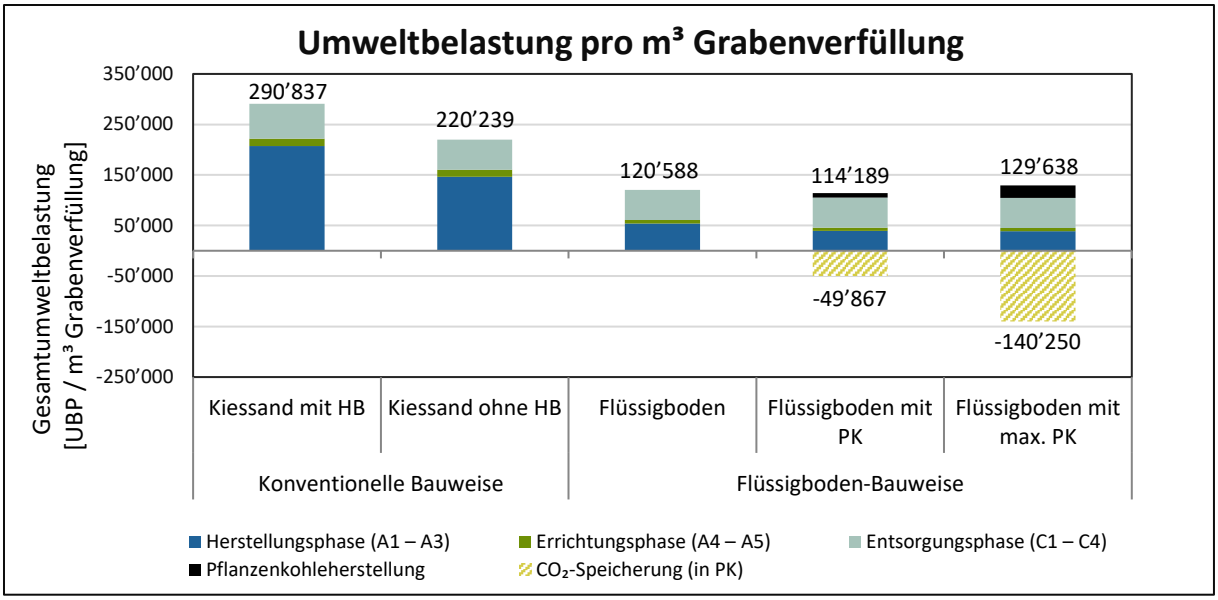


Abbildung 0-4: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Zementsorte

Durch die Verwendung von CEM III A anstelle von CEM I 42.5 R können die Treibhausgasemissionen beim Kiessand mit Hüllbeton um 21 %, beim Flüssigboden um 23 %, beim Flüssigboden mit Pflanzenkohle um 17 % und beim Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil um 15 % reduziert werden. Die Gesamtumweltbelastung sinkt um 6 % beim Kiessand mit Hüllbeton, um 11 % beim Flüssigboden, um 7 % beim Flüssigboden mit Pflanzenkohle und um 6 % beim Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil.

Grabenbreite

Ein wichtiger Einflussfaktor ist die reduzierte Grabenbreite bei Flüssigboden. Da Flüssigboden ohne mechanische Verdichtung eingebaut werden kann, kann der seitliche Arbeitsraum im Graben kleiner ausfallen als bei der konventionellen Bauweise. Dadurch wird weniger Verfüllmaterial benötigt, was die Umweltwirkungen der Flüssigbodenvarianten in allen betrachteten Umweltindikatoren deutlich reduziert. In Kombination mit klinkerreduziertem Zement (CEM III A) weist der Flüssigboden sogar tiefere Treibhausgasemissionen auf als Kiessand ohne Hüllbeton.

Stoffliche Bewertung und umwelttechnische Relevanz von Flüssigboden

Ergänzend zur Ökobilanz wurde geprüft, ob von Flüssigboden relevante Schadstoffeinträge in Boden oder Grundwasser ausgehen können. Die Ergebnisse zeigen, dass Flüssigboden bei fachgerechter Herstellung und Anwendung aus umwelttechnischer Sicht grundsätzlich unproblematisch ist. Die grösste stoffliche Relevanz geht vom eingesetzten Aushubmaterial aus, da standortspezifische Belastungen darüber in den Flüssigboden eingetragen werden können. Eluatversuche und Grundwasserüberwachungen zeigen jedoch, dass kein relevanter Austrag von Schwermetallen oder organischen Schadstoffen zu erwarten ist.

Technische Einordnung und Anwendung von Flüssigboden

Flüssigboden ist im Leitungsbau technisch grundsätzlich als geeignete Alternative zur konventionellen Bauweise einzuordnen. Vorteile ergeben sich insbesondere durch die homogene Verfüllung, den Wegfall der lagenweisen Verdichtung und den potenziell reduzierten Arbeitsraum. Für viele Standardanwendungen ist Flüssigboden geeignet, bei erhöhten Anforderungen sind jedoch projektspezifische Nachweise erforderlich. Erfahrungen aus Deutschland und Österreich zeigen zudem, dass Flüssigboden im Tiefbau seit Jahren erfolgreich eingesetzt wird. Bislang liegt noch keine vollständige nationale Normierung für Flüssigboden vor. Mit der SIA 4016 befindet sich jedoch eine entsprechende Grundlage in Erarbeitung. Bis diese publiziert wird, sind Qualitätssicherung und Dokumentation besonders wichtig.

Abfallrechtliche Einordnung von Flüssigboden

Flüssigboden besteht zu einem überwiegenden Teil aus Aushubmaterial und kann in Analogie auch für die Entsorgung als solches behandelt werden. Damit lässt sich für die Entsorgung von Flüssigboden auf die Vorgaben in Art. 19 und in den Anhängen 3 und 5 der Abfallverordnung VVEA abstützen. Damit Aushubmaterial als unverschmutzt gilt, muss es gemäss Anhang 3 Ziffer 1 VVEA zu mindestens 99 Gewichtsprozent aus Lockergestein oder gebrochenem Fels bestehen und darf maximal 1 Gewichtsprozent mineralische Bauabfälle enthalten.

Bei der Herstellung von Flüssigboden wird Aushubmaterial mit Zement und Bentonit vermischt. Zudem können dem Flüssigboden weitere Zuschlagstoffe wie Pflanzenkohle zugegeben werden.

Die abfallrechtliche Klassierung von Flüssigboden ist von der Qualität des eingesetzten Aushubmaterials sowie von Art und Menge der Zuschlagstoffe abhängig. Zur Herstellung soll primär unverschmutztes Aushubmaterial verwendet werden. Bei einer Herstellung direkt auf der Baustelle darf jedoch auch das vor Ort anfallende, schwach verschmutzte Aushubmaterial verwertet werden (Art. 19 Abs. 2 Bst. d VVEA). Der eingesetzte Bentonit spielt für die Umwelt und die Wahl des Entsorgungsweges keine Rolle. Demgegenüber kann der Zement mit mineralischem Bauabfall gleichgesetzt werden. Auch allfällige weitere Zuschlagstoffe wie Pflanzenkohle sind bei der Wahl des Entsorgungswegs zu berücksichtigen. Da solche Rezepturen aktuell noch nicht im grossen Stil eingesetzt werden und sich das Thema Pflanzenkohle sehr dynamisch entwickelt, wird hier auf eine weitergehende Bewertung verzichtet.

Ein durchschnittlicher Flüssigboden, der heute im Normalfall verwendet wird, enthält 2.3 % Zement (siehe Kapitel 3.1.1) und gilt somit aufgrund seines Zementanteils als schwach verschmutztes Aushubmaterial. Er ist somit gemäss Art. 19 Abs. 2 VVEA zu verwerten. Dabei kann der ausgebaute Flüssigboden entweder

- für die Herstellung von hydraulisch oder bituminös gebundenen Baustoffen verwendet, oder
- am Ort des Anfalls (zur Wiederauffüllung des Grabens) wieder eingesetzt werden.

Nur wenn eine solche Verwertung nicht möglich ist, kann er unter Einhaltung der Vorgaben von Anhang 5 Ziffer 2 VVEA auf einer Deponie Typ B abgelagert werden.

Demgegenüber ist die Verwertung vor Ort für ausgebauten Magerbeton, welcher bei der herkömmlichen Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» verwendet wird, nicht zulässig.

Hemmnisse und Lösungsansätze von Flüssigboden

Die bisher begrenzte Anwendung von Flüssigboden in der Schweiz ist weniger auf technische Defizite als auf normative, vollzugstechnische und wahrnehmungsbezogene Faktoren zurückzuführen. Zentrale Hemmnisse sind Unsicherheiten bezüglich des Gewässerschutzes, die fehlende harte Abgrenzungsschicht im Rückbau, das Fehlen einer verbindlichen nationalen Normierung sowie die langfristige Ma-

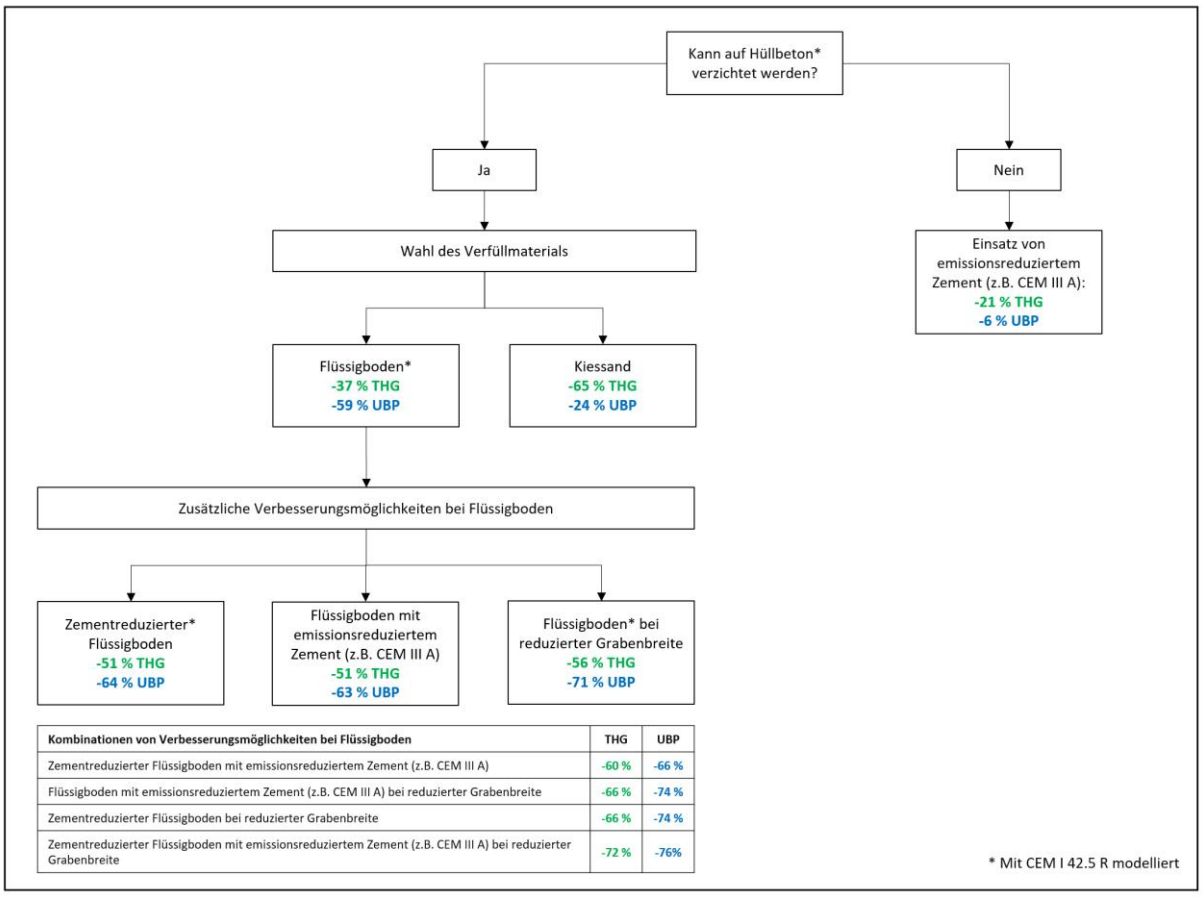
terialnachvollziehbarkeit. Als wichtigste Lösungsansätze gelten eine einheitlichere normative Grundlage, projektspezifische Dokumentation, Referenzprojekte und eine stärkere Standardisierung der Qualitätssicherung.

Schlussfolgerung

Diese Studie zeigt, dass Flüssigboden im Schweizer Tiefbau ein relevantes ökologisches Potenzial aufweist, insbesondere beim Ersatz von Bauweisen mit Hüllbeton. Zentrale Hebel sind eine reduzierte Grabenbreite, ein geringerer Zementeinsatz sowie die Wahl eines klinkerreduzierten Bindemittels. Technisch und umwelttechnisch ist Flüssigboden für viele Standardanwendungen grundsätzlich geeignet. Erfahrungen aus der Praxis zeigen zudem, dass diese Anwendungen in der Regel technisch unkritisch sind, sofern die projektspezifischen Randbedingungen berücksichtigt und die erforderlichen Nachweise erbracht werden.

Insgesamt ist Flüssigboden als praxisrelevantes Verfüllmaterial für eine ressourcen- und umweltschonendere Bauweise einzustufen. Für eine breitere Anwendung in der Praxis sind weitere Pilot- und Referenzprojekte sinnvoll, um Erfahrungen systematisch auszuwerten, die Vollzugspraxis weiter zu vereinheitlichen und die Anwendungssicherheit zu erhöhen.

Abbildung 0-5 zeigt eine Entscheidungshilfe, die die wichtigsten Hebel zur Reduktion der Umweltwirkungen im Leitungsbau vereinfacht zusammenfasst. Die Reduktionspotenziale für die Treibhausgasemissionen (THG, in Grün) und Umweltbelastungspunkte (UBP, in Blau) zeigen jeweils die Reduktion gegenüber der Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» pro m³ Grabenverfüllung.



Kombinationen von Verbesserungsmöglichkeiten bei Flüssigboden	THG	UBP
Zementreduzierter Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A)	-60 %	-66 %
Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A) bei reduzierter Grabenbreite	-66 %	-74 %
Zementreduzierter Flüssigboden bei reduzierter Grabenbreite	-66 %	-74 %
Zementreduzierter Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A) bei reduzierter Grabenbreite	-72 %	-76%

Abbildung 0-5: Entscheidungshilfe zur Reduktion von Umweltwirkungen im Leitungsbau.

Grenzen der Studie

Die Ergebnisse dieser Studie sind aufgrund mehrerer Vereinfachungen mit Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft vor allem Annahmen zur funktionellen Vergleichbarkeit der Bauweisen, zum Hüllbetonanteil in der konventionellen Bauweise, zur reduzierten Grabenbreite beim Einsatz von Flüssigboden und zur technischen Substituierbarkeit von Kiessand und Beton durch Flüssigboden. Weiterer Vertiefungsbedarf besteht vor allem bei der Frage, welche Mengen an Flüssigboden im Schweizer Tiefbau unter realen technischen, normativen und baubetrieblichen Randbedingungen tatsächlich erschliessbar wären. Hinsichtlich der Verwendung von Pflanzenkohle ist zu berücksichtigen, dass die Verfügbarkeit begrenzt ist. Sie ist deswegen aus einer Systemperspektive zu betrachten: mit der möglichen Verwendung in unterschiedlichen Baustoffen sowie auch anderen Nutzungsformen von Holz.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 3

1 Einleitung 12

1.1 Ausgangslage und Projektziel 12

1.2 Definition Flüssigboden 12

2 Methodik und Vorgehen 14

2.1 Methodische Grundlagen 14

2.2 Funktionelle Äquivalenz 14

2.3 Systemgrenzen 15

2.4 Sachbilanz und Umweltindikatoren 16

3 Ökobilanz von Flüssigboden 17

3.1 Ziel und Rahmenbedingungen 17

3.2 Sachbilanz 20

3.3 Wirkungsabschätzung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur 28

3.4 Ergebnisse der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur 28

3.5 Interpretation 30

4 Ökobilanz von Flüssigboden mit Pflanzenkohle 37

4.1 Definition der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle 37

4.2 Modellierung der Kohlenstoffspeicherung 38

4.3 Ergebnisse der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle 40

4.4 Interpretation 43

4.5 Technische Machbarkeit von Flüssigboden mit Pflanzenkohle 43

4.6 Überlegungen zur Systembetrachtung bei Pflanzenkohle 44

5 Vergleichende Ökobilanz von Grabenverfüllungen 46

5.1 Definition der Vergleichsszenarien 46

5.2 Systembeschreibung der Vergleichsszenarien 48

5.3 Ergebnisse der Vergleichsszenarien 49

5.4 Reduzierte Grabenbreite 54

5.5 Fazit der vergleichenden Ökobilanz 56

5.6 Weitere materialtechnische Ansätze zur Reduktion der Umweltwirkungen 56

5.7 Potenzialabschätzung von Flüssigboden im Schweizer Tiefbau 58

5.8 Kostenanalyse 58

6 Stoffliche Bewertung und umwelttechnische Relevanz von Flüssigboden 61

6.1 Zement 61

6.2 Bentonit 61

6.3 Pflanzenkohle ... 62
6.4 Aushubmaterial ... 63
6.5 Eluatverhalten und Grundwasserrelevanz ... 64
6.6 Fazit der stofflichen Bewertung von Flüssigboden ... 65
7 Technische Einordnung und Anwendung von Flüssigboden ... 66
7.1 Technische Daten ... 66
7.2 Technische Abgrenzung gegenüber der konventionellen Bauweise ... 66
7.3 Technische Rahmenbedingungen und Qualitätssicherung ... 67
7.4 Überblick bestehender Anwendungen und Erfahrungen ... 69
7.5 Empfehlungen für den Praxiseinsatz ... 73
7.6 Weiterer technischer und normativer Handlungsbedarf ... 73
8 Abfallrechtliche Einordnung von Flüssigboden ... 74
9 Hemmnisse und Lösungsansätze von Flüssigboden ... 76
10 Schlussfolgerung ... 78
11 Grenzen der Studie ... 79
Literaturverzeichnis ... 81
Begriffe und Abkürzungen ... 85
Abbildungen ... 86
Tabellen ... 90
Anhang ... 92
Anhang A. Methodische Grundlagen Ökobilanz ... 92
Anhang B. Wirkungsabschätzung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur ... 95
Anhang C. Ergänzende Grafiken ... 98
Anhang D. Potenzialabschätzung von Flüssigboden im Tiefbau ... 110
Anhang E. Technische Nachweise zur Rohrstatik und Einbaubedingungen ... 125

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Projektziel

Die Umweltbelastung des Bausektors ist erheblich, insbesondere durch den hohen Einsatz von Primärrohstoffen, emissionsintensiven Bindemitteln sowie die Abfuhr und Deponierung von Aushubmaterial. Flüssigboden stellt in diesem Kontext eine vielversprechende Alternative dar, da er die Verwertung von Aushubmaterial ermöglicht und gleichzeitig mit deutlich geringeren Bindemittelmengen auskommt als konventionelle Beton- oder Hüllbetonbauweisen. Dadurch können Materialkreisläufe geschlossen, Transporte reduziert, Deponieräume entlastet und energie- sowie emissionsintensive Zementanteile vermindert werden.

Ziel des Projekts ist es, die ökologischen Potenziale und Grenzen des Einsatzes von Flüssigboden im Schweizer Tiefbau wissenschaftlich fundiert zu bewerten und für die Praxis einzuordnen. Dazu wurde zunächst eine durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur definiert und deren Umweltwirkungen berechnet. Die erstellte Ökobilanz wurde extern durch Cornelia Stettler vom Ökobilanzbüro Carbotech AG fachlich geprüft.

In einem zweiten Schritt wurden Verbesserungsmöglichkeiten untersucht, um die Umweltwirkungen von Flüssigboden weiter zu reduzieren. Im Fokus standen dabei der Einsatz eines klinkerreduzierten Zements sowie zwei Flüssigbodenvarianten mit unterschiedlichen Pflanzenkohleanteilen. Für die Pflanzenkohlevarianten wurde zusätzlich der Einfluss der Zementsorte untersucht. Anschliessend wurde untersucht, wie Flüssigboden im Vergleich zu konventionellen Grabenverfüllungen (Kiessand mit und ohne Hüllbeton) abschneidet, um eine erste Einordnung seines ökologischen Potenzials zu ermöglichen.

Abschliessend erfolgte eine stoffliche, technische und normative Einordnung, um den Einsatz von Flüssigboden im Kontext bestehender Regelwerke und Anforderungen zu beurteilen.

1.2 Definition Flüssigboden

Flüssigboden ist ein Verfüllbaustoff, der überwiegend aus mineralischem Aushubmaterial besteht. Damit das Material nach dem Einbau aushärtet und stabil wird, wird ein hydraulisches Bindemittel beigemischt, in der Regel Zement. Zusätzlich enthält Flüssigboden ein Gleitmittel, das meist Bentonit enthält und für eine gute Fliessfähigkeit sorgt. Wasser wird beigemischt, damit sich das Material gut einbauen lässt und sich selbst verdichtet. Je nach Feuchtigkeitsgehalt des Aushubs kann ausserdem Kalk eingesetzt werden, um überschüssige Feuchtigkeit zu binden. Flüssigböden werden auch als zeitweise fliessfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe «ZFSV» bezeichnet.

Aktuell gibt es noch keine technische Norm für Flüssigboden, weshalb es keine einheitliche Definition mit entsprechenden physikalischen und chemischen Spezifikationen gibt. Einige Flüssigbodenhersteller in der Schweiz berufen sich auf die von der RAL Gütergemeinschaft Flüssigboden e.V. aus Deutschland definierten Anforderungen in der RAL GZ 507 [2]. Dort wird klar festgehalten, dass Flüssigboden als friktional, kohäsiv rückverfestigendes Material ohne zwängende, starre Fremdstrukturen, definiert ist. Im Gegensatz dazu gibt es die hydraulisch abbindenden Materialien mit zwängenden, starren Fremdstrukturen (z.B. Zementstrukturen), die nicht als Flüssigboden gelten. Diese Stoffe werden im Hinweisblatt des FGSV (Forschungsgesellschaft Strassen- und Verkehrswesen) geregelt [3].

Der Grundsatz des Flüssigboden-Verfahrens ist, dass wichtige Eigenschaften des ausgehobenen Bodens erhalten bleiben. Der Flüssigboden soll sich bauphysikalisch vergleichbar mit dem Umgebungsboden verhalten, eine ähnliche Tragfähigkeit und ein ähnliches Konsolidierungsverhalten aufweisen. Damit sollen Differenzsetzungen, Hebungen, Risse in Strassen und der Einbau eines «Fremdkörpers» verhindert werden. Je nach Rezeptur können gezielte bautechnische Eigenschaften auch verändert werden,

wie zum Beispiel die Rückverfestigungsgeschwindigkeit, die Pumpbarkeit, der Auftriebsverlauf, die Retentionsfähigkeit und die Entmischungsstabilität.

Die Rezeptur muss jeweils an die Anforderungen der konkreten Anwendung angepasst werden. Ein Parameter, der nur begrenzt gezielt beeinflusst werden kann, ist die hydraulische Durchlässigkeit. Durch die Aufbereitung und Durchmischung verändern sich die Bodeneigenschaften geringfügig gegenüber dem Ausgangsmaterial. Als Faustregel weist Flüssigboden eine um eine Zehnerpotenz tiefere hydraulische Durchlässigkeit auf als das ursprüngliche Aushubmaterial (z. B. Reduktion von 10^{-5} m/s auf ca. 10^{-6} m/s).

In der Schweiz befindet sich derzeit die Norm SIA 4016 zum Thema Flüssigboden in Erarbeitung. Diese wird innerhalb der SIA-Kommission 190 (Kanalisationsbau) erarbeitet und soll erstmals eine einheitliche fachliche Definition, eine klare Abgrenzung zu hydraulisch gebundenen Materialien sowie empfohlene technische Mindestanforderungen für den Einsatz von Flüssigboden festlegen [4]. Bis zu ihrer Veröffentlichung wird Flüssigboden in der Praxis weiterhin anhand internationaler Regelwerke beurteilt.

2 Methodik und Vorgehen

2.1 Methodische Grundlagen

Diese Studie umfasst die Erstellung von mehreren Ökobilanzen für verschiedene Grabenverfüllsysteme. Ziel ist es, die Umweltwirkungen dieser Varianten differenziert zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Im Mittelpunkt stehen dabei die ökologischen Auswirkungen über die Herstellungs-, Bau- und Entsorgungsphase der betrachteten Verfüllsysteme.

Alle Ökobilanzen wurden gemäss ISO 14040:2006 [5] bzw. ISO 14044:2006 [6] erstellt. Nach dieser Norm umfasst eine Ökobilanz die nachfolgenden Schritte:

1. Ziel und Rahmenbedingungen
2. Sachbilanz
3. Wirkungsbilanz
4. Auswertung und Interpretation

Die Methodik und die Definition dieser vier Schritte der Ökobilanz sind im Anhang A detailliert beschrieben. In den folgenden Kapiteln liegt der Fokus auf der konkreten Anwendung dieser Methodik für die genannten Verfüllvarianten.

2.2 Funktionelle Äquivalenz

Da Flüssigboden in der Praxis in unterschiedlichen Anwendungsbereichen des Tiefbaus eingesetzt wird und in dieser Studie eine durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur auf Basis von zwölf Rezepturen betrachtet wird, wurde bewusst kein spezifisches Anwendungsfeld untersucht. Stattdessen dient ein vereinfachter Leitungsgraben als repräsentatives Referenzsystem, um die Verfüllvarianten vergleichbar darzustellen.

Die funktionale Äquivalenz aller in dieser Studie betrachteten Verfüllvarianten ergibt sich gemäss EN 15643-5 aus den funktionalen und technischen Anforderungen an das Bauwerk. Es wird angenommen, dass alle betrachteten Verfüllsysteme die nachfolgend definierten Anforderungen erfüllen. Als gemeinsame Funktion wird die dauerhafte Verfüllung eines Leitungsgrabens mit folgenden Eigenschaften betrachtet:

- Grabengeometrie: 1 Meter Länge, 1 Meter Breite und 1 Meter Tiefe (Volumen 1 m³)
- Erreichen einer ausreichenden Tragfähigkeit des Verfüllsystems mit einem Verformungsmodul[1] ME ≥ 30 MN/m²
- Nutzungsdauer von 100 Jahren

Die funktionelle Einheit ist definiert als die Verfüllung eines Grabens mit einem Volumen von 1 m³ unter Erfüllung der oben genannten funktionalen und technischen Anforderungen. Sie umfasst die Herstellung der Verfüllmaterialien (Module A1 – A3), den Einbau (Module A4 – A5) und den Rückbau ein-

[1] Der Verformungsmodul ME wird im Plattendruckversuch bestimmt und beschreibt die Tragfähigkeit beziehungsweise Verformbarkeit des eingebauten Materials. Gemäss SN 670 317b entspricht ein Wert von ME ≥ 30 MN/m² dem Mindestkriterium auf Ebene Untergrund bzw. Planum. In dieser Studie wird dieser Wert als Mindestkriterium für die funktionelle Gleichwertigkeit aller betrachteten Verfüllvarianten verwendet.

schliesslich der Entsorgung am Ende der Lebensdauer (Module C1 – C4). Betrachtet werden dabei folgende Verfüllmaterialien: Kiessand mit Hüllbeton, Kiessand ohne Hüllbeton, Flüssigboden, Flüssigboden mit moderatem und maximalem Pflanzenkohleanteil.

2.3 Systemgrenzen

Gemäss EN 15643-5 [7] (siehe dazu Abbildung 2-1) umfasst das analysierte System die Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1 bis A3), die Errichtungsphase des Bauwerks (Module A4 und A5), sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt.

In der Herstellungsphase werden die Rohstoffgewinnung, der Transport zum Hersteller und die Herstellung der wichtigsten verwendeten Baukomponenten betrachtet. Der Schwerpunkt liegt auf den verwendeten Baumaterialien: Aushubmaterial, Bindemittel und chemische Zusatzstoffe. Für diese Materialien wurden die Prozessketten der Herstellung so realistisch wie möglich abgebildet.

In der Errichtungsphase werden der Transport des Verfüllmaterials zur Baustelle sowie der Einbau und die Verfüllung des Grabens berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Grabenverfüllung selbst.

Während der Nutzungsphase verbleibt das Verfüllmaterial im Untergrund und übernimmt dauerhaft die Funktion einer stabilen und homogenen Verfüllung. Bei den in dieser Studie untersuchten Flüssigbodenvarianten ist nicht von relevanten Emissionen in Boden, Wasser oder Luft auszugehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Grabenverfüllung während der Nutzungsdauer von 100 Jahren nicht beschädigt wird und keine Instandsetzungsmassnahmen nötig werden.

In der Entsorgungsphase wird das Bauwerk rückgebaut und die dabei entstehenden Abfälle werden verwertet (direkt vor Ort oder auf einem externen Bauperimeter) oder abgelagert. Es werden alle damit verbundenen Prozesse, einschliesslich der Transporte, berücksichtigt, basierend auf dem aktuellen Stand der Technik. Gemäss EN 15643-5 [7] umfasst die Entsorgungsphase die Prozesse bis zur Behandlung bzw. endgültigen Entsorgung der rückgebauten Materialien (Module C1 bis C4).

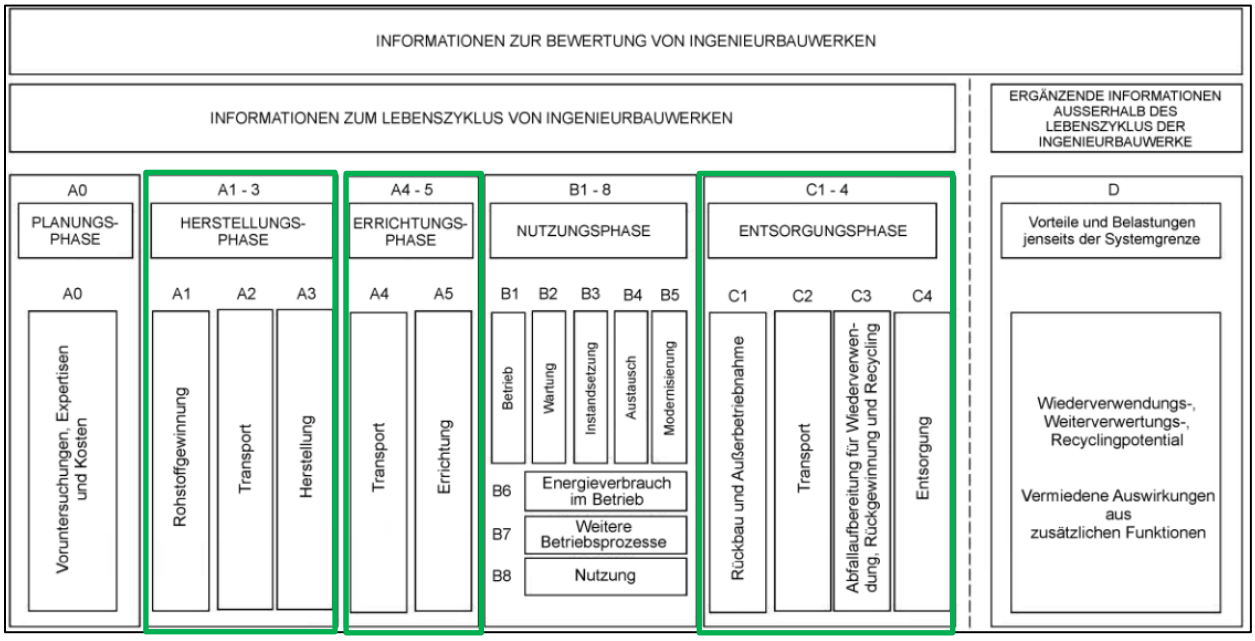


Abbildung 2-1: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [7].

2.4 Sachbilanz und Umweltindikatoren

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

Die Verknüpfung der technischen Vordergrunddaten mit den generischen Hintergrunddaten ermöglicht über Wirkungsabschätzungsmethoden die Ermittlung der Umweltwirkungen. In dieser Studie wurden drei Umweltindikatoren verwendet, um eine mehrdimensionale und ganzheitliche Betrachtung der Umweltwirkungen zu erhalten. Diese drei Indikatoren sind ebenfalls in den Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten der KBOB vorgeschrieben [1].

- **Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a):** Dieser Umweltindikator beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO_2. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandberichts des IPCC (2021) quantifiziert [8], [9].
- **Methode der ökologischen Knappheit 2021 (UBP-Methode 2021, Umweltbelastungspunkte):** Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen aufgezeigt [10]. Sie basiert auf der schweizerischen Umweltpolitik. Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen [11], [12]. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt als besonders hilfreich für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, da die Methode die Umweltpolitik der Schweiz widerspiegelt und umfassend ist.
- **Kumulierter Energieaufwand (KEA):** Dieser Umweltindikator quantifiziert den kumulierten Energieaufwand, bzw. den Primärenergiebedarf: Nicht erneuerbare Primärenergie beinhaltet Energie aus fossilen und nuklearen Energieträgern sowie Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern. Die erneuerbare Primärenergie umfasst Energie aus Wasserkraft, Holz / Biomasse (ohne Kahlschlag von Primärwäldern), Sonnen-, Wind-, geothermische Energie und Umgebungswärme. Es wird die geerntete Energiemenge bewertet [13]. Der Bedarf an erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie ergibt summiert den gesamten Primärenergiebedarf. Dieser ist ein Leitindikator der 2000 Watt Gesellschaft. Damit werden die einzelnen Kategorien den beiden Gruppen «erneuerbar» und «nicht erneuerbar» zugewiesen.

3 Ökobilanz von Flüssigboden

3.1 Ziel und Rahmenbedingungen

Ziel ist die Erstellung einer Ökobilanz für eine repräsentative durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur über die Herstellungs-, Errichtungs- und Entsorgungsphase (A1 – A5 und C1 – C4). Zusätzlich wird eine verbesserte Variante untersucht, bei der in der gleichen Rezeptur ein klinkerreduzierter Zement eingesetzt wird. Es werden Sensitivitätsanalysen zu zentralen Modellannahmen durchgeführt.

3.1.1 Definition der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

Zur Modellierung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur wurde in der vorliegenden Studie der Mittelwert aus 12 Schweizer Flüssigbodenrezepturen verwendet (Tabelle 3-1), basierend auf in Fachvorlesungen und dokumentierten Forschungsgrundlagen der OTH Regensburg und der FHNW Muttenz präsentierten Flüssigbodenrezepturen [14] sowie auf Herstellerrezepturen von EcoSoil AG [15] und KIBAG [16] (siehe dazu Kapitel 3.2.1). Die berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen wurden mit unverschmutztem Aushubmaterial hergestellt und repräsentieren typische Standardanwendungen im Tief- und Leitungsbau und sind nicht auf ein einzelnes spezifisches Anwendungssegment beschränkt.

Tabelle 3-1: Daten zur Mittelwertbildung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur.

Rezeptur	Aushubmaterial [kg]	Zement CEM I 42.5 R [kg]	Bentonit [kg]	Kalk [kg]	Wasser [kg]	Total [kg/m³]
Rezeptur 1	1’325	37.5	37.5	0	400	1'800
Rezeptur 2	1’500	45.0	35.0	15	340	1'935
Rezeptur 3	1’320	27.3	34.0	0	410	1'791
Rezeptur 4	767	47.0	33.0	0	668	1'515
Rezeptur 5	1’222	28.0	28.0	0	505	1'783
Rezeptur 6	1’083	51.0	37.0	0	561	1'732
Rezeptur 7	1’317	47.0	27.0	0	478	1'869
Rezeptur 8	1’203	59.0	27.0	0	517	1'806
Rezeptur 9	1’478	25.0	33.0	0	406	1'942
Rezeptur 10	1’293	38.0	33.0	0	472	1'836
Rezeptur 11	1’450	48.0	31.0	0	180	1'709
Rezeptur 12	1’640	50.0	31.0	0	180	1'901
Mittelwert	**1'299.8**	**41.9**	**32.2**	**1.3**	**426.4**	**1'801.6**
Modellierte Werte[2]	**1'300.0**	**42.0**	**32.0**	**1.0**	**426.0**	**1'801.0**

[2] Zur Vereinfachung der Modellierung wurden die Mittelwerte auf sinnvolle Stellen gerundet. Die Rundung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz.

3.1.2 Systembeschreibung von Flüssigboden

Herstellungsphase (Module A1 bis A3)

Für die Herstellung von Flüssigboden werden verschiedene Rohstoffe eingesetzt, darunter das mineralische Korngerüst aus lokal verfügbarem Aushubmaterial sowie bindende und fliessfähigkeitssteuernde Zusatzstoffe. Das Aushubmaterial besteht aus dem auf der jeweiligen Baustelle anfallenden Aushubmaterial, welches mit einem hydraulischen Bagger gewonnen und per LKW zur Flüssigbodenanlage transportiert wird. Typischerweise liegen Baustellen in einer Distanz von 5 bis 10 km zum Produktionsstandort, daher wurde in dieser Studie mit einer konservativen Transportdistanz von 10 km gerechnet. Ergänzende Rohstoffe wie Zement, Bentonit, Kalk und Wasser werden direkt an die Flüssigbodenanlage geliefert. In dieser Studie wird Flüssigboden ausschliesslich als ex-situ hergestelltes Produkt modelliert, das bedeutet, die Aufbereitung und Mischung vom Flüssigboden erfolgen in einer stationären Anlage ausserhalb der Baustelle[3].

In der Flüssigbodenanlage wird das Aushubmaterial zunächst aufbereitet, indem grobe Bestandteile mittels Schaufelseparator oder mobiler Siebmaschine abgetrennt werden, um eine gleichmässige Kornzusammensetzung sicherzustellen. Gemäss Herstellerangaben wird der dabei anfallende Siebrückstand in der Regel in der Betonherstellung verwertet und liegt daher gemäss Cut-Off-Prinzip ausserhalb der definierten Systemgrenze. Das verbleibende Feingut wird anschliessend mit den Zusatzstoffen dosiert und in einer stationären Mischanlage homogen vermischt.

Für Dosierung, Mischung und Förderung kommen verschiedene Maschinen wie Förderbänder, Fahrmischer, Radlader und Silos zum Einsatz. Diese werden je nach Funktion mit Strom, Diesel oder Benzin betrieben. Der Strombedarf entfällt hauptsächlich auf Steuerung, Dosierung und Mischeinheit, während Baumaschinen überwiegend mit Diesel betrieben werden.

Gemäss Herstellerangaben fallen bei der Produktion von Flüssigboden keine weiteren zu entsorgenden Produktionsabfälle innerhalb der definierten Systemgrenze an.

Errichtungsphase (Module A4 bis A5)

Der frische Flüssigboden wird unmittelbar nach der Herstellung in Fahrmischer geladen und direkt von der Produktionsanlage zur Baustelle transportiert. Hier wurde analog zur vorherigen Transportdistanz 10 km angesetzt. Der Einbau erfolgt direkt aus dem Fahrmischer über eine Rutsche oder mittels Schlauchsystem in den Graben oder Bauabschnitt. Eine konventionelle Verdichtung ist nicht erforderlich, da der Flüssigboden selbstverdichtend ist.

Abbildung 3-1 zeigt die Materialflussanalyse sowie die zugrunde gelegten Transportdistanzen der Module A1 – A5.

[3] *Ex-situ* bezeichnet die Herstellung von Flüssigboden in einer stationären Mischanlage ausserhalb der Baustelle, *in-situ* die Herstellung direkt auf der Baustelle mit einer mobilen Mischanlage. Je nach Projektgrösse erfolgt die Produktion entweder ex-situ oder in-situ. In der Praxis dominiert jedoch die ex-situ-Produktion, da sie weniger Platz benötigt und eine konstante Materialqualität ermöglicht. Die in-situ-Produktion kann bei sehr grossen Bauvorhaben ökologische Vorteile bieten (z.B. weniger Transport), erfordert jedoch eine grössere Fläche für Silos, Depots und Zufahrten und ist daher bei vielen Projekten nicht umsetzbar.
Da die ex-situ-Produktion in der Schweiz verbreiteter als die in-situ-Produktion ist und hierfür verlässliche Daten vorliegen, wurden im Rahmen dieser Studie alle Flüssigboden-Szenarien ex-situ modelliert.

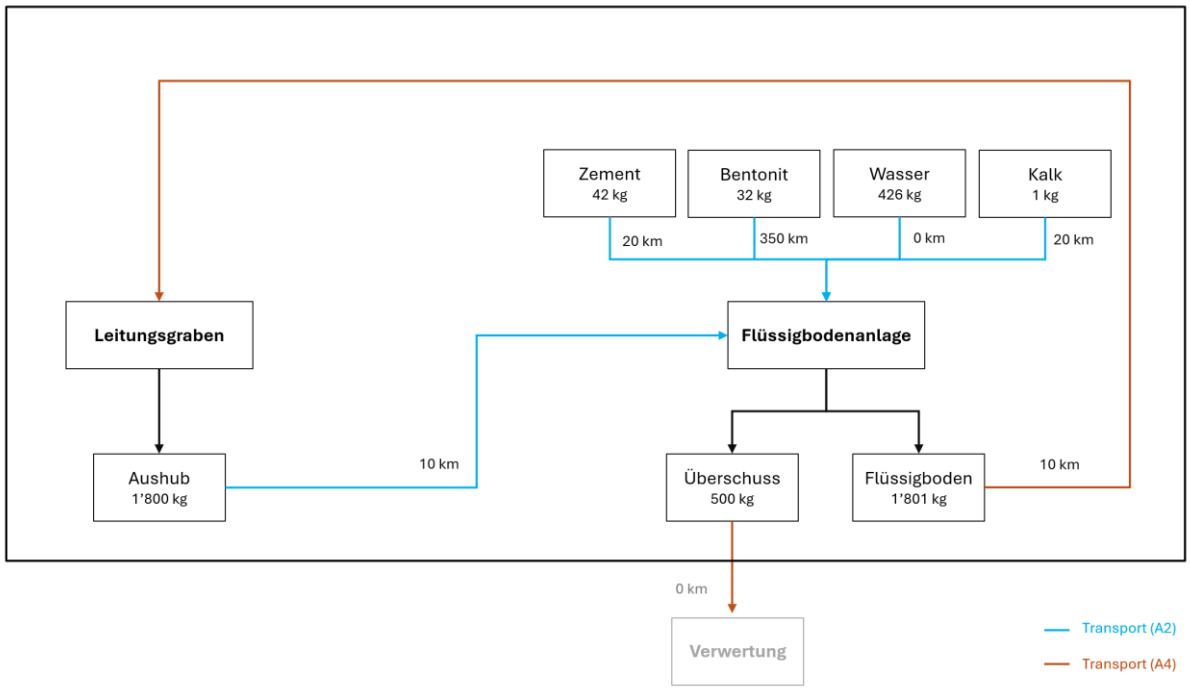


Abbildung 3-1: Materialflussanalyse und Transportdistanzen des Flüssigbodens (A1 – A5).

Nutzungsphase (Module B1 bis B7)

Während der Nutzungsphase verbleibt der Flüssigboden im Untergrund und übernimmt dauerhaft die Funktion einer stabilen und homogenen Verfüllung. Es ist daher keine Wartung oder Energiezufuhr erforderlich. Bei den in dieser Studie untersuchten Flüssigbodenvarianten ist nicht von relevanten Emissionen in Boden, Wasser oder Luft auszugehen.

Entsorgungsphase (Module C1 bis C4)

Bei Sanierungsarbeiten oder beim Ersatz von Leitungen wird der verfestigte Flüssigboden mit einem Radbagger und einer Baggerschaufel ausgehoben. Dabei entsteht ein Dieselverbrauch für die eingesetzten Baumaschinen. Das ausgehobene Material liegt in mineralischer verwertbarer Form vor.

Basierend auf Herstellerangaben wird angenommen, dass das rückgebaute Aushubmaterial am Ende der Nutzungsdauer zu gleichen Anteilen deponiert und verwertet werden kann. In der Modellierung werden daher 50 % deponiert und 50 % verwertet, wovon 20 % vor Ort und 30 % auf anderen Bauperimetern eingesetzt werden.

Abbildung 3-2 zeigt die Materialflussanalyse sowie die zugrunde gelegten Transportdistanzen der Module C1 – C4.

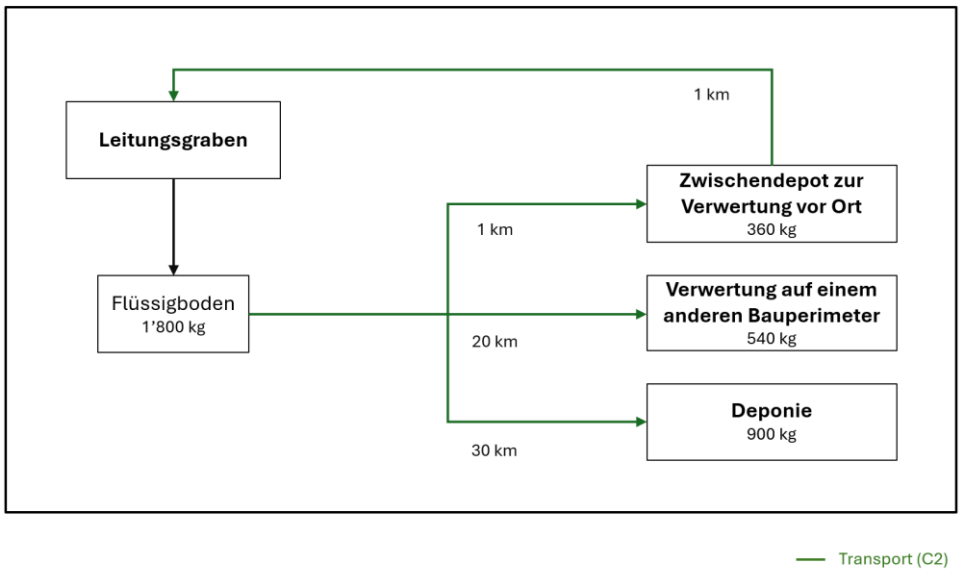


Abbildung 3-2: Materialflussanalyse und Transportdistanzen des Flüssigbodens (C1 – C4).

3.2 Sachbilanz

3.2.1 Datengrundlage: Vordergrunddaten

Die in dieser Studie verwendeten technischen Vordergrunddaten basieren auf Primärdaten aus Industrie und Forschung, welche bereits in früheren Studien der UTech [17], [18], [19] und [20] verwendet wurden. Diese Studien stützen sich auf die nachfolgend aufgeführten Primärdatenquellen und wurden für die vorliegende Arbeit konsistent übernommen.

Primärdatenquellen

Die folgenden Vordergrunddaten wurden direkt aus Praxisprojekten, Herstellerangaben und Forschungseinrichtungen erhoben:

- Materialbezogene Daten: Flüssigbodenrezepturen aus Fachvorlesungen und Forschungseinrichtungen (OTH Regensburg, FHNW Muttenz [14]) sowie Herstellerrezepturen (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Materialanlieferungen: Angaben zu Materialströmen und Anlieferungen aus Praxisprojekten (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Produktionsprozess: Prozessbeschreibungen und Anlagenkonzepte der Flüssigbodenherstellung (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Energieverbräuche von Maschinen: Betriebs- und Verbrauchsdaten eingesetzter Maschinen (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Energieverbräuche von Fahrzeugen: Angaben zu Fahrzeugtypen, Antriebsarten und Energieverbräuchen (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Abfallbezogene Daten: Angaben zu anfallenden Abfällen aus Herstellung und Einbau (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).

3.2.2 Datengrundlage: Hintergrunddaten

Zur ökologischen Modellierung der technischen Vordergrunddaten werden generische Daten aus Umweltdatenbanken verwendet. Diese Daten werden als Hintergrunddaten bezeichnet. In der vorliegenden Studie werden alle Hintergrunddaten aus dem Ökobilanzdatenbestand BAFU:2025, Stand 2026» [21] verwendet. Mittels der Ökobilanzsoftware SimaPro wird das Ökobilanzmodell implementiert und die technischen Vordergrunddaten werden mit den Hintergrunddaten verknüpft.

3.2.3 Sachbilanz der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

Die vorliegende Sachbilanz bezieht sich auf die funktionelle Einheit von einem Kubikmeter Grabenverfüllung mit Flüssigboden. In den folgenden Tabellen (Tabelle 3-2 bis Tabelle 3-9) wird die Sachbilanz für die durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur dargestellt.

Tabelle 3-2 zeigt die Rohstoffe, die gemäss der definierten durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur für die Herstellung von 1 m³ Flüssigboden benötigt werden (siehe Kapitel 3.1.1). Auf der Baustelle wird 1 m³ Aushubmaterial mit einer angenommenen Dichte von 1’800 kg/m³ ausgehoben.

Tabelle 3-2: Sachbilanz – Bereitstellung der Flüssigbodenkomponenten (A1).

Technische Vordergrunddaten		**Hintergrundprozess Umweltdatenbank**	**Herleitung / Bemerkung**
Parameter	**Menge/FU**		
Aushub	1’800 kg	Excavation, hydraulic digger, average {CH} U	Aushubleistung von 1 m³ durch einen durchschnittlichen Hydraulikbagger
Aushub in Flüssigbodenanlage	1’800 kg	Kein Datensatz	Kein Datensatz, da das Material für die Flüssigbodenproduktion verwertet wird.
Zement CEM I 42.5 R	42 kg	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant {CH} U	Gemäss durchschnittlicher Flüssigbodenrezeptur
Bentonit	32 kg	Bentonite, at mine {DE} U	Gemäss durchschnittlicher Flüssigbodenrezeptur
Wasser	426 kg	Tap water, at user {CH} U	Gemäss durchschnittlicher Flüssigbodenrezeptur
Kalk	1 kg	Limestone, milled, loose, at plant {CH} U	Gemäss durchschnittlicher Flüssigbodenrezeptur

Tabelle 3-3 zeigt den Transport der Rohstoffe zur Flüssigbodenanlage. Die Transportdistanz des Aushubmaterials zur Flüssigbodenanlage wurde auf Grundlage von Herstellerangaben festgelegt. Demnach liegen Baustellen typischerweise in einer Entfernung von 5 bis 10 km vom Produktionsstandort. Für die vorliegende Studie wurde konservativ eine Distanz von 10 km angesetzt.

Für Zementtransporte in der Schweiz geben Frischknecht et al. (2007) [22] typische Strassentransportdistanzen von 20 km an. Diese Distanz wurde in der vorliegenden Studie übernommen. Kalk ist ein mineralischer Primärrohstoff und in der Regel regional verfügbar. Entsprechend wurde analog zu mineralischen Standardprodukten gemäss Frischknecht et al. (2007) [22] eine Transportdistanz von 20 km angenommen. Da keine projektspezifischen Informationen zur tatsächlichen Wahl des Verkehrsträgers vorlagen, wurde für die Zement- und Kalktransporte konservativ ein reiner LKW-Transport modelliert.

In Europa wird Bentonit hauptsächlich in Deutschland, Griechenland und der Türkei gewonnen. In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass der in die Schweiz importierte Bentonit aus Deutschland

stammt. In Deutschland befinden sich relevante Abbau- und Aufbereitungsstandorte in west- und mitteldeutschen Regionen. Da für die konkrete Herkunft und die tatsächlichen Transportdistanzen keine projektspezifischen Daten vorlagen, wurde für die Modellierung eine durchschnittliche Transportdistanz von 350 km von diesen Regionen bis in die Mitte der Schweiz angenommen. In der Praxis erfolgt der Import mineralischer Rohstoffe wie Bentonit häufig im kombinierten Verkehr (Bahn und LKW). In dieser Studie wurde bewusst ein ausschliesslicher LKW-Transport modelliert, da dessen Ökokennwert konservativer als jener des Schienentransports ist.

Der Transport von Wasser zur Flüssigbodenanlage wurde nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass Wasser am Produktionsstandort verfügbar ist.

Tabelle 3-3: Sachbilanz – Transport der Flüssigbodenkomponenten zur Flüssigbodenanlage (A2).

Technische Vordergrunddaten		**Hintergrundprozess Umweltdatenbank**	**Herleitung / Bemerkung**
Parameter	**Menge/FU**		
Aushub	18 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Gewicht: 1.8 t Transportdistanz: 10 km [15], [16]
Zement CEM I 42.5 R	0.8 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Gewicht: 0.042 t Transportdistanz: 20 km [22]
Bentonit	11.2 tkm	Transport, freight, lorry, fleet average {RER} U	Gewicht: 0.032 t Transportdistanz: 350 km (Schätzung der UTech)
Kalk	0.02 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Gewicht: 0.001 Transportdistanz: 20 km [22]

Tabelle 3-4 zeigt die für die Herstellung von Flüssigboden erforderliche Infrastruktur sowie die eingesetzten Maschinen.

Das Aushubmaterial wird zunächst mittels mobiler Siebmaschine aufbereitet. Rund 70 % des Aushubmaterials (ca. 1’300 kg) werden für die Flüssigbodenherstellung eingesetzt. Das verbleibende Überschussmaterial eignet sich aufgrund seiner Zusammensetzung für die Weiterverwendung in der Betonherstellung und wird entsprechend verwertet. Unter dieser Systemabgrenzung fallen bei der Herstellung von Flüssigboden keine Abfälle an.

Tabelle 3-4: Sachbilanz – Flüssigbodenproduktion (A3).

Technische Vordergrunddaten		Hintergrundprozess Umweltdatenbank	Herleitung / Bemerkung
Parameter	**Menge/FU**		
Mobile Siebmaschine mit Schaufelseparator	5.57E-3 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Gewicht der Siebmaschine: 13 t [15], Lebensdauer[4]: 15 Jahre, Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a, Durchsatz: 280 t/h [23], Gewicht Flüssigboden: 1.8 t → 13 t / (15 a × 1'000 h/a × 280 t/h) × 1.8 t/m³ × 1'000 kg/t
Diesel für Siebmaschine mit Schaufelseparator	1.62 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Dieselverbrauch: 7 L/h [24], Heizwert: 35.95 MJ/L [22], Betriebszeit: (1 / 280 t/h [23]) x 1.8 t → 7 L/h × 35.95 MJ/L × (1 / 280 t/h) x 1.8 t
Bodenmaterialüberschuss	500 kg	-	Kein Datensatz, da das Material in der Betonherstellung verwertet wird [15].
Silos	8.0-3 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Gewicht Silos[5]: 6 t (3 Silos à 2 t) [15], Lebensdauer[4]: 20 Jahre, Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a [15], Durchsatz der Flüssigbodenanlage: 37.5 m³/h [15], [16] → 6 t / (20 a × 1'000 h/a × 37.5 m³/h) × 1'000 kg/t
Förderband	1.67E-5 m	Conveyor belt, at plant {RER} U	Länge Förderband: 12 m [15], [16], Lebensdauer[4]: 20 Jahre, Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a [15], Durchsatz der Flüssigbodenanlage: 37.5 m³/h [15], [16] → 12 m / (20 a × 1'000 h/a × 37.5 m³/h)
Fahrmischer	2.78E-2 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Gewicht Fahrmischer[4]: 10 t, Lebensdauer[3]: 10 Jahre, Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a [15], Durchsatz der Flüssigbodenanlage: 37.5 m³/h → 10 t / (10 a × 1'000 h/a × 37.5 m³/h) × 1'000 kg/t
Diesel für Fahrmischer	14.9 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Dieselverbrauch: 15 L/h [15], Heizwert: 35.95 MJ/L [22], Betriebszeit: 1/37.5 m³/h [15], [16] → 15 L/h × 35.95 MJ/L × 1/37.5 m³/h

[4] Annahme der UTech

[5] Für jedes eingesetzte Material wird ein separates Silo benötigt: ein Silo für Zement, ein Silo für Bentonit sowie ein Wassersilo bzw. -tank für die Dosierung im Herstellungsprozess des Flüssigbodens. Für den Aushub ist kein Silo erforderlich, da dieser direkt von der Baustelle zur Flüssigbodenanlage transportiert und dort ohne Zwischenlagerung verarbeitet wird.

Radlader	1.8E-6 Stück	Building machine {RER} U	Lebensdauer[4]: 10 Jahre, Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a [15], Durchsatz: 0.018 h/m³ [25] → 1 / (10 a × 1'000 h/a) × 0.018 h/m³
Diesel für Radlader	4.5 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Dieselverbrauch: 7 L/h [15], Heizwert: 35.95 MJ/L [22], Durchsatz: 0.018 h/m³ [25] → 7 L/h × 35.95 MJ/L × 0.018 h/m³
Strom[6]	0.5 kWh	Electricity, medium voltage, at grid {CH} U	Für 36 m³ Flüssigboden werden 18 kWh Strom benötigt, entsprechend 0.5 kWh/m³ [15].
Flüssigbodenanlage	5.56-4 m²	Building, hall, steel construction {CH} U	Hallenfläche[4]: 400 m², Lebensdauer[4]: 20 Jahre, Durchsatz: 37.5 m³/h [15], [16], Betriebsstunden[4]: 1'000 h/a → 400 m² / (20 a × 37.5 m³/h × 1'000 h/a)

Tabelle 3-5 zeigt den Transport des hergestellten Flüssigbodens von der Flüssigbodenanlage zurück zur Baustelle. Analog zum Aushubtransport wurde dafür eine Distanz von 10 km angenommen. Der Transport erfolgt mit einem LKW-Fahrmischer.

Tabelle 3-5: Sachbilanz – Transport des Flüssigbodens auf die Baustelle (A4).

Technische Vordergrunddaten		**Hintergrundprozess Umweltdatenbank**	**Herleitung / Bemerkung**
Parameter	**Menge/FU**		
LKW-Fahrmischer	18 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Gewicht: 1.8 t Transportdistanz: 10 km [15], [16]

Tabelle 3-6 zeigt die Verfüllung des Grabens mit Flüssigboden. Für diesen Prozess wird ausschliesslich der LKW-Fahrmischer benötigt, weshalb dessen Dieselverbrauch modelliert wurde.

Tabelle 3-6: Sachbilanz – Einbau vom Flüssigboden (A5).

Technische Vordergrunddaten		**Hintergrundprozess Umweltdatenbank**	**Herleitung / Bemerkung**
Parameter	**Menge/FU**		
Fahrmischer und Schlauch	7.7 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Dieselverbrauch: 15 L/h [15], Heizwert: 35.95 MJ/L [22], Durchsatz[7]: 0.0143 h/m³ [26] → 15 L/h × 35.95 MJ/L × 0.0143 h/m³

Tabelle 3-7 zeigt die modellierte Rückbauphase am Ende der Lebensdauer des Grabens. Da Flüssigboden bauphysikalisch vergleichbare Eigenschaften wie der umgebende Boden aufweist, wird der Rückbau vereinfacht als Aushub mit einem Hydraulikbagger (Baggerschaufel) modelliert.

[6] Strom wird für Dosier- und Tariereinheiten benötigt.
[7] Betriebszeit des Fahrmischers einschliesslich des Einfüllschlauchs pro m³ Grabenverfüllung.

Tabelle 3-7: Sachbilanz – Rückbau vom Flüssigboden (C1).

Technische Vordergrunddaten		Hintergrundprozess Umweltdatenbank	Herleitung / Bemerkung
Parameter	**Menge/FU**		
Radbagger und Baggerschaufel	23.81 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Dieselverbrauch: 11.59 L/h [27], Heizwert: 35.95 MJ/L [22], Durchsatz: 1/17.5 h/m³ [28] → 11.59 L/h × 35.95 MJ/L × 1/17.5 h/m³

Tabelle 3-8 zeigt den Transport des rückgebauten Flüssigbodens zur Entsorgung bzw. Verwertung. Basierend auf Herstellerangaben wird angenommen, dass 50 % des Materials deponiert und 50 % verwertet werden. Dabei werden 50 % des Aushubmaterials einer Deponie Typ B zugeführt. Die verbleibenden 50 % werden verwertet, wobei 30 % auf einem anderen Bauperimeter eingesetzt und 20 % zwischengelagert und anschliessend vor Ort verwertet werden. Die Verwertung von Flüssigboden als Flüssigboden stellt in der Praxis den wahrscheinlichsten und wirtschaftlich naheliegendsten Verwertungsweg dar. Die Annahme einer hälftigen Deponierung ist daher als konservativ zu beurteilen und bildet eine vorsichtige Abschätzung der tatsächlichen Verwertungsanteile ab.

Die für die Entsorgung angesetzte Transportdistanz wurden aus der Studie «Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen» übernommen [29]. Für die Entsorgung von Aushubmaterial auf einer Deponie Typ B wird dabei eine durchschnittliche Transportdistanz von 30 km angesetzt, modelliert als Strassentransport.

Es wird angenommen, dass das Aushubmaterial, das auf einem anderen Bauperimeter verwertet wird, eine Transportdistanz von 20 km aufweist. Diese Annahme orientiert sich an den für mineralische Produkte angegebenen Standardtransportdistanzen gemäss Frischknecht et al. (2007) [22].

Ein Teil des beim Rückbau anfallenden Aushubmaterials wird nicht direkt wieder eingebaut, sondern aus baulogistischen Gründen (z. B. Bauablauf, Platzverhältnisse) temporär zwischengelagert, um anschliessend erneut vor Ort verwendet zu werden. In der Modellierung wird hierfür ein Zwischendepot in 1 km Entfernung angenommen. Daraus ergibt sich für den verwerteten Aushub eine Gesamttransportdistanz von 2 km (1 km zur Zwischenlagerung und 1 km zurück zur Baustelle).

Tabelle 3-8: Sachbilanz – Transport von der Baustelle zur Entsorgung bzw. Verwertung (C2).

Technische Vordergrunddaten		Hintergrundprozess Umweltdatenbank	Herleitung / Bemerkung
Parameter	**Menge/FU**		
Transport zur Deponie	27 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Distanz zur Deponie: 30 km [29] Anteil des Aushubmaterials[8]: 50 % → 30 km × 1.8 t/m³ × 0.5
Transport zu einem anderen Bauperimeter	10.8 tkm		Distanz zu einem anderen Bauperimeter[8]: 20 km [22] Anteil des Aushubmaterials[8]: 30 % → 20 km × 1.8 t/m³ × 0.3
Transport zum Zwischenlager	0.7 tkm		Distanz zum Zwischenlager[8] 2 km (Hin- und Rücktransport) Anteil des Aushubmaterials[8]: 20 % → 2 km × 1.8 t/m³ × 0.2

[8] Annahme der UTech basierend auf Herstellerangaben.

Tabelle 3-9 zeigt die Entsorgung bzw. Verwertung von Flüssigboden am Ende seiner Lebensdauer. In der vorliegenden Studie wird nur die Entsorgung von 50% des rückgebauten Flüssigbodens auf einer Deponie Typ B modelliert. Die Verwertung der verbleibenden 50 % wird gemäss Cut-Off-Prinzip nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-9: Sachbilanz – Entsorgung vom Flüssigboden (C3, C4).

Technische Vordergrunddaten		**Hintergrundprozess Umweltdatenbank**	**Herleitung / Bemerkung**
Parameter	**Menge/FU**		
Entsorgung des Bodenmaterials	0.9 t	Disposal, inert waste, 5% water, to construction waste landfill {CH} U	Ablagerung von 50 % des rückgebauten Verfüllmaterials[8]
	0.54 t	-	Kein Datensatz, da 30 % des Aushubs auf einem externen Bauperimeter verwertet werden[8].
	0.36 t	-	Kein Datensatz, da 20 % des Aushubs direkt vor Ort verwertet werden[8].

3.2.4 Sensitivitätsanalysen

Zur Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse werden in der vorliegenden Studie Sensitivitätsanalysen für zentrale Annahmen durchgeführt.

Variation des Zementanteils innerhalb der berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen

Die in der Studie verwendete Flüssigbodenrezeptur basiert auf dem Mittelwert aus zwölf praxisüblichen Rezepturen. Da sich diese Rezepturen unter anderem im Zementgehalt unterscheiden, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss dieser Bandbreite auf die Ergebnisse der Ökobilanz zu untersuchen. Hierzu wird die durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur mit zwei ausgewählten Rezepturen verglichen, welche innerhalb der zwölf erhobenen Rezepturen den tiefsten (Rezeptur 8) beziehungsweise den höchsten Zementanteil (Rezeptur 9) aufweisen (siehe Kapitel 3.1.1).

Betrachtet werden folgende Szenarien:

- **Baseline**: Durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur (Mittelwert aus 12 Rezepturen)
- **Sensitivität 1**: Rezeptur mit dem tiefsten Zementanteil innerhalb der 12 Rezepturen
- **Sensitivität 2**: Rezeptur mit dem höchsten Zementanteil innerhalb der 12 Rezepturen

Verwertung des bei der Flüssigbodenproduktion entstehenden Siebrückstands

Bei der Aufbereitung des Aushubmaterials in der Flüssigbodenproduktion fällt ein Siebrückstand an. Gemäss Expertengesprächen mit Flüssigbodenherstellern besteht dieser überwiegend aus groben Kiespartikeln und Steinen, welche üblicherweise in der Betonherstellung weiterverwendet werden [15]. In der Baseline-Annahme dieser Studie wird davon ausgegangen, dass dieser Materialüberschuss vollständig verwertet wird. Entsprechend werden die damit verbundenen Umweltwirkungen gemäss Cut-Off-Prinzip ausserhalb der Systemgrenze angesetzt.

Da eine alternative Entsorgung dieses Materials nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, wird ergänzend eine Sensitivitätsanalyse für den Fall durchgeführt, dass der Siebrückstand deponiert wird.

- **Baseline:** Überschüssiges Material wird zu 100 % verwertet → keine Umweltwirkungen innerhalb der Systemgrenze
- **Sensitivität 1:** Überschüssiges Material wird zu 50 % verwertet → Umweltwirkungen vom Transport zur Deponie und der Deponie-Prozess selbst
- **Sensitivität 2:** Überschüssiges Material wird zu 0 % verwertet → Umweltwirkungen vom Transport zur Deponie und der Deponie-Prozess selbst

Vorgelagerte Transporte

Gemäss Expertengesprächen ist es technisch möglich, Flüssigboden bis zu einer Fahrzeit von rund 45 Minuten zu transportieren, was je nach Verkehrssituation einer Distanz von etwa 30 bis 40 km entspricht. Gemäss Herstellerangaben wird in der Praxis jedoch auf eine lokale Lieferung fokussiert, da grössere Distanzen aus qualitativen und logistischen Gründen vermieden werden. Typischerweise liegen Baustellen 5 bis 10 km vom Produktionsstandort entfernt, in der Baseline wurde daher eine Transportdistanz von 10 km angesetzt.

Zur Untersuchung des Einflusses längerer Transportdistanzen auf die Ökobilanz der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur werden folgende Szenarien betrachtet:

- **Baseline:** 10 km
- **Sensitivität 1:** 15 km (50 % Erhöhung gegenüber der Baseline)
- **Sensitivität 2:** 20 km (100 % Erhöhung gegenüber der Baseline)
- **Sensitivität 3:** 25 km (150 % Erhöhung gegenüber der Baseline)

Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens

Da bei Rückbau- oder Sanierungsmassnahmen häufig unklar ist, in welchem Umfang das ausgebaute Verfüllmaterial verwertet oder deponiert wird, wird in einer weiteren Sensitivitätsanalyse der Einfluss unterschiedlicher Verwertungsquoten untersucht (Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Übersicht der untersuchten Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens in der Sensitivitätsanalyse.

Szenario	Deponie	Verwertung auf anderen Bauperimetern	Verwertung vor Ort
Sensitivität 1	0 %	60 %	40 %
Sensitivität 2	25 %	45 %	30 %
Baseline	50 %	30 %	20 %
Sensitivität 3	75 %	15 %	10 %
Sensitivität 4	100 %	0 %	0 %

3.3 Wirkungsabschätzung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

Die Wirkungsabschätzung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur (im Folgenden auch «herkömmlicher Flüssigboden» oder «Flüssigboden» genannt), ausgewertet nach GWP, UBP und KEA, ist im Anhang B aufgeführt.

3.4 Ergebnisse der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Ökobilanz für die durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur dargestellt. Die Resultate beziehen sich auf die Umweltwirkungen pro funktionelle Einheit, definiert als ein Kubikmeter Grabenverfüllung mit Flüssigboden. Tabelle 3-11 gibt einen Überblick über die Resultate der drei betrachteten Umweltindikatoren sowie deren Verteilung auf die einzelnen Lebenszyklusphasen.

Tabelle 3-11: Übersicht der Umweltwirkungen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung, aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen.

Umweltindikatoren	Einheit	Herstellung (A1 – A3)	Errichtung (A4 – A5)	Entsorgung (C1 – C4)	Total
GWP	kg CO_2-eq/m³	40.6	3.9	10.1	54.6
UBP	UBP/m³	53’954	7’070	59’563	120’588
KEA (total)	kWh Oil-eq/m³	76.2	17.2	44.4	137.8
KEA (nicht erneuerbar)	kWh Oil-eq/m³	69.4	16.3	42.0	127.6
KEA (erneuerbar)	kWh Oil-eq/m³	6.8	0.9	2.4	10.1

3.4.1 Treibhausgasemissionen

Die gesamten Treibhausgasemissionen betragen 54.6 kg CO_2-eq pro m³ Grabenverfüllung mit Flüssigboden (Abbildung 3-3). Dabei verursacht die Herstellungsphase (A1 – A3) mit 40.6 kg CO_2-eq den grössten Beitrag. Innerhalb dieser Phase ist die Rohstoffbereitstellung (A1) massgebend. Der Zement allein verursacht in A1 31.3 kg CO_2-eq. und damit 96 % der Emissionen dieser Teilphase. Dies ist interessant, da der Zement gemäss der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur nur 2.3 % der Gesamtmasse des Flüssigbodens ausmacht (siehe Kapitel 3.1.1).

Die Errichtungsphase (A4 – A5) fällt mit 3.9 kg CO_2-eq geringer ins Gewicht. Die Entsorgungsphase (C1 – C4) verursacht 10.1 kg CO_2-eq, hauptsächlich aufgrund vom Transport des rückgebauten Flüssigbodens zur Entsorgung bzw. Verwertung.

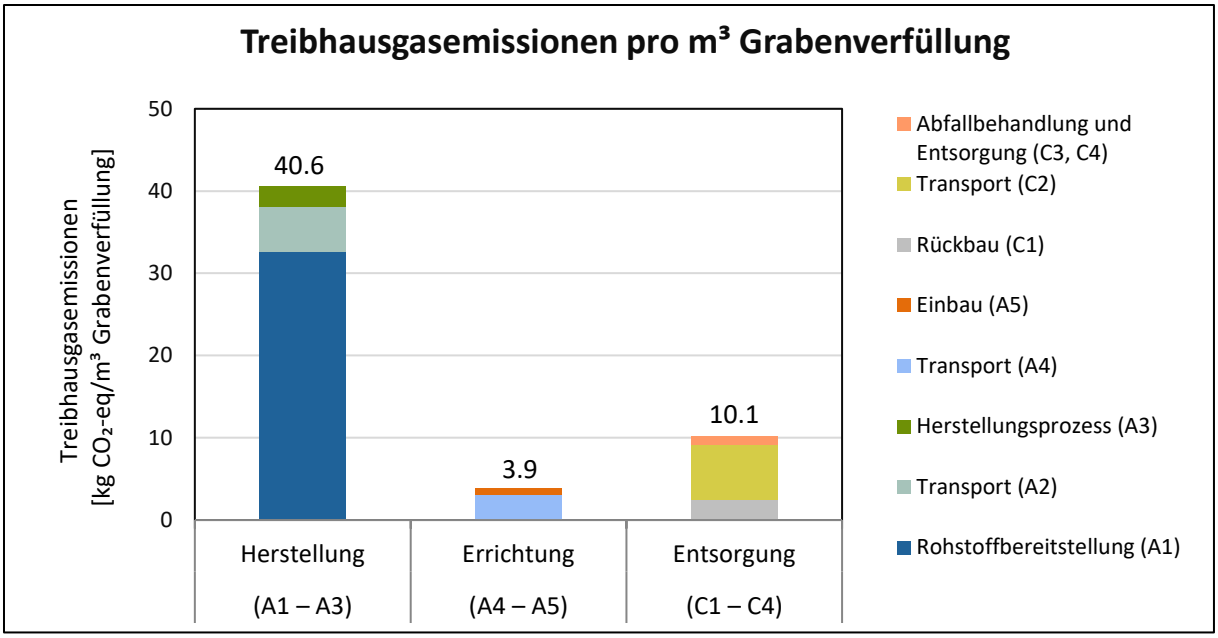


Abbildung 3-3: Gesamte Treibhausgasemissionen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden.

3.4.2 Umweltbelastungspunkte

Die gesamte Umweltbelastung des Flüssigbodens beträgt 120’588 UBP pro m³ Grabenverfüllung (Abbildung 3-4). Im Unterschied zu den Treibhausgasemissionen weist bei den Umweltbelastungspunkten die Entsorgungsphase (C1 – C4) mit 59’563 UBP den grössten Beitrag auf. Dies ist hauptsächlich auf die Abfallbehandlung und Entsorgung jener Hälfte des rückgebauten Flüssigbodens zurückzuführen, die gemäss Modell nicht verwertet, sondern auf einer Deponie Typ B abgelagert wird (siehe dazu Kapitel 3.2.3).

Die Herstellungsphase (A1 – A3) verursacht mit 53’954 UBP ebenfalls einen hohen Anteil an der Gesamtumweltbelastung. Die Errichtungsphase (A4 – A5) trägt mit 7’070 UBP im Vergleich dazu nur gering zur Gesamtumweltbelastung bei.

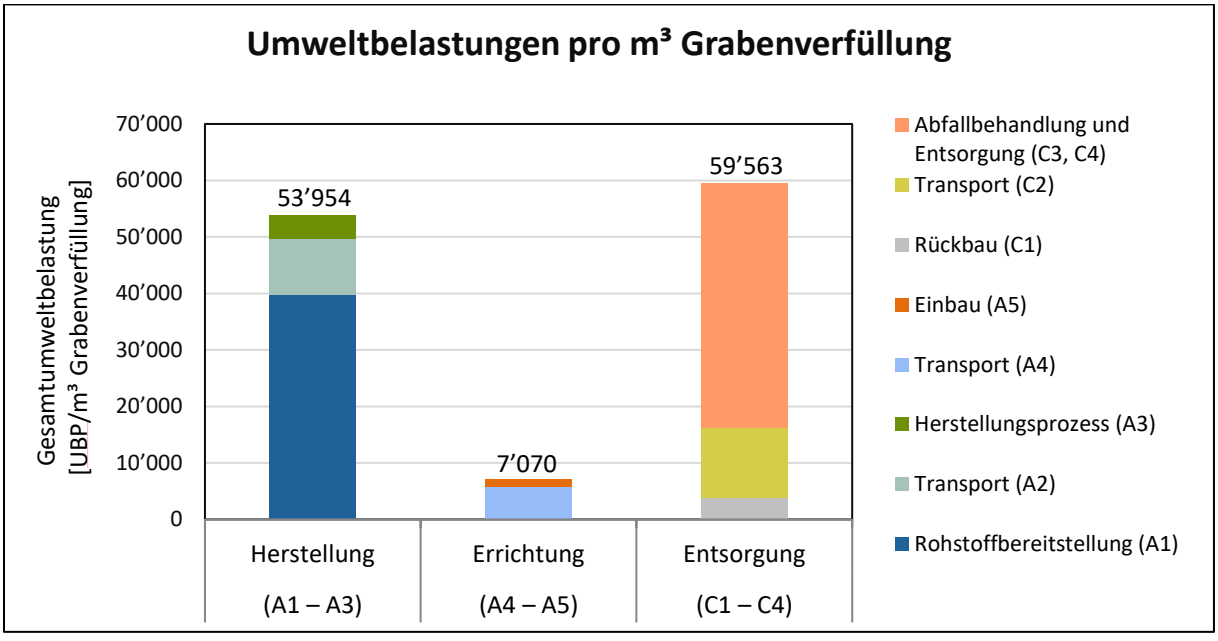


Abbildung 3-4: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden.

3.4.3 Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand beträgt 137.8 kWh oil-eq pro m³ Grabenverfüllung mit Flüssigboden (Abbildung 3-5). Die Herstellungsphase (A1 – A3) liefert den grössten Beitrag mit 76.2 kWh oil-eq, gefolgt von der Entsorgungsphase (C1 – C4) mit 44.4 kWh oil-eq. Die Errichtungsphase (A4 – A5) fällt mit 17.2 kWh oil-eq am wenigsten ins Gewicht. Vom gesamten kumulierten Energieaufwand entfallen 93 % auf nicht erneuerbare und 7 % auf erneuerbare Energiequellen.

Im Anhang C befinden sich die ergänzenden Grafiken zum erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieaufwand (siehe Abbildung 0-3 und Abbildung 0-4).

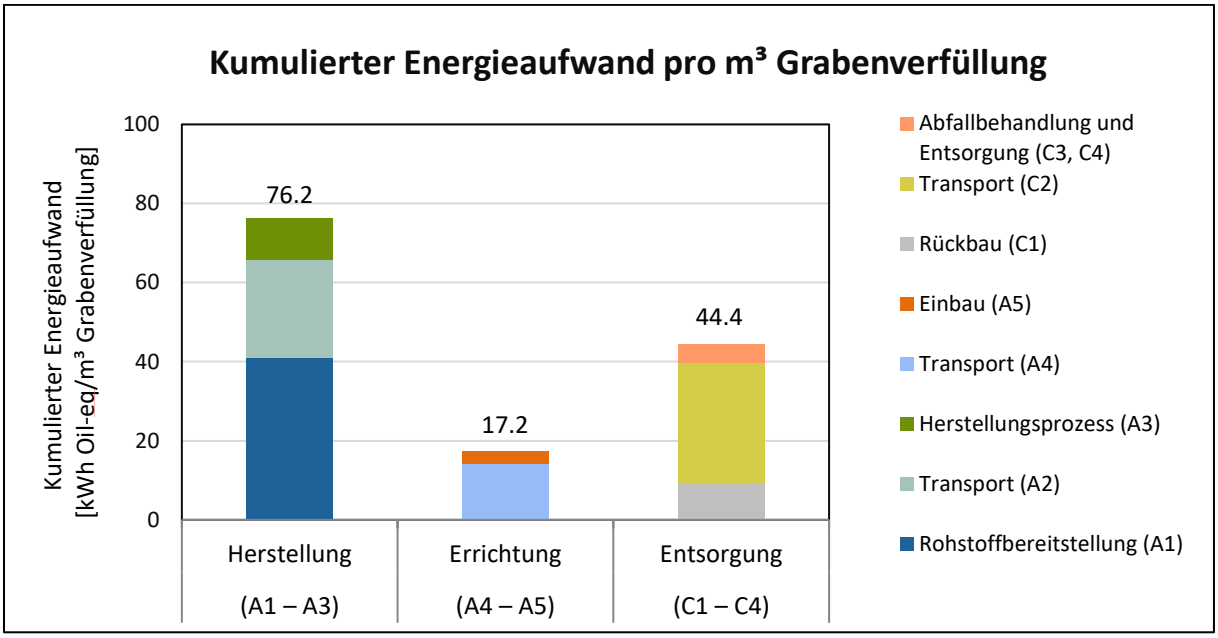


Abbildung 3-5: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden.

3.5 Interpretation

Die Ergebnisse der Ökobilanz der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur zeigen, dass die Umweltwirkungen je nach Umweltindikator unterschiedlich über die Lebenszyklusphasen verteilt sind. Während bei den Treibhausgasemissionen und beim kumulierten Energieaufwand die Herstellungsphase (A1 – A3) den grössten Anteil aufweist, entfällt bei den Umweltbelastungspunkten der grösste Anteil auf die Entsorgungsphase (C1 – C4). Dies ist vor allem auf die Abfallbehandlung und Entsorgung jener Hälfte des Flüssigbodens zurückzuführen, die am Ende der Lebensdauer auf einer Deponie Typ B abgelagert wird, während die andere Hälfte verwertet wird. Bei der UBP-Methode fällt die Deponierung stärker ins Gewicht als beim Treibhauspotenzial, da neben den Treibhausgasemissionen auch weitere Umweltaspekte wie der beanspruchte Deponieraum bewertet werden. Im verwendeten Deponiedatensatz wird die abgelagerte Abfallmasse entsprechend berücksichtigt, was den hohen Beitrag der Entsorgungsphase zu den Umweltbelastungspunkten erklärt.

Auffällig ist zudem, dass in allen Umweltindikatoren die Rohstoffbereitstellung einen grossen Anteil an den Umweltwirkungen ausmacht. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurde für die Herstellungsphase (A1 – A3) eine Hotspot-Analyse durchgeführt. Der Grund liegt darin, dass diese Phase den zentralen Hebel für eine ökologische Optimierung des Flüssigbodens darstellt. Während die Entsorgungsphase stark von projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängt (z. B. effektive Verwertungswege, Transportdistanzen, regionale Deponiestrukturen oder zukünftige Rückbaupraktiken) und somit nicht immer durch die Produktgestaltung beeinflusst werden kann, ist die Zusammensetzung der Rezeptur direkt steuerbar.

Abbildung 3-6 zeigt die Hotspot-Analyse der Herstellungsphase für die Umweltindikatoren Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte und kumulierter Energieaufwand. In allen drei Kategorien dominiert der Zementanteil. Der entscheidende Ansatzpunkt zur weiteren Reduktion der Umweltwirkungen von Flüssigboden liegt somit in der Reduktion oder Substitution des Zementanteils.

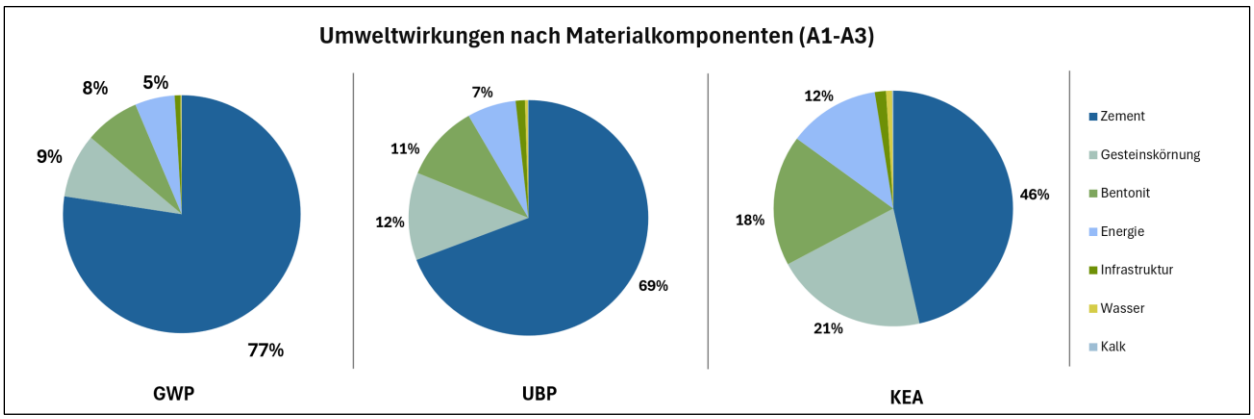


Abbildung 3-6: Hotspot-Analyse: Umweltwirkungen der Referenzrezeptur nach Materialkomponenten (A1 – A3).

3.5.1 Verbesserte Flüssigbodenvariante

Die Hotspot-Analyse der Herstellungsphase hat gezeigt, dass der Zementeinsatz den grössten Beitrag zu den Umweltwirkungen des Flüssigbodens leistet. In der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur wurde hierfür Zement der Kategorie CEM I 42.5 R modelliert (siehe Kapitel 3.1.1). Da sich somit der grösste ökologische Hebel in der Wahl des Bindemittels befindet, wird hier untersucht, wie sich der Einsatz eines klinkerreduzierten Zements auf die Ökobilanz auswirkt. Dazu wurde eine verbesserte Flüssigbodenvariante berechnet, bei welcher die Rezeptur, Systemgrenzen und Modellannahmen vollständig identisch zur durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur bleiben. Einzig der Datensatz für den Zement wurde angepasst: Statt des Datensatzes «Portland cement, strength class Z 42.5, at plant {CH} U» wurde «CEM III, A cement, at plant {CH} U» verwendet.

Abbildung 3-7 zeigt den Vergleich der Treibhausgasemissionen zwischen dem herkömmlichen Flüssigboden mit CEM I 42.5 R und der verbesserten Variante mit CEM III A.

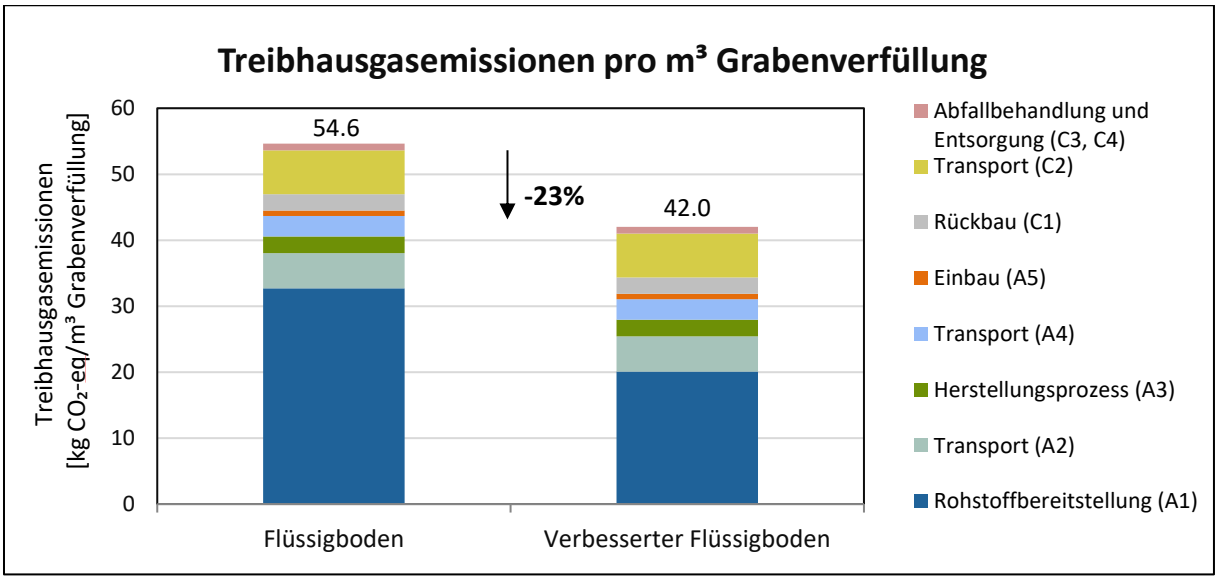


Abbildung 3-7: Treibhausgasemissionen von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A).

Durch den Einsatz vom klinkerreduzierten Zement reduzieren sich die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus um 23 %. Bei den Umweltbelastungspunkten zeigt sich eine Reduktion von 11 % (siehe Abbildung 0-5 im Anhang C) und beim kumulierten Energieaufwand eine Reduktion von 1 % (siehe Abbildung 0-6 bis Abbildung 0-8 im Anhang C).

Der bezüglich seiner Umweltwirkung verbesserte Flüssigboden auf Basis von CEM III A wird in den nachfolgenden Analysen dieser Studie als verbesserte Flüssigbodenvariante verwendet. Weitere emissionsärmere Bindemittel, beziehungsweise alternative Bindemittelsysteme, sind grundsätzlich verfügbar und werden in Kapitel 5.6.1 qualitativ diskutiert. Eine weitere Optimierung der hier betrachteten verbesserten Variante ist somit nicht auszuschliessen. Eine zusätzliche Verbesserung kann zudem erreicht werden, wenn der Zementanteil im Flüssigboden reduziert wird.

3.5.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen, wie stark die Ökobilanz des Flüssigbodens auf zentrale Annahmen reagiert und wie robust die Baseline-Ergebnisse gegenüber veränderten Randbedingungen sind.

Variation des Zementanteils innerhalb der berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen

Die berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen unterscheiden sich unter anderem im Zementgehalt (siehe Kapitel 3.2.4). Tabelle 3-12 zeigt die absoluten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Variation des Zementanteils. Abbildung 3-8 stellt die Abweichungen der beiden Vergleichsrezepturen relativ zur durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur dar.

Tabelle 3-12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Variation des Zementanteils innerhalb der 12 berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen.

Sensitivitätsanalyse	Zementanteil [%]	GWP [kg CO_2-eq/m^3]	UBP [UBP/m^3]	KEA (total) [kWh Oil-eq/m^3]
Mittlere Flüssigbodenrezeptur (Baseline)	2.3	55	120’588	138
Flüssigbodenrezeptur mit dem tiefsten Zementanteil	1.3	42	106’059	125
Flüssigbodenrezeptur mit dem höchsten Zementanteil	3.3	67	134’838	150

Die Ergebnisse zeigen: Wird eine Rezeptur mit tieferem Zementanteil verwendet, reduzieren sich die Treibhausgasemissionen deutlich. Umgekehrt führt eine Rezeptur mit höherem Zementanteil zu entsprechend höheren Emissionen.

Da für die durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur ein Mittelwert aus mehreren marktüblichen Rezepturen verwendet wurde, können die Ergebnisse als robust beurteilt werden. Sie bilden eine praxisnahe Bandbreite des aktuellen Marktes ab. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt dennoch, dass der Zementanteil beziehungsweise das Bindemittel einen zentralen Einflussparameter für die Umweltwirkungen von Flüssigboden darstellt.

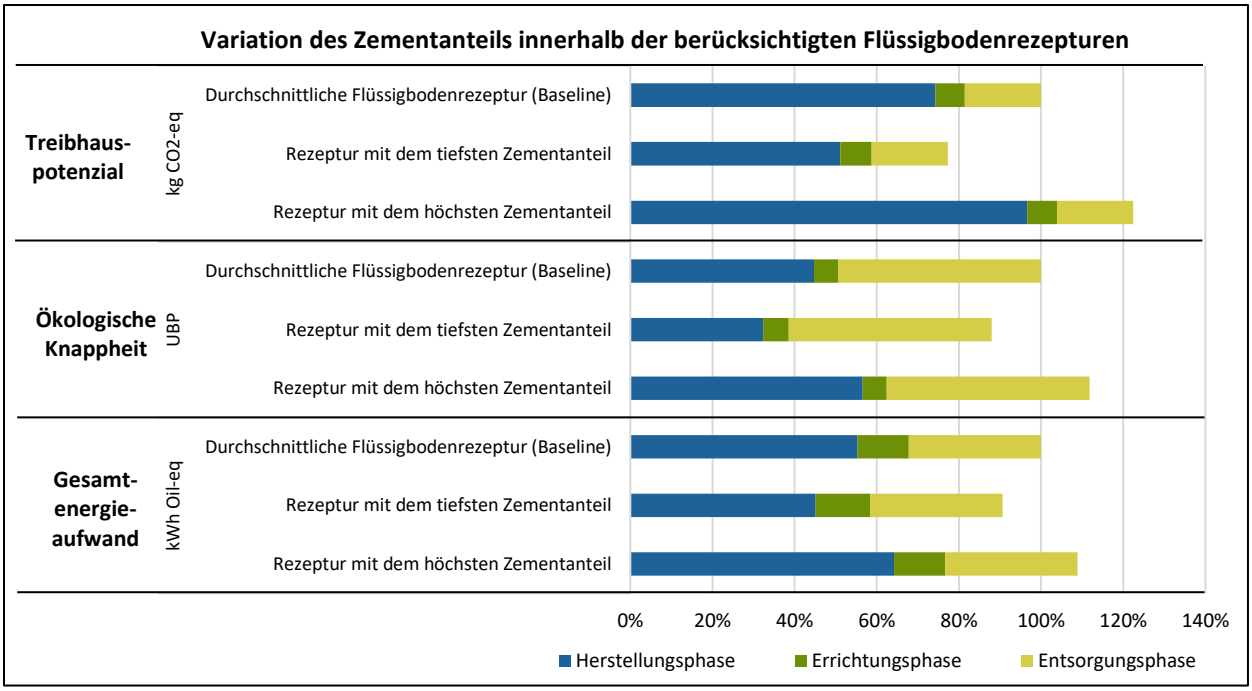


Abbildung 3-8: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse gegenüber der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur bei unterschiedlichem Zementanteil.

Verwertung des bei der Flüssigbodenproduktion entstehenden Siebrückstands

Die Verwertung des bei der Flüssigbodenproduktion anfallenden Siebrückstands kann je nach Projekt unterschiedlich ausfallen (siehe Kapitel 3.2.4). Tabelle 3-13 zeigt die absoluten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dazu. Abbildung 3-9 stellt die Abweichungen der Vergleichsszenarien relativ zur Baseline dar.

Tabelle 3-13: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Verwertung des Siebrückstands während der Flüssigbodenproduktion.

Sensitivitätsanalyse	GWP [kg CO_2-eq/m^3]	UBP [UBP/m^3]	KEA (total) [kWh Oil-eq/m^3]
100 % Verwertung (Baseline)	55	120’588	138
50 % Verwertung	56	133’582	144
0 % Verwertung	57	146’576	151

Abbildung 3-9 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Entsorgung des Siebrückstands auf die Ökobilanzergebnisse. Wird der Siebrückstand vollständig deponiert statt vollständig verwertet, steigen die Treibhausgasemissionen um 4 %, die ökologische Knappheit (UBP) um 13 % und der Gesamtenergieaufwands um 5 %. Die veränderten Verwertungsmassnahmen wirken sich zwar auf die Resultate aus, die Abweichungen bleiben jedoch im Verhältnis zur gesamten Modellunsicherheit klein. Die Verwertung beziehungsweise Deponierung des Siebrückstands stellt somit keinen kritischen Einflussparameter für die Ergebnisse dar.

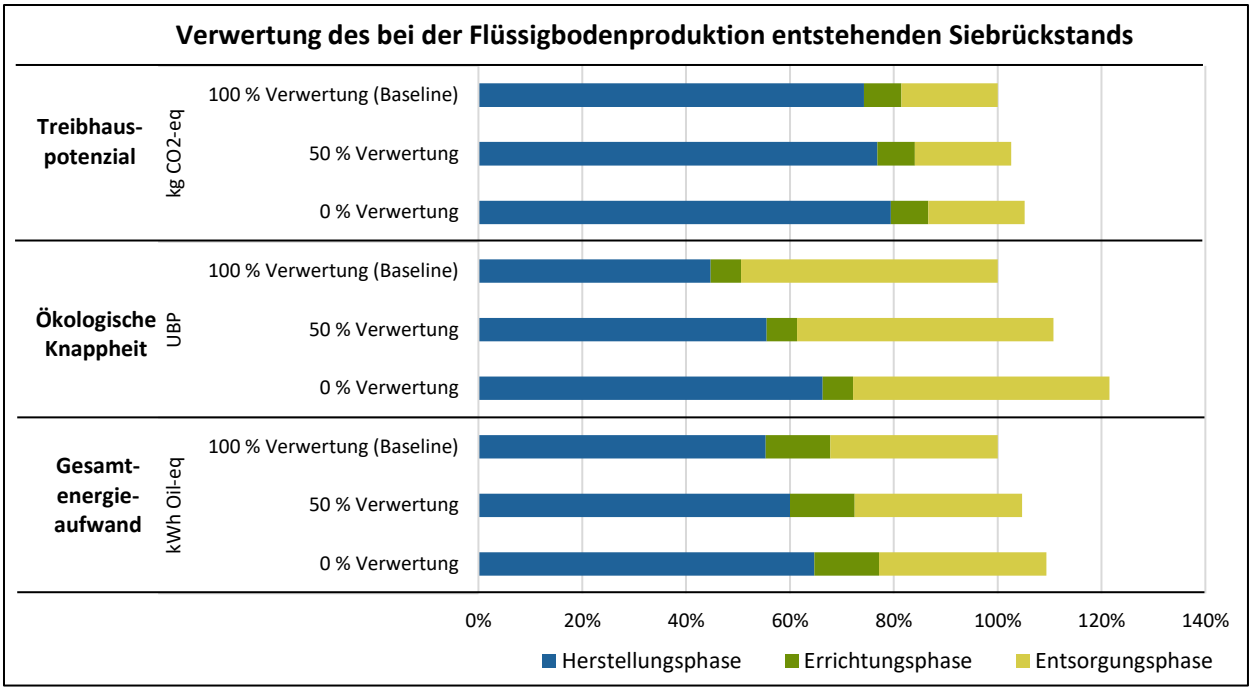


Abbildung 3-9: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlicher Verwertung des bei der Flüssigbodenproduktion entstehenden Siebrückstands gegenüber der Baseline.

Vorgelagerte Transporte

Die Distanz zwischen Baustelle und Flüssigbodenanlage kann je nach Standort variieren (siehe Kapitel 3.2.4). Tabelle 3-14 zeigt die absoluten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Abbildung 3-10 stellt die Abweichungen der Vergleichsszenarien relativ zur Baseline dar.

Tabelle 3-14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu vorgelagerten Transportdistanzen zwischen Baustelle und Flüssigbodenanlage.

Sensitivitätsanalyse	GWP [kg CO_2-eq/m³]	UBP [UBP/m³]	KEA (total) [kWh Oil-eq/m³]
10 km (Baseline)	55	120’588	138
15 km	58	126’404	152
20 km	61	132’221	166
25 km	64	138’037	180

Abbildung 3-10 zeigt den Einfluss der Erhöhung der Transportdistanz zwischen Flüssigbodenanlage und Baustelle. Dabei ist jeweils der Hin- und Rücktransport berücksichtigt. Im Vergleich zur Baseline von 10 km führt eine Erhöhung der Transportdistanz auf 25 km zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen um 14 %, der ökologischen Knappheit (UBP) um 9 % sowie des Gesamtenergieaufwands um 17 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass vorgelagerte Transporte einen relevanten Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz des Flüssigbodens haben können. Die in der Baseline angesetzte Distanz von 10 km basiert auf Herstellerangaben und repräsentiert einen typischen Praxiswert. Gleichzeitig sind längere Transportdistanzen technisch möglich und können je nach Standort der Baustelle und Verfügbarkeit geeigneter Flüssigbodenanlagen ebenfalls auftreten. In der Praxis werden aus logistischen Gründen in der Regel dennoch kurze Transportdistanzen angestrebt.

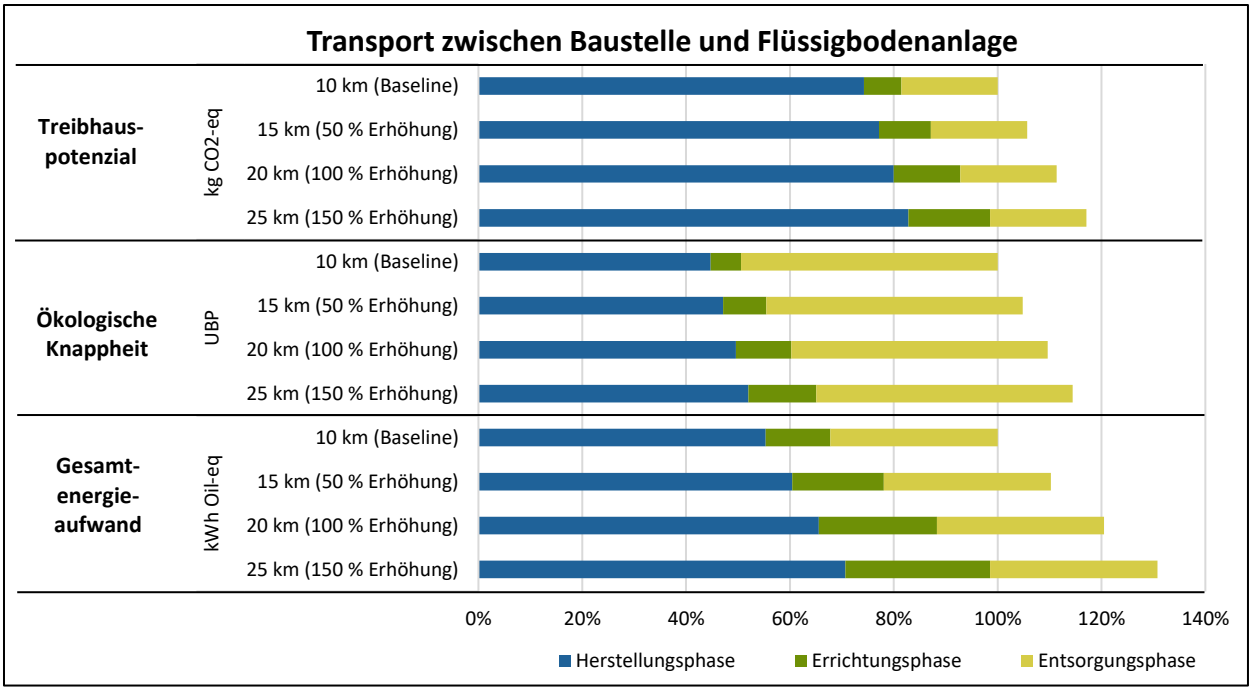


Abbildung 3-10: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlichen Transportdistanzen zwischen Baustelle und Flüssigbodenanlage gegenüber der Baseline.

Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens

Die Verwertungs- und Deponieanteile des rückgebauten Flüssigbodens können je nach Projekt unterschiedlich ausfallen (siehe Kapitel 3.2.4). Tabelle 3-15 zeigt die absoluten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Abbildung 3-11 stellt die Abweichungen der einzelnen Szenarien relativ zur Baseline mit 50 % Verwertung dar.

Tabelle 3-15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu unterschiedlichen Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens.

Sensitivitätsanalyse	GWP [kg CO_2-eq/m³]	UBP [UBP/m³]	KEA (total) [kWh Oil-eq/m³]
0 % Verwertung	58	168’849	155
25 % Verwertung	56	144’722	146
50 % Verwertung (Baseline)	55	120’588	138
75 % Verwertung	53	96’467	129
100 % Verwertung	51	72’340	121

Abbildung 3-11 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens auf die Ökobilanzergebnisse. Im Vergleich zur Baseline mit 50 % Verwertung führt eine vollständige Deponierung (0 % Verwertung) zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen um 5 %, der ökologischen Knappheit (UBP) um 24 % und des Gesamtenergieaufwands um 7 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Entsorgungsstrategie für den Flüssigboden einen relevanten Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse haben kann, insbesondere in Bezug auf die ökologische Knappheit.

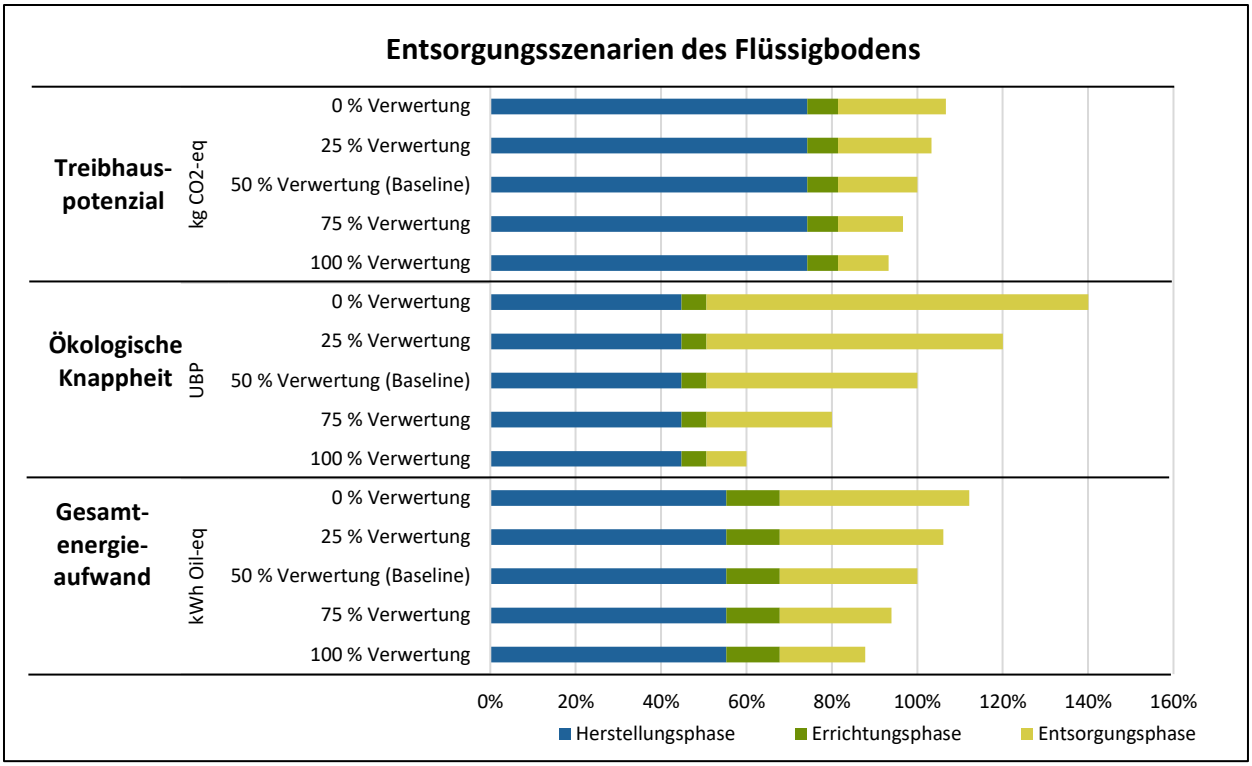


Abbildung 3-11: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlichen Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens gegenüber der Baseline.

4 Ökobilanz von Flüssigboden mit Pflanzenkohle

Pflanzenkohle kann Flüssigboden ökologisch ergänzen, da sie biogenen Kohlenstoff enthält, der bei geeigneter Anwendung langfristig im Material gebunden bleiben kann. Dadurch besteht das Potenzial, die Klimawirkung vom Flüssigboden zu verbessern. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich unterschiedliche Pflanzenkohleanteile in der Flüssigbodenrezeptur auf die Umweltwirkungen auswirken und wie es um die technische Machbarkeit und Skalierbarkeit steht.

4.1 Definition der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle

Für die Analyse der Potenziale von Pflanzenkohle im Flüssigboden wurden drei Szenarien definiert:

- Flüssigboden ohne Pflanzenkohle (durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur gemäss Kapitel 3; im Folgenden: Flüssigboden)
- Flüssigboden mit moderatem Pflanzenkohleanteil (im Folgenden: Flüssigboden mit PK)
- Flüssigboden mit maximal technisch realisierbarem Pflanzenkohleanteil (im Folgenden: Flüssigboden mit max. PK)

Alle drei Szenarien wurden jeweils einmal mit Zement CEM I 42.5 R und einmal mit klinkerreduziertem Zement CEM III A modelliert, um sowohl den Einfluss des Pflanzenkohleanteils als auch der Zementsorte auf die Umweltwirkungen zu untersuchen.

Die zugrunde liegenden Flüssigbodenrezepturen basieren auf gängigen Zusammensetzungen, wie sie heute bereits vereinzelt im Schweizer Tiefbau für Flüssigboden eingesetzt werden. Tabelle 4-1 zeigt die verwendeten Rezepturen.

Tabelle 4-1: Rezepturen der Flüssigbodenvarianten mit unterschiedlichem Pflanzenkohleanteil.

Komponenten	**Flüssigboden [kg/m³]**	**Flüssigboden mit PK [kg/m³]**	**Flüssigboden mit max. PK [kg/m³]**
Aushub	1’300	1’332	1’345
Zement (CEM I 42.5 R bzw. CEM III A)	42	27	26
Bentonit	32	21	20
Wasser	426	316	312
Kalk	1	0	0
Pflanzenkohle	0	16	45
Summe	**1’801**	**1’713**	**1’749**

Das Ökobilanzmodell für die Varianten mit Pflanzenkohle entspricht dem Modell der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur aus Kapitel 3.1.1. Anpassungen ergeben sich vor allem in den Modulen A1, A2 und A4, da sich die eingesetzten Materialien, ihre Mengen sowie die transportierten Massen gegenüber der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur verändern. Die übrigen Modellannahmen und Prozessschritte wurden unverändert übernommen.

4.2 Modellierung der Kohlenstoffspeicherung

Zur Modellierung der Kohlenstoffspeicherung wurde zuerst die Umweltwirkung der Pflanzenkohleherstellung bilanziert. Hierfür wurde der Datensatz «Biochar, from spruce wood pyrolysis {CH} U» verwendet [21]. In diesem Prozess wird die Pflanzenkohle auf Basis eines langsamen Pyrolyseverfahrens modelliert, bei dem Fichtenholz unter Sauerstoffausschluss thermisch zersetzt wird. Dabei entstehen Pflanzenkohle als Hauptprodukt sowie Pyrolysegas und Bioöl als Nebenprodukte. Nebenprodukte werden nach dem Cut-off-Ansatz behandelt. Tabelle 4-2 zeigt die Umweltwirkungen der Herstellung von 1 kg Pflanzenkohle.

Tabelle 4-2: Umweltwirkungen der Pflanzenkohleherstellung [21].

Umweltindikatoren	GWP	UBP	KEA (total)	KEA (nicht erneuerbar)	KEA (erneuerbar)
Einheit	[kg CO_2-eq/kg Pflanzenkohle]	[UBP/kg Pflanzenkohle]	[kWh Oil-eq/kg Pflanzenkohle]	[kWh Oil-eq/kg Pflanzenkohle]	[kWh Oil-eq/kg Pflanzenkohle]
Wert	0.271	550	10.62	1.5	9.27

Gemäss dem Faktenblatt «Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft» liegt der Kohlenstoffgehalt von Pflanzenkohle aus holzigen Ausgangsmaterialien zwischen 75 – 95 % [30]. In der vorliegenden Studie wurde ein Kohlenstoffgehalt von 85 % angenommen. Dies entspricht einer Kohlenstoffspeicherung von 0.85 kg C pro kg Pflanzenkohle. Über das Verhältnis der molaren Massen von Kohlenstoff und Kohlendioxid wurde dieser Wert in CO_2-Äquivalente umgerechnet. Daraus ergibt sich eine in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung von 3.12 kg CO_2 pro kg Pflanzenkohle. Gemäss «Ökofaktoren Schweiz 2021» entspricht 1 g CO_2-eq einem Umweltbelastungspunkt (UBP) [10]. Daraus resultiert eine Verminderung der Umweltbelastung um 3'117 UBP pro kg Pflanzenkohle. Eine entsprechende Abbildung im kumulierten Energieaufwand (KEA) ist nicht möglich, da es sich bei der Kohlenstoffspeicherung um eine stoffliche Bindung und nicht um einen Energiefluss handelt.

Ein Vergleich mit weiteren Ökobilanzstudien zeigt, dass die ausgewiesene, in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung von Pflanzenkohle im Bereich von -1.8 bis -4.8 kg CO_2-eq pro kg Pflanzenkohle liegen ([31], [32], [33]). Der hier berechnete Wert von -3.12 kg CO_2 pro kg Pflanzenkohle ist daher als plausibel einzustufen.

Für die vorliegende Studie wird angenommen, dass die eingesetzte Pflanzenkohle aus unverschmutzten biogenen Materialien hergestellt wurde. Zusätzlich wird angenommen, dass der biogene Kohlenstoff in der Pflanzenkohle über die Lebensdauer des Flüssigbodens stabil bleibt und auch beim Rückbau der Grabenverfüllung nicht wieder freigesetzt wird.

Die für die Modellierung verwendeten Umweltindikatoren umfassen Treibhausgasemissionen (GWP), Umweltbelastungspunkte (UBP) und den kumulierten Energieaufwand (KEA), erneuerbar und nicht erneuerbar, pro kg Pflanzenkohle. Der biogene Kohlenstoffanteil der Pflanzenkohle wird dabei vollständig bilanziert und als langfristig gebunden angenommen[9]. Der Effekt der Kohlenstoffspeicherung wird separat ausgewiesen und nicht in das Gesamtergebnis des Flüssigbodens eingerechnet.

[9] Es ist zu beachten, dass die Kohlenstoffspeicherung erst im eingebauten Zustand berücksichtigt werden kann. Während der Pflanzenkohleproduktion werden keine negativen Emissionen angerechnet, der Effekt entsteht erst durch die dauerhafte Bindung des biogenen Kohlenstoffs im eingebauten Flüssigboden über den gesamten Lebenszyklus.

Abbildung 4-1 zeigt die Treibhausgasemissionen der Herstellung von Pflanzenkohle sowie die separat ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung. Das Holz stellt dabei den dominierenden Beitrag zu den Treibhausgasemissionen dar. Darin enthalten sind der Transport des Holzes zur Anlage sowie dessen Vorbehandlung durch Hacken und Trocknen.

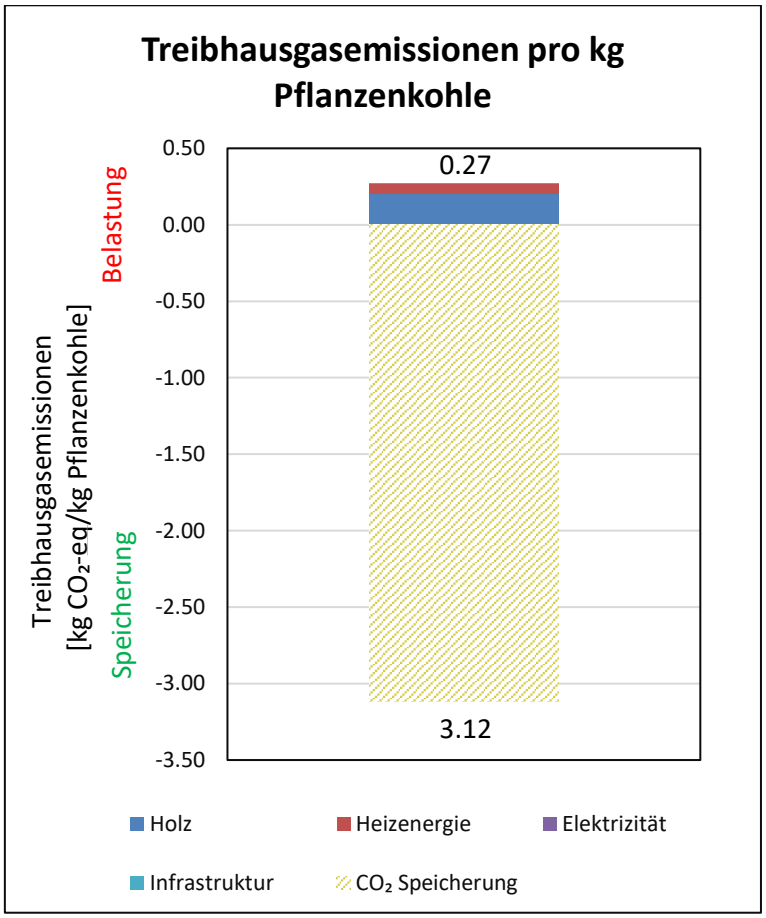


Abbildung 4-1: Treibhausgasemissionen der Pflanzenkohleherstellung und separat ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung (pro kg Pflanzenkohle).

Im Anhang C befinden sich die ergänzenden Grafiken zur Gesamtumweltbelastung und zum Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (siehe Abbildung 0-9 bis Abbildung 0-12).

Exkurs: Pflanzenkohle als Negativemissionstechnologie (NET)

Pflanzenkohle wird als potenzielle Negativemissionstechnologie (NET) betrachtet, da bei der Pyrolyse biogener Reststoffe atmosphärischer Kohlenstoff in eine stabile, feste Form überführt und langfristig gebunden wird. Voraussetzung für die Anerkennung als NET ist, dass die CO_2-Entnahme quantifizierbar und dauerhaft erfolgt.

Gemäss der Verordnung über die Reduktion der CO_2-Emissionen (CO_2-Verordnung, SR 641.711) müssen CO_2-Entnahmetechnologien Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Monitoring und Lebenszyklusbilanzierung erfüllen. Für die Anerkennung von Senkenleistungen wird eine Mindestdauer der Speicherung von 30 Jahren vorausgesetzt [34].

In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass der in der Pflanzenkohle enthaltene biogene Kohlenstoff über die gesamte Nutzungsdauer der Grabenverfüllung (100 Jahre) stabil gebunden bleibt und keine vorzeitigen Eingriffe erfolgen. Unter dieser Annahme wäre die geforderte Mindestdauer grund-

sätzlich erfüllt. Sollten jedoch innerhalb dieses Zeitraums substanzielle Eingriffe in die Infrastruktur erfolgen, wäre die Dauerhaftigkeit projektspezifisch zu prüfen. Für eine formelle Anerkennung als Negativemission wäre in jedem Fall eine separate projektbezogene Bewertung gemäss CO_2-Verordnung erforderlich. Die in dieser Studie ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung ist daher unter Berücksichtigung der Mindestdauer der Speicherung von 30 Jahren als ökobilanzielle Senkenleistung zu verstehen.

4.3 Ergebnisse der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle dargestellt. Die Resultate beziehen sich auf die Umweltwirkungen pro funktionelle Einheit, definiert als ein Kubikmeter Grabenverfüllung mit Flüssigboden. Tabelle 4-3 gibt einen Überblick über die Resultate der drei betrachteten Umweltindikatoren.

Tabelle 4-3: Übersicht der Umweltwirkungen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m³ Grabenverfüllung.

Flüssigbodenvariante	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	kg CO_2-eq/m³	UBP/m³	kWh Oil-eq/m³	kWh Oil-eq/m³	kWh Oil-eq/m³
Flüssigboden	54.62	120’588	137.76	127.64	10.12
Verbesserter Flüssigboden	42.01	107’459	137.24	126.57	10.68
Flüssigboden mit PK	46.84	114’189	290.05	133.52	156.53
Verbesserter Flüssigboden mit PK	38.65	105’676	289.78	132.87	156.91
Flüssigboden mit max. PK	54.22	129’638	597.87	172.68	425.18
Verbesserter Flüssigboden mit max. PK	46.28	121’387	597.61	172.05	425.55

4.3.1 Treibhausgasemissionen

Abbildung 4-2 zeigt den Vergleich der Treibhausgasemissionen der sechs betrachteten Flüssigbodenvarianten. Die Treibhausgasemissionen des Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil betragen 46.8 kg CO_2-eq/m³, jene des verbesserten Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil 38.7 kg CO_2-eq/m³. Dies entspricht einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 17 %. Für die Varianten mit maximalem Pflanzenkohleanteil ergeben sich Werte von 54.2 kg CO_2-eq/m³ beziehungsweise 46.3 kg CO_2-eq/m³, was einer Reduktion von 15 % entspricht. Eine Nettoverrechnung der CO_2-Speicherung der eingesetzten Pflanzenkohle ist in diesen Werten nicht enthalten, die CO_2-Speicherung wird in der Abbildung separat ausgewiesen.

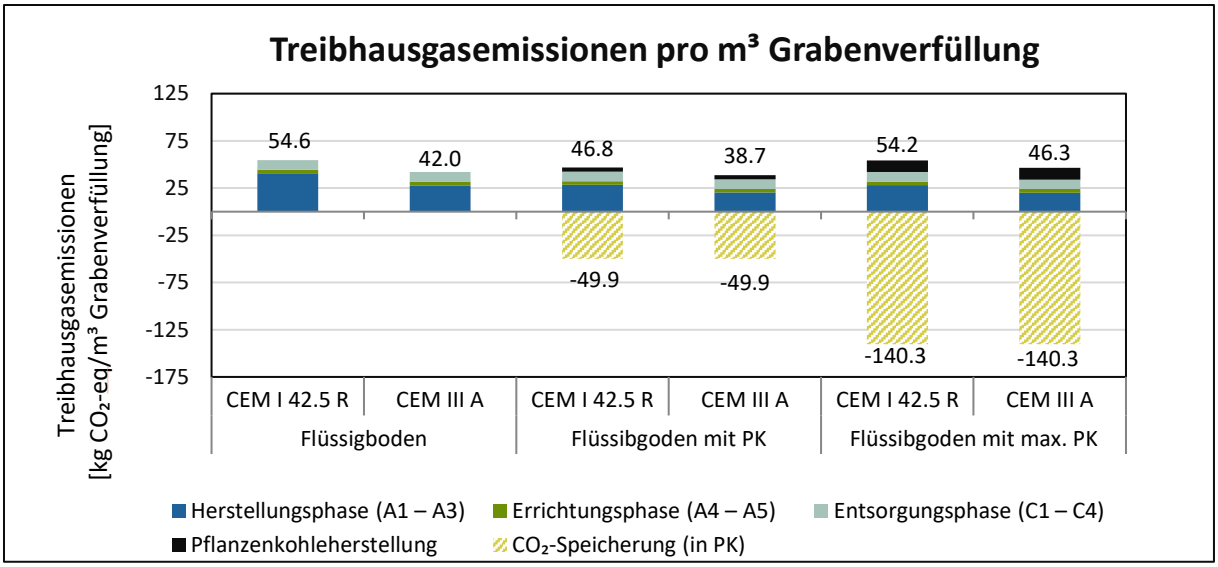


Abbildung 4-2: Gesamte Treibhausgasemissionen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). Die in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung der Pflanzenkohle ist separat ausgewiesen.

Obwohl bei den Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle die Emissionen aus Zement und Bentonit infolge der reduzierten Einsatzmengen leicht sinken, fallen zusätzliche Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der Pflanzenkohle an. Die Prozessschritte über den Lebenszyklus (Herstellung A3, Transport zur Baustelle A4, Einbau A5 sowie End-of-Life C1 – C4) bleiben bei allen Varianten identisch. Die Unterschiede zwischen den Varianten ergeben sich damit primär aus den angepassten Rohstoffmengen in den Rezepturen und aus der zusätzlichen Pflanzenkohleherstellung. Durch den Einsatz von CEM III A anstelle von CEM I können die Treibhausgasemissionen in allen drei Rezepturvarianten zusätzlich reduziert werden.

4.3.2 Umweltbelastungspunkte

Die Gesamtumweltbelastungen der sechs betrachteten Verfüllvarianten folgen dem gleichen Trend wie die Treibhausgasemissionen (Abbildung 4-3). Die Gesamtumweltbelastung des Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil beträgt 114’189 UBP/m³, jene des verbesserten Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil 105’676 UBP/m³. Dies entspricht einer Reduktion von 7 %. Für die Varianten mit maximalem Pflanzenkohleanteil ergeben sich Werte von 129’638 UBP/m³ beziehungsweise 121’387 UBP/m³, was einer Reduktion von 6 % entspricht. Eine Nettoverrechnung der CO_2-Speicherung der eingesetzten Pflanzenkohle ist in diesen Werten nicht enthalten, die CO_2-Speicherung wird in der Abbildung separat ausgewiesen.

Die Gesamtumweltbelastungen konzentrieren sich, analog zur durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, auf zwei zentrale Hotspots: die Rohstoffbereitstellung (A1) und die Abfallbehandlung und Entsorgung (C3, C4) (siehe Kapitel 3.4.2). Im Modul A1 werden die Umweltbelastungen bei den Pflanzenkohle-Varianten hauptsächlich durch den Zement und die Pflanzenkohle geprägt. Der Beitrag in der Entsorgungsphase ist hauptsächlich auf die Deponierung des nicht verwerteten Flüssigbodens zurückzuführen.

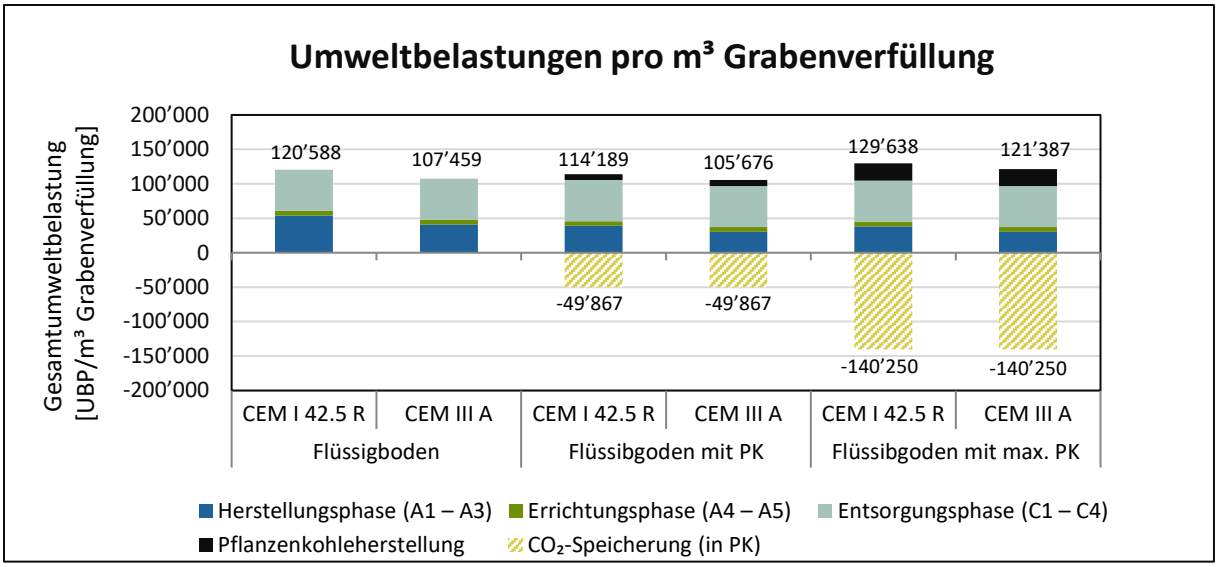


Abbildung 4-3: Gesamte Umweltbelastungen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). Die in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung der Pflanzenkohle ist separat ausgewiesen

4.3.3 Kumulierter Energieaufwand

Abbildung 4-4 zeigt den kumulierten Energieaufwand der sechs betrachteten Flüssigbodenvarianten. Dieser unterscheidet sich deutlich zwischen den Varianten mit und ohne Pflanzenkohle. Der kumulierte Energieaufwand des Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil beträgt 290.0 kWh Oil-eq/m³, jener des verbesserten Flüssigbodens mit moderatem Pflanzenkohleanteil 289.8 kWh Oil-eq/m³. Für die Varianten mit maximalem Pflanzenkohleanteil ergeben sich Werte von 597.9 kWh Oil-eq/m³ beziehungsweise 597.6 kWh Oil-eq/m³.

Hauptgrund für den hohen Energieaufwand in den Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle ist der hohe erneuerbare Energieeinsatz für die Bereitstellung des benötigten Holzes zur Pflanzenkohleherstellung. Beim Flüssigboden mit moderatem Pflanzenkohleanteil entfallen 54 % des kumulierten Energieaufwands auf erneuerbare Energie, Flüssigboden mit maximalem Flüssigbodenanteil 71 %.

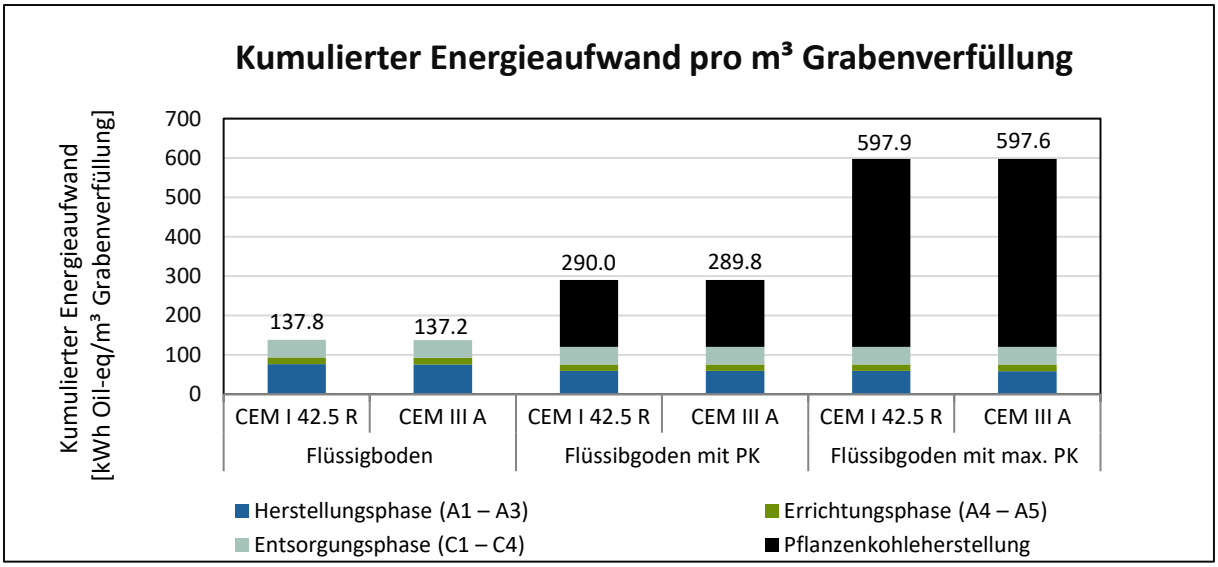


Abbildung 4-4: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle.

Im Anhang C befinden sich die ergänzenden Grafiken zum erneuerbaren und nicht erneuerbarer Energieaufwand (siehe Abbildung 0-13 und Abbildung 0-14).

4.4 Interpretation

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Pflanzenkohle im Flüssigboden aus ökobilanzieller Sicht differenziert zu beurteilen ist. Ohne Anrechnung der biogenen CO_2-Speicherung weist die Variante mit moderatem Pflanzenkohleanteil tiefere Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte auf als der herkömmliche Flüssigboden. Die Variante mit maximalem Pflanzenkohleanteil liegt hingegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie der herkömmliche Flüssigboden. Die Reduktion von Zement- und Bentonitmengen, die durch den Einsatz von Pflanzenkohle ermöglicht wird, wirkt sich emissionsmindernd aus, während die Herstellung der Pflanzenkohle zusätzliche Umweltwirkungen verursacht.

Der kumulierte Energieaufwand ist bei beiden Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle deutlich höher und primär auf den Holzeinsatz für die Pflanzenkohleherstellung zurückzuführen. Der zusätzliche Energiebedarf stammt jedoch überwiegend aus erneuerbaren Quellen.

Wird die CO_2-Speicherung ökobilanziell berücksichtigt, verstärkt sich der Vorteil der Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle in den Umweltindikatoren GWP und UBP deutlich. Die ökologische Gesamtbewertung hängt daher wesentlich von der Gewichtung der betrachteten Umweltindikatoren sowie von der Annahme einer langfristigen Stabilität des gebundenen biogenen Kohlenstoffs ab.

4.5 Technische Machbarkeit von Flüssigboden mit Pflanzenkohle

Herstellerversuche zeigen, dass sich Pflanzenkohle technisch gut in die Flüssigbodenrezeptur integrieren lässt [19]. Die Zugabe von gemahlener Pflanzenkohle wirkt sich positiv auf die Materialeigenschaften aus und kann zu einer Erhöhung der Festigkeit beitragen. Dadurch ist eine deutliche Reduktion des Zement- und Bentonitanteils möglich, ohne die bautechnische Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle erfüllen die für Flüssigboden typischen Anforderungen an Tragfähigkeit, Verarbeitbarkeit, Selbstverdichtung und Dauerhaftigkeit [19].

Die technische Eignung der Pflanzenkohle im Flüssigboden hängt auch von ihrer Qualität ab. Massgebend sind insbesondere der Ausgangsstoff, die Pyrolysetemperatur sowie die Prozessführung, da diese Parameter die Porosität, Reaktivität und Wasseraufnahme beeinflussen. Für die in diesem Kapitel analysierten Szenarien wird Pflanzenkohle aus forstwirtschaftlichen Reststoffen verwendet, die mittels Pyrolyse zu Pflanzenkohle verarbeitet werden. Solche holzbasierten Pflanzenkohlen weisen in der Regel eine stabile Struktur, niedrige Schadstoffgehalte und ein günstiges technisches Verhalten auf, was ihre Verwendung im Flüssigboden begünstigt.

Die bestehenden Praxiserfahrungen und Studien zeigen insgesamt, dass der Einsatz von Pflanzenkohle im Flüssigboden technisch machbar ist und die geforderten baulichen Eigenschaften erfüllt. Höhere Pflanzenkohleanteile sind theoretisch möglich, müssen jedoch hinsichtlich Pumpbarkeit, Mischbarkeit und Einbauverhalten weiter untersucht werden.

4.6 Überlegungen zur Systembetrachtung bei Pflanzenkohle

Die Ergebnisse in Kapitel 4.3 zeigen, dass der Einsatz von Pflanzenkohle im Flüssigboden insbesondere dann ein hohes Reduktionspotenzial für Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte aufweisen kann, wenn die CO_2-Speicherung bilanziell berücksichtigt wird. Auch wenn die Kreislauffähigkeit des Flüssigbodens durch die Zugabe von Pflanzenkohle erschwert werden kann (siehe Kapitel 8), ist damit zu rechnen, dass dieses Thema zukünftig an Bedeutung gewinnen wird. Es stellt sich daher die Frage, ob die dafür benötigten Mengen an Pflanzenkohle in der Schweiz grundsätzlich verfügbar wären. Um die Grössenordnung der potenziell benötigten Pflanzenkohle im Tiefbau einzuordnen, wurde nachfolgend eine stark vereinfachte Abschätzung vorgenommen. Diese dient ausschliesslich der orientierenden Systemeinordnung und bildet weder die reale Marktsituation noch die tatsächliche Verfügbarkeit von Pflanzenkohle im Tiefbau vollständig ab.

Für die Berechnung der benötigten Biomasse wurden die im Datensatz «Biochar, from spruce wood pyrolysis {CH} U» enthaltenen Stoffströme weiterverwendet (siehe Kapitel 4.2) [21]. Gemäss Datensatz werden 1.62 kg Holz (Trockenmasse) benötigt, um 1 kg Pflanzenkohle herzustellen. Es wurde angenommen, dass das eingesetzte Holz einen Wassergehalt von 50 % aufweist. Daraus ergibt sich eine benötigte Holz-Nassmasse von 3.24 kg pro kg Pflanzenkohle.

Als Grundlage für die Materialmengen dienen die Daten aus der Studie «Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau Aktualisierung 2015» [35]. Gemäss dieser Studie bestehen in den Infrastrukturnetzen Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Gasversorgung und Stromversorgung Materiallager von 80 Mio. t Beton und 252 Mio. t Kiessand. Für die vorliegende Abschätzung wurde anschliessend vereinfachend angenommen, dass vom Bestand pro Jahr 1 % im Rahmen von Instandsetzungsarbeiten ersetzt wird. Dieser Wert dient ausschliesslich als grobe Rechengrösse zur Einordnung der Grössenordnung des potenziellen Pflanzenkohle- und Holzbedarfs. Er ist nicht als Prognose für tatsächliche Instandsetzungsraten, Marktdurchdringung oder technische Umsetzbarkeit zu verstehen. Zudem wird nicht berücksichtigt, dass ein Teil des Materials in der Praxis direkt vor Ort verwertet wird.

Für Flüssigboden mit Pflanzenkohle wurde die in Kapitel 4.1 definierte Rezeptur verwendet. Diese weist einen Pflanzenkohleanteil von etwa 1 Massenprozent auf. Unter den gewählten, stark vereinfachenden Annahmen ergibt sich beim Ersatz von Kiessand durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle ein jährlicher Bedarf von 24’812 t Pflanzenkohle, was 80’392 t Holz-Nassmasse entspricht. Wird Beton durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle ersetzt, ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 6’280 t Pflanzenkohle beziehungsweise 20’348 t Holz-Nassmasse.

Wird Beton in Grabenverfüllungen nicht durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle, sondern durch Beton mit Pflanzenkohle ersetzt (siehe Kapitel 5.6.4), ergibt sich aufgrund der höheren Dichte von Beton ein etwas höherer Bedarf an Pflanzenkohle. Unter der vereinfachenden Annahme eines Pflanzenkohleanteils von ebenfalls rund 1 Massenprozent wären dafür 8’025 t Pflanzenkohle sowie 26’000 t Holz-Nassmasse erforderlich.

Gemäss der Taschenstatistik «Forstwirtschaft der Schweiz 2025» betrug die Holzernte im Jahr 2024 4’803’397 m³ [36]. Mit einer angenommenen Dichte von 825 kg/m³ [37] ergibt sich daraus eine Biomasse von rund 3’962’803 t Nassholz. Der abgeschätzte Holzbedarf entspräche damit beim Ersatz von Kiessand durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle 2 % der jährlichen Schweizer Holzernte, beim Ersatz von Beton durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle 0.5 % und beim Ersatz von Beton durch Beton mit Pflanzenkohle 0.7 %.

Rein rechnerisch erscheinen diese Anteile an der Schweizer Holzernte zunächst nicht sehr hoch. Für die Einordnung der tatsächlichen Umsetzbarkeit ist jedoch nicht nur die theoretisch verfügbare Biomasse relevant, sondern auch die heutige Produktion von Pflanzenkohle. Laut der Studie «Production quantities and C-sink potential of EBC-certified Biochar in 2023» betrug die EBC-zertifizierte Pflanzenkohleproduktion in der Region EU + EFTA im Jahr 2023 64’106 t [38]. Bereits der für den Ersatz von Beton in Grabenverfüllungen durch Flüssigboden mit Pflanzenkohle abgeschätzte Bedarf von 6’280 t Pflanzen-

kohle entspräche damit knapp 10 % dieser aktuellen Jahresproduktion. Dies zeigt, dass der abgeschätzte Bedarf sowohl im Verhältnis zur Holzernte als auch zur heutigen Pflanzenkohleproduktion relevant ist.

Es gilt zudem zu berücksichtigen, dass Pflanzenkohle auch in anderen Baustoffen, wie Beton, eingesetzt werden kann und somit künftig eine deutlich höhere Nachfrage resultieren könnte.

Gleichzeitig ist die Nutzung von Biomasse immer im Kontext möglicher Nutzungskonkurrenzen zu betrachten. Im Sinne der Integralen Wald- und Holzstrategie 2050 hat die Kaskadennutzung eine zentrale Bedeutung. Sie beschreibt die mehrstufige und möglichst effiziente Verwendung des Rohstoffs Holz. Dabei soll Holz immer zuerst dort eingesetzt werden, wo es den höchsten volkswirtschaftlichen Nutzen, den grössten ökologischen Mehrwert und das breiteste Potenzial für Mehrfachnutzungen bietet. Im Vordergrund steht deshalb der Einsatz als langlebiges Baumaterial sowie als Rohstoff für die Holzwerkstoff-, Papier- und Zellstoffindustrie. Erst nach Ausschöpfung dieser höherwertigen Nutzungsstufen sollen verbleibende Holzfraktionen in einem energetischen Prozess verwertet werden. Zudem übernehmen Wälder neben der Kohlenstoffspeicherung weitere zentrale ökologische Funktionen, etwa für Biodiversität, Wasserhaushalt und Klimaregulation.

Die Frage, in welchem Umfang Biomasse für Pflanzenkohle im Bausektor eingesetzt werden sollte, müsste daher in einem übergeordneten Kontext untersucht werden. Die hier dargestellten Ergebnisse sind als orientierende Abschätzung zu verstehen. Sie zeigen eine mögliche Grössenordnung des Bedarfs auf, erlauben jedoch keine Aussage darüber, ob die dafür erforderlichen Pflanzenkohlemengen kurz- bis mittelfristig tatsächlich verfügbar wären.

5 Vergleichende Ökobilanz von Grabenverfüllungen

Zur Einordnung der ökologischen Vorteilhaftigkeit von Flüssigboden werden verschiedene Verfüllsysteme auf Ebene der funktionellen Einheit 1 m³ Grabenverfüllung miteinander verglichen. Dabei werden nicht nur Materialien, sondern Bauweisen mit vergleichbarer technischer Funktion gegenübergestellt. Im Leitungsbau übernehmen die Verfüllmaterialien insbesondere die Bettung und Überdeckung der Leitung, die Lastverteilung, die seitliche Stabilisierung sowie, abhängig von den Anforderungen, den mechanischen Schutz und die Sicherstellung der Tragfähigkeit im Oberbau.

5.1 Definition der Vergleichsszenarien

Als Referenz zum Flüssigboden werden zwei im Schweizer Tiefbau verbreitete konventionelle Bauweisen betrachtet: «Kiessand ohne Hüllbeton» und «Kiessand mit Hüllbeton». Kiessand dient dabei als nichtbindiges Material zur Bettung und Überdeckung der Leitung sowie zur Lastabtragung durch Verdichtung. Wird zusätzlich Hüllbeton eingesetzt, übernimmt dieser den mechanischen Schutz und die Fixierung der Leitung und wird typischerweise bei erhöhten mechanischen Anforderungen (z. B. hohe Verkehrslasten, geringe Überdeckung oder empfindliche Leitungen) verwendet. Zusätzlich wird ein Szenario modelliert, bei welchem ein emissionsreduzierter Hüllbeton (klinkerreduzierter Zement) eingesetzt wird. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, Pflanzenkohle in Hüllbeton einzubringen. Dies würde jedoch eine eigenständige materialtechnische Untersuchung erfordern und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Auch bei Kiessand wurde die Beimischung von Pflanzenkohle nicht berücksichtigt, da deren technische Eignung und Langzeitstabilität in ungebundenen Materialien mit zusätzlichen Unsicherheiten verbunden sind (siehe Kapitel 5.6.3).

Flüssigboden ist ein selbstverdichtender Verfüllbaustoff, der durch seine fliessfähige Einbringung eine homogene und lückenfreie Umschliessung der Leitung ermöglicht. Diese funktionale Einordnung gilt für alle in dieser Studie untersuchten Flüssigbodenvarianten. Dadurch können die Flüssigbodenvarianten die Funktionen des verdichteten Kiessandes (Bettung, Verfüllung und Lastverteilung) vollständig übernehmen. Je nach projektspezifischen Anforderungen kann Flüssigboden zudem teilweise auch Funktionen des Hüllbetons erfüllen, insbesondere hinsichtlich seitlicher Stabilisierung und mechanischem Schutz (siehe Kapitel 7). Damit ist Flüssigboden in den meisten Anwendungsfällen grundsätzlich geeignet, sowohl Kiessand ohne Hüllbeton als auch die Kombination aus Kiessand und Hüllbeton zu ersetzen.

Es werden folgende Szenarien untersucht und miteinander verglichen:

1. Kiessand ohne Hüllbeton (im Folgenden: Kiessand ohne HB)
2. Kiessand mit Hüllbeton (im Folgenden: Kiessand mit HB)
3. Flüssigboden (durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur gemäss Kapitel 3)
4. Flüssigboden mit Pflanzenkohle (im Folgenden: Flüssigboden mit PK, Rezeptur gemäss Kapitel 4)
5. Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil (im Folgenden: Flüssigboden mit max. PK, Rezeptur gemäss Kapitel 4)

Ein zusätzliches Szenario «Flüssigboden mit Hüllbeton» wird nicht betrachtet, da diese Kombination in der Regel funktional redundant und zudem wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Beim Szenario «Kiessand mit Hüllbeton» sowie bei allen Flüssigbodenvarianten wurden jeweils sowohl Zement CEM I 42.5 R als auch der klinkerreduzierte Zement CEM III A betrachtet. Beim Szenario «Kiessand ohne Hüllbeton» entfällt diese Unterscheidung, da kein zementhaltiges Material eingesetzt wird. Die einzelnen Rezepturen sind in der Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Rezepturen der untersuchten Verfüllmaterialien.

Komponente	Kiessand mit HB	Kiessand ohne HB	Flüssigboden	Flüssigboden mit PK	Flüssigboden mit max. PK
Einheit	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
Aushub	288	360	1’300	1’332	1’345
Hüllbeton (mit CEM I 42.5 R bzw. CEM III A)	460	0	0	0	0
Primärkies	576	720	0	0	0
Primärsand	576	720	0	0	0
Zement (CEM I bzw. CEM III A)	0	0	42	27	26
Bentonit	0	0	32	21	20
Kalk	0	0	1	0	0
Pflanzenkohle	0	0	0	16	45
Wasser	0	0	426	316	312
Summe	**1’900**	**1’800**	**1’801**	**1’713**	**1’749**

Hüllbeton

Für den Hüllbeton wurde der Datensatz «Concrete, normal, at plant, with resource correction {CH} U» verwendet. Gemäss diesem Datensatz werden für die Herstellung von 1 m³ Beton 300 kg Zement eingesetzt. Bei einer angenommenen Betondichte von 2’300 kg/m³ entspricht dies einem Zementanteil von 13 Massenprozent. Der hier modellierte Hüllbeton entspricht damit im vorliegenden Kontext einem Betonsystem mit vergleichsweise tiefem Zementanteil und nicht einem klassischen Konstruktionsbeton.

Annahmen zur Volumenaufteilung im Graben

Für die ökologische Bewertung der Verfüllvarianten wurde in dieser Studie vereinfachend angenommen, dass bei einer Grabenverfüllung von 1 m³ das Szenario «Kiessand mit Hüllbeton» zu 20 % aus Hüllbeton und zu 80 % aus Kiessand besteht. Die Varianten ohne Hüllbeton wurden dagegen als vollständige Verfüllung von 1 m³ Graben mit dem jeweiligen Verfüllmaterial modelliert. Diese Annahme dient der Vergleichbarkeit der Szenarien und stellt eine praxisnahe, bewusst vereinfachte Darstellung dar. In der Realität wird Hüllbeton nicht flächendeckend über das gesamte Grabenvolumen eingebaut, sondern gezielt zur zusätzlichen mechanischen Sicherung einzelner Bauteile, beispielsweise zur Ummantelung von Leitungen, Rohren oder Kabeln. In der vorliegenden Studie wurde bewusst darauf verzichtet, das geschützte Objekt (z. B. Rohr) geometrisch explizit zu modellieren. Stattdessen wurde der Hüllbetonanteil pauschal auf das gesamte Grabenvolumen bezogen. Diese Vereinfachung führt dazu, dass der angenommene Hüllbetonanteil im Vergleich zur realen Baupraxis tendenziell eher konservativ ist. Der Wert von 20 % wird dennoch als realistisch erachtet, da er typische Grabengeometrien und Ausführungsvarianten abbildet.

Bei einer Betondichte von 2’300 kg/m³ ergibt sich für den angesetzten Hüllbetonanteil von 20 % eine Hüllbetonmenge von 460 kg pro m³ Grabenverfüllung. In Kombination mit dem oben beschriebenen Zementgehalt resultiert daraus ein Zementeinsatz von 60 kg pro m³ Grabenverfüllung.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich der Hüllbetonanteil nicht proportional zur Grabentiefe erhöht. Bei tieferen Gräben bleibt das zu schützende Objekt (z. B. ein Rohr) in der Regel gleich, während primär das Volumen des Verfüllmaterials zunimmt. Abbildung 5-1 zeigt eine vereinfachte zweidimensionale Skizze, welche die getroffenen Annahmen zur Volumenaufteilung von Hüllbeton und Verfüllmaterial zur besseren Anschaulichkeit darstellt.

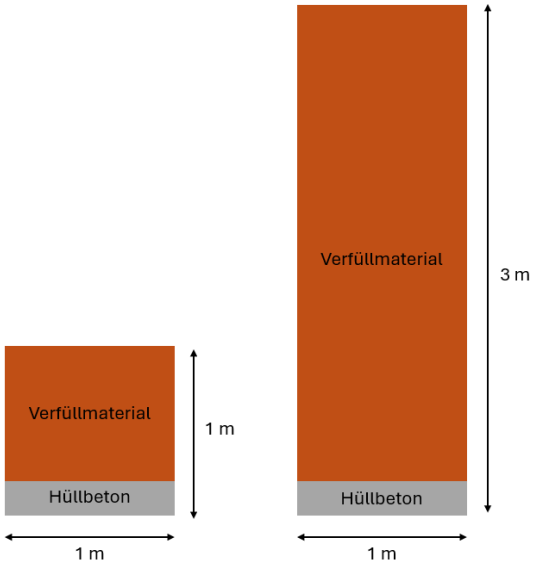


Abbildung 5-1: Schematische Volumenaufteilung von Hüllbeton und Verfüllmaterial bei zwei unterschiedlichen Grabentiefen (2D).

5.2 Systembeschreibung der Vergleichsszenarien

Für die betrachteten Flüssigbodenvarianten wird dasselbe System berücksichtigt wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Die Systemgrenzen, die berücksichtigten Lebenszyklusphasen sowie die Modellierung der Herstellung, des Einbaus und des Rückbaus entsprechen somit der dort beschriebenen Vorgehensweise.

Für die konventionellen Bauweisen «Kiessand mit Hüllbeton» und «Kiessand ohne Hüllbeton» wurde ein leicht abweichendes System modelliert. Analog zum Flüssigboden wird zunächst der Leitungsgraben ausgehoben. Anschliessend werden die benötigten Primärmaterialien direkt auf die Baustelle geliefert, das heisst Primärkies und Primärsand sowie beim Szenario «Kiessand mit Hüllbeton» zusätzlich Hüllbeton. Ein kleiner Anteil des anfallenden Aushubs wird ebenfalls wiederverwertet. Für den Einbau der konventionellen Bauweisen wurde zusätzlich der Verdichtungsprozess berücksichtigt.

Auch beim Rückbau zeigen sich Unterschiede gegenüber den Flüssigbodenvarianten. Während beim Szenario «Kiessand ohne Hüllbeton» der Rückbau im Wesentlichen dem Ausbau des verdichteten Kiessands entspricht, wurde beim Szenario «Kiessand mit Hüllbeton» zusätzlich ein hydraulischer Bagger mit Jackhammer berücksichtigt, um den Hüllbeton aufzubrechen.

Die Materialflussanalysen und die zugrunde gelegten Transportdistanzen der Verfüllvariante «Kiessand mit Hüllbeton» sind in Anhang C dargestellt (Abbildung 0-15 und Abbildung 0-16). Die entsprechenden Darstellungen für die Variante «Kiessand ohne Hüllbeton» befinden sich ebenfalls in Anhang C (Abbildung 0-17 und Abbildung 0-18).

5.3 Ergebnisse der Vergleichsszenarien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Verfüllvarianten dargestellt. Die Resultate beziehen sich auf die Umweltwirkungen pro funktionelle Einheit, definiert als ein Kubikmeter Grabenverfüllung mit Verfüllmaterial. Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über die Resultate der untersuchten Verfüllvarianten.

Tabelle 5-2: Übersicht der Umweltwirkungen der untersuchten Verfüllvarianten pro m³ Grabenverfüllung.

Flüssigbodenvariante	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	kg CO_2-eq/m³	UBP/m³	kWh Oil-eq/m³	kWh Oil-eq/m³	kWh Oil-eq/m³
Kiessand mit Hüllbeton	86.47	290’837	247.19	226.62	20.57
Kiessand mit verbessertem Hüllbeton	68.48	272’129	246.60	226.12	21.41
Kiessand ohne Hüllbeton	30.64	220’239	151.85	139.04	12.81
Flüssigboden	54.62	120’588	137.76	127.64	10.12
Verbesserter Flüssigboden	42.01	107’459	137.24	126.57	10.68
Flüssigboden mit PK	46.84	114’189	290.05	133.52	156.53
Verbesserter Flüssigboden mit PK	38.65	105’676	289.78	132.87	156.91
Flüssigboden mit max. PK	54.22	129’638	597.87	172.68	425.18
Verbesserter Flüssigboden mit max. PK	46.28	121’387	597.61	172.05	425.55

5.3.1 Treibhausgasemissionen

Abbildung 5-2 zeigt die gesamten Treibhausgasemissionen pro Kubikmeter Grabenverfüllung für die untersuchten Verfüllmaterialien über den gesamten Lebenszyklus (A1 – A5, C1 –C4). Unter den betrachteten Varianten weist Kiessand mit Hüllbeton die höchsten Treibhausgasemissionen auf, Kiessand ohne Hüllbeton die tiefsten.

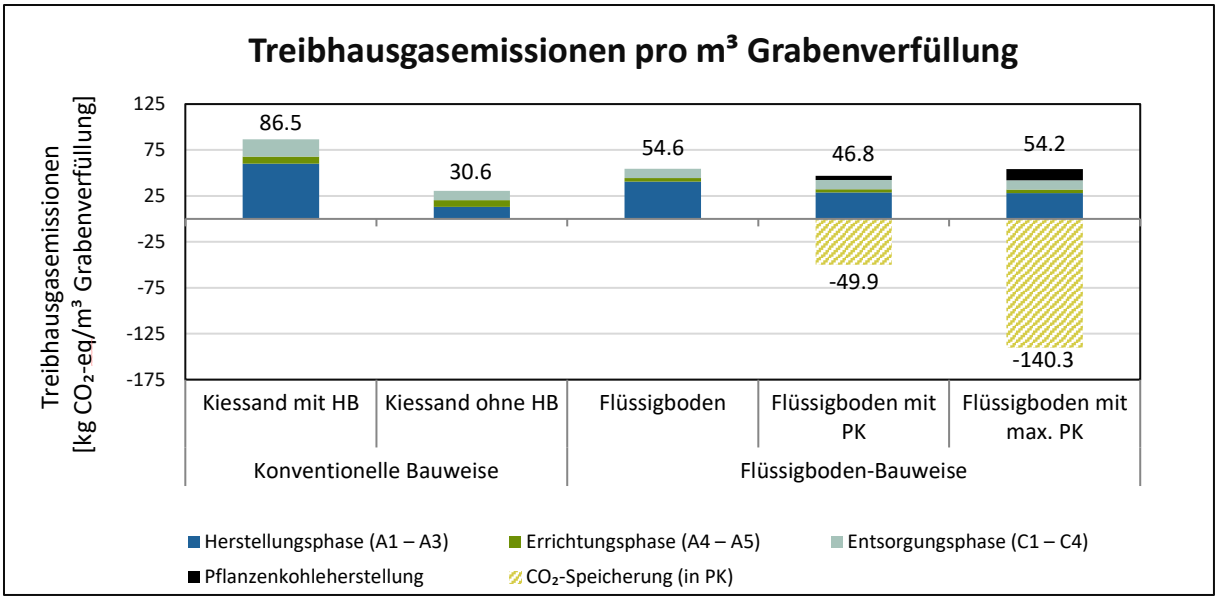


Abbildung 5-2: Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 5-3 zeigt ergänzend den Einfluss der Zementsorte auf die gesamten Treibhausgasemissionen der betrachteten Verfüllvarianten. Die Kohlenstoffspeicherung der eingesetzten Pflanzenkohle bleibt unverändert und wird daher in diesem Vergleich nicht zusätzlich dargestellt.

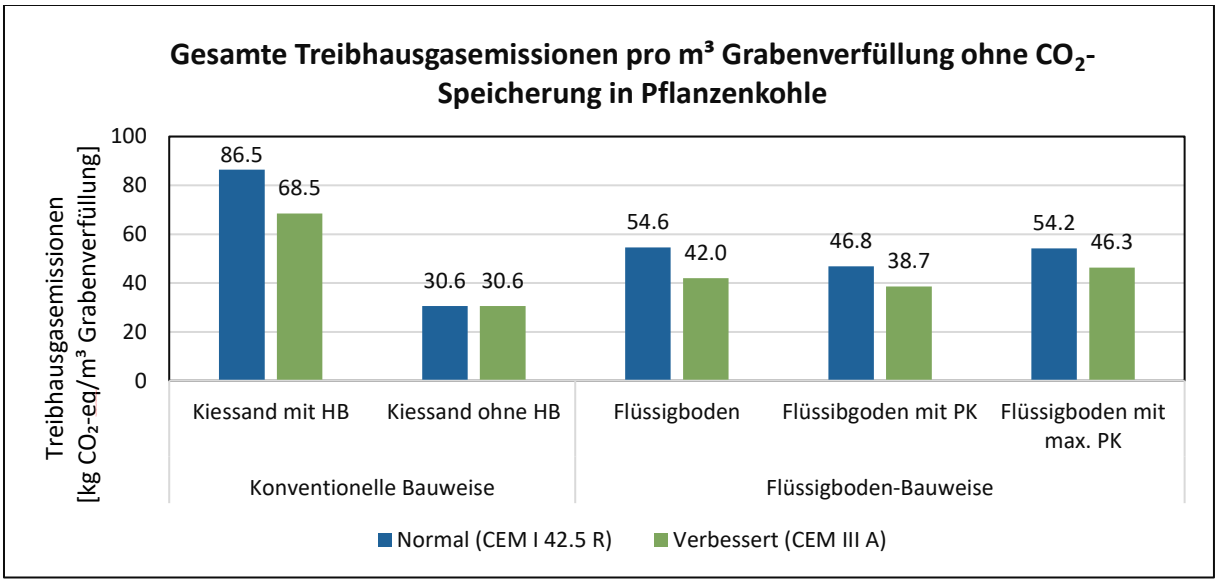


Abbildung 5-3: Vergleich der gesamten Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung ohne CO_2-Speicherung in Pflanzenkohle bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A.

Beim Szenario «Kiessand mit Hüllbeton» führt der Einsatz von CEM III A gegenüber CEM I 42.5 R zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 21 %. Beim Szenario «Kiessand ohne Hüllbeton» ergibt sich erwartungsgemäss keine Veränderung, da kein zementhaltiges Material eingesetzt wird. Beim Flüssigboden beträgt die Reduktion 23 %, beim Flüssigboden mit moderatem Pflanzenkohleanteil 17 % und beim Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil 15%. Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz von klinkerreduziertem Zement sowohl bei Hüllbeton als auch bei allen untersuchten Flüssigbodenvarianten ein wirksamer Hebel zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist.

5.3.2 Umweltbelastungspunkte

Abbildung 5-4 zeigt die Gesamtumweltbelastung pro Kubikmeter Grabenverfüllung für die untersuchten Verfüllmaterialien. Dabei zeigt sich ein anderer Trend als bei den Treibhausgasemissionen: Alle Varianten der konventionellen Bauweisen (Kiessand mit und ohne Hüllbeton) weisen höhere Gesamtumweltbelastungen auf als die Flüssigbodenvarianten. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die konventionellen Bauweisen in dieser Studie mit Primärkies und Primärsand modelliert wurden, während bei den Flüssigbodenvarianten das vorhandene Aushubmaterial den Hauptbestandteil bildet. Durch diese Verwertung des Aushubmaterials werden der Abbau und die Aufbereitung primärer Rohstoffe vermieden, was sich deutlich in einer geringeren Gesamtumweltbelastung widerspiegelt.

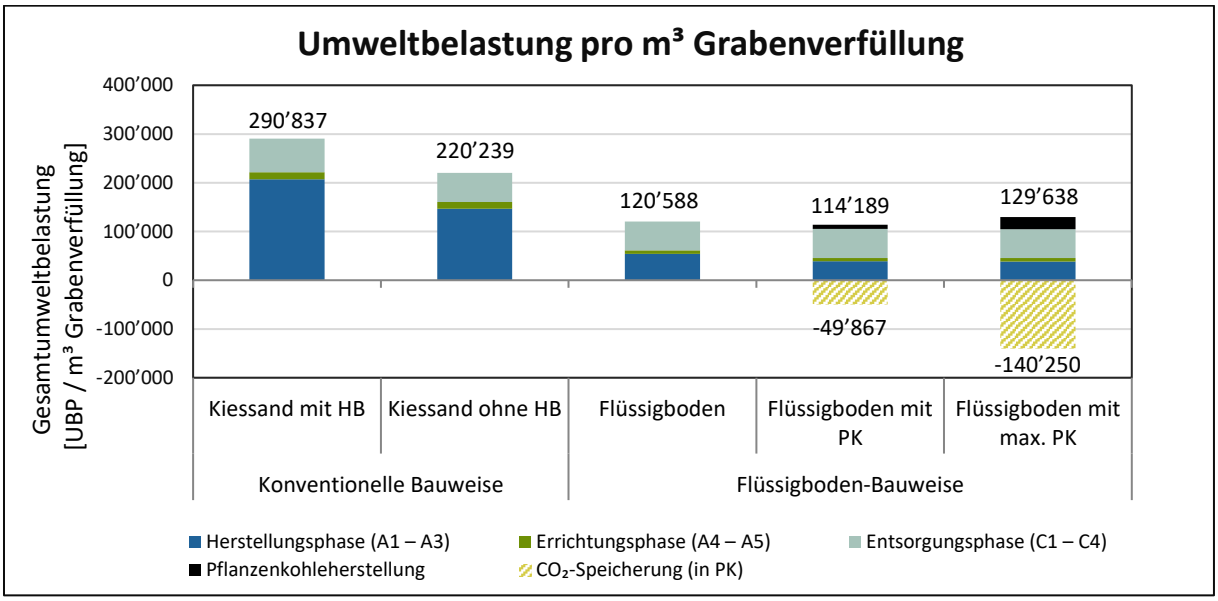


Abbildung 5-4: Gesamte Umweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 5-5 zeigt ergänzend den Einfluss der Zementsorte auf die Gesamtumweltbelastung der betrachteten Verfüllvarianten. Der Einsatz von CEM III A reduziert die Umweltbelastung beim Kiessand mit Hüllbeton um 6 %, beim Flüssigboden um 11 %, beim Flüssigboden mit moderatem Pflanzenkohleanteil um 7 % und beim Flüssigboden mit maximalem Pflanzenkohleanteil um 6 %.

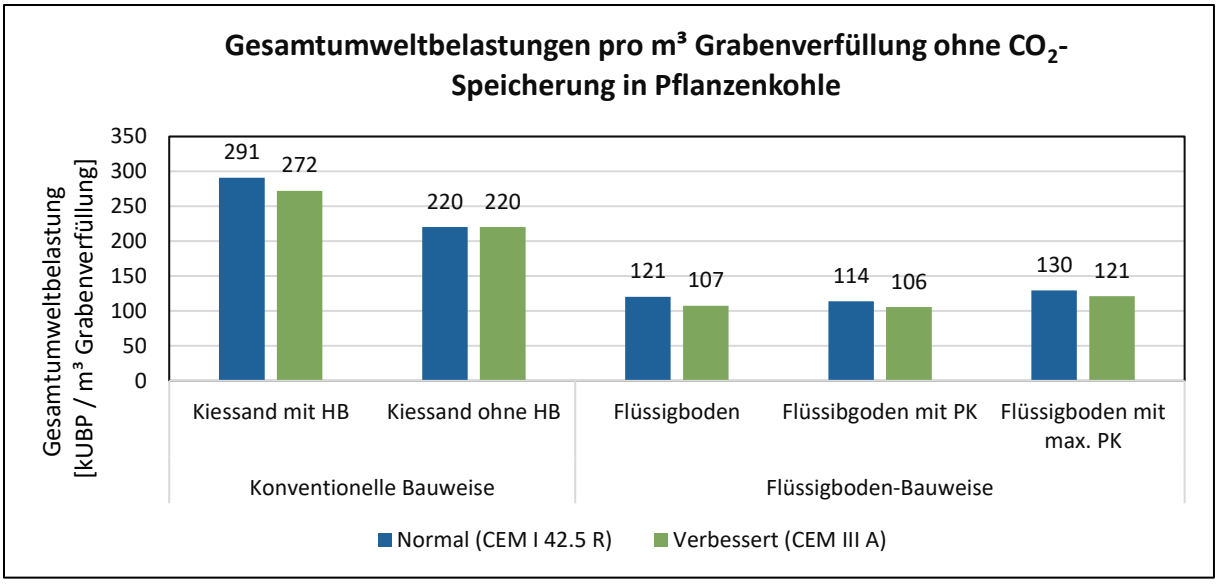


Abbildung 5-5: Vergleich der Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A, ohne Berücksichtigung der unveränderten CO_2-Speicherung in Pflanzenkohle.

5.3.3 Kumulierter Energieaufwand

Abbildung 5-6 zeigt den kumulierten Energieaufwand pro Kubikmeter Grabenverfüllung für die untersuchten Verfüllmaterialien. Beim Vergleich der konventionellen Bauweisen mit der Flüssigbodenvariante ohne Pflanzenkohle zeigt sich, dass alle konventionellen Varianten einen höheren Energiebedarf aufweisen. Die Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle weisen hingegen den höchsten kumulierten Energieaufwand auf. Dies ist hauptsächlich auf den erneuerbaren Energiebedarf der Pflanzenkohleherstellung zurückzuführen. Insgesamt weist der herkömmliche Flüssigboden den tiefsten kumulierten Energieaufwand auf.

Im Anhang C befinden sich die ergänzenden Grafiken zum erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieaufwand (siehe Abbildung 0-19 und Abbildung 0-20).

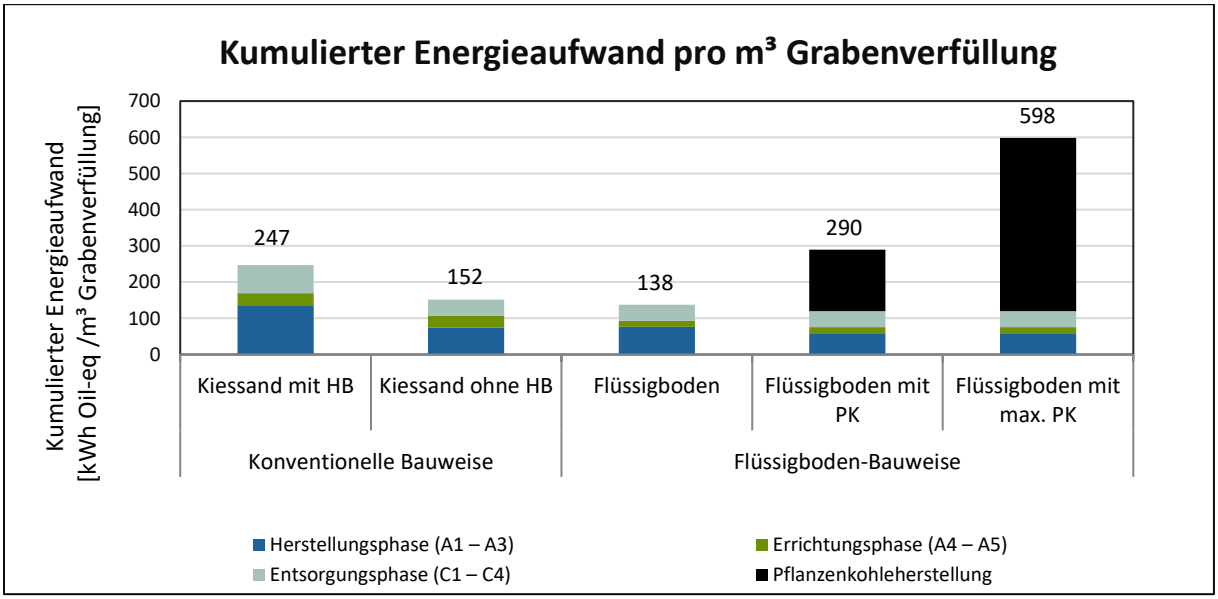


Abbildung 5-6: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 5-7 zeigt ergänzend den Einfluss der Zementsorte auf den kumulierten Energieaufwand der betrachteten Verfüllvarianten. Im Unterschied zu den Treibhausgasemissionen und den Umweltbelastungspunkten ist hier kaum ein Effekt der Zementsorte festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Herstellung von Zement unabhängig von der konkreten Zementsorte mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist.

Im Anhang C befinden sich die ergänzenden Grafiken zum erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieaufwand (siehe Abbildung 0-21 und Abbildung 0-22).

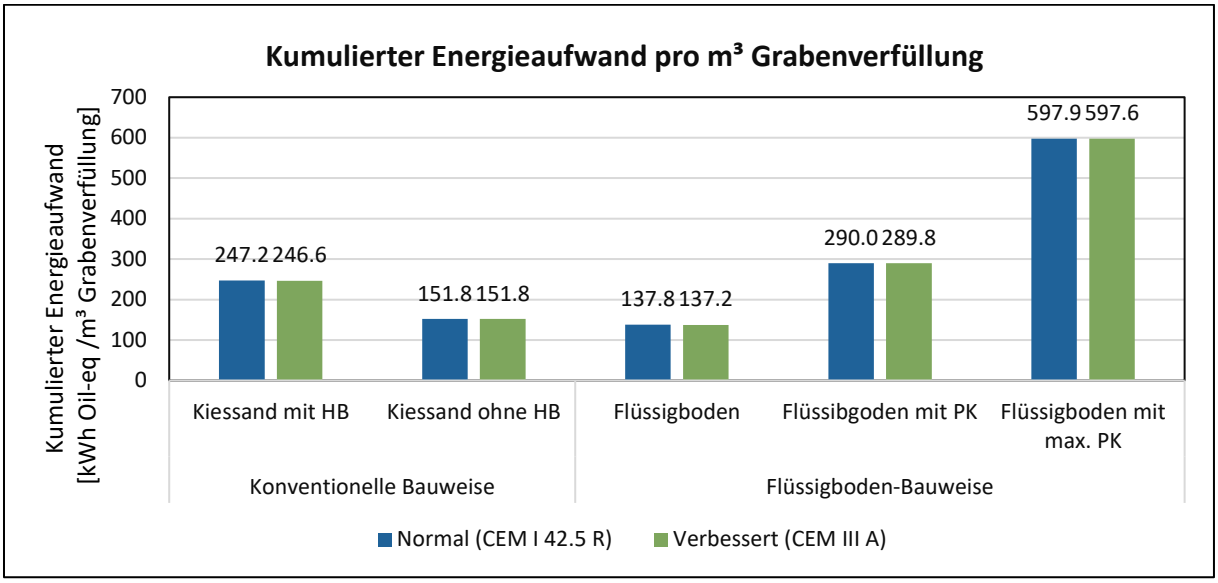


Abbildung 5-7: Vergleich des kumulierten Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A.

5.3.4 Interpretation

Die Ergebnisse zeigen klar, dass Flüssigboden gegenüber den Bauweisen mit Hüllbeton ökologisch vorteilhaft ist. Das gilt sowohl im Vergleich zu Kiessand mit Hüllbeton als auch zu Kiessand mit verbessertem Hüllbeton. Der Hauptgrund liegt im Hüllbeton selbst, dessen Umweltwirkungen vor allem durch den enthaltenen Zement bestimmt werden. Gleichzeitig werden die konventionellen Bauweisen in dieser Studie mit Primärkies und Primärsand modelliert, während bei den Flüssigbodenvarianten das vorhandene Aushubmaterial den Hauptbestandteil bildet. Diese Annahme orientiert sich an der heutigen Praxis, da für konventionelle Grabenverfüllungen in der Regel normgerechter Kies und Sand eingesetzt werden und der Einsatz von Sekundärmaterialien nicht dem Regelfall entspricht.

Ein anderes Bild ergibt sich beim Vergleich mit Kiessand ohne Hüllbeton. Diese Variante weist die tiefsten Treibhausgasemissionen auf. Gleichzeitig schneiden der herkömmliche und der verbesserte Flüssigboden bei den Umweltbelastungspunkten und beim kumulierten Energieaufwand besser ab. Das bedeutet, dass die ökologische Vorteilhaftigkeit von Flüssigboden stark davon abhängt, mit welcher konventionellen Bauweise verglichen wird und welcher Umweltindikator im Vordergrund steht.

Die Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle bieten zusätzlich das Potenzial zur CO_2-Speicherung, führen jedoch beim kumulierten Energieaufwand zu höheren Werten. Dieser zusätzliche Energieaufwand ist aber hauptsächlich erneuerbar und steht im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Pflanzenkohle.

Für die Praxis heisst das, dass Flüssigboden insbesondere dort ökologisch interessant ist, wo er Bauweisen mit Hüllbeton ersetzen kann. Wird dagegen mit einer konventionellen Bauweise ohne Hüllbeton verglichen, fällt der Vorteil kleiner aus oder ist je nach Umweltindikator nicht mehr vorhanden.

Zur zusammenfassenden Einordnung der Resultate zeigt Tabelle 5-3 die prozentualen Unterschiede der betrachteten Verfüllvarianten gegenüber der Referenzvariante «Kiessand mit Hüllbeton».

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Resultate der vergleichenden Ökobilanz. Dargestellt sind die prozentualen Unterschiede der betrachteten Verfüllvarianten gegenüber der Referenzvariante «Kiessand mit Hüllbeton».

Umweltindikator	Kiessand mit Hüllbeton	Kiessand mit verbessertem Hüllbeton	Kiessand ohne Hüllbeton	Flüssigboden	Verbesserter Flüssigboden	Flüssigboden mit PK	Flüssigboden mit max. PK
GWP	0 %	-21 %	-65 %	-37 %	-51 %	-46 %	-37 %
UBP	0 %	-6 %	-24 %	-59 %	-63 %	-61 %	-55 %
KEA	0 %	0 %	-39 %	-44 %	-44 %	17 %	142 %

5.4 Reduzierte Grabenbreite

Ein Aspekt, der im Rahmen der vergleichenden Ökobilanz berücksichtigt werden soll, ist das Potenzial einer reduzierten Grabenbreite bei der Anwendung von Flüssigboden. Flüssigboden kann als fliessfähiger Verfüllbaustoff ohne mechanische Verdichtung eingebaut werden. Dadurch kann im Vergleich zur konventionellen Grabenbauweise der erforderliche Arbeitsraum potenziell reduziert werden.

Gemäss SUVA kann der vorgeschriebene Arbeitsraum auf den technischen Arbeitsraum reduziert werden, sofern sichergestellt werden kann, dass keine Person seitlich des Rohres arbeiten muss [39]. Diese Voraussetzung kann insbesondere bei fliessfähigen Verfüllbaustoffen erfüllt werden, da kein Verdichtungsprozess erforderlich ist. Die Anpassung der Arbeitsabläufe muss jedoch jeweils projektspezifisch geprüft werden. Die mögliche Reduktion der Grabenbreite ist dabei nicht als fixer Prozentwert definiert, sondern hängt unter anderem vom Rohrdurchmesser sowie vom Platzbedarf für das Einbringen der Leitung und des Verfüllmaterials ab. Als grobe Faustregel kann von einem Mindestabstand von rund 15 cm je Seite zwischen Rohr und seitlicher Grabenwand ausgegangen werden [39].

In dieser Studie wurde die reduzierte Grabenbreite vereinfachend mit einer pauschalen Reduktion um 0.30 m gegenüber der konventionellen Grabenbauweise modelliert. Die Grabentiefe und -länge blieben unverändert. Die Reduktion der Grabenbreite wurde dabei ausschliesslich für die Flüssigbodenvarianten berücksichtigt. Für die konventionelle Bauweisen «Kiessand mit Hüllbeton» und «Kiessand ohne Hüllbeton» wurde keine reduzierte Grabenbreite angenommen, da oberhalb des Hüllbetons weiterhin Kiessand eingebaut und verdichtet werden muss. Entsprechend bleibt hier ein seitlicher Arbeitsraum erforderlich, weshalb in dieser Studie vereinfachend von einer unveränderten Grabenbreite ausgegangen wurde.

Abbildung 5-8 zeigt die gesamten Treibhausgasemissionen pro Kubikmeter Grabenverfüllung über den Lebenszyklus (A1 – A5, C1 – C4) unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten. Da sich die Grabenbreite um ca. 30 % reduziert, verringert sich auch die benötigte Materialmenge entsprechend, was zu einer Reduktion der Umweltwirkungen in allen Umweltindikatoren um 30 % führt. Dadurch wird Flüssigboden gegenüber den konventionellen Bauweisen nochmals ökologisch vorteilhafter. Besonders spannend ist, dass alle Flüssigbodenvarianten unter Berücksichtigung dieses Aspekts nur noch leicht über den Treibhausgasemissionen von «Kiessand ohne Hüllbeton» liegen. Bei den Flüssigbodenvarianten mit Pflanzenkohle bedeutet die reduzierte Grabenbreite jedoch auch, dass weniger Pflanzenkohle eingesetzt wird und somit absolut weniger CO_2 gespeichert werden kann.

In den anderen Umweltindikatoren zeigen sich die gleichen Trends. Die entsprechenden Grafiken befinden sich im Anhang C (siehe Abbildung 0-23 und Abbildung 0-24).

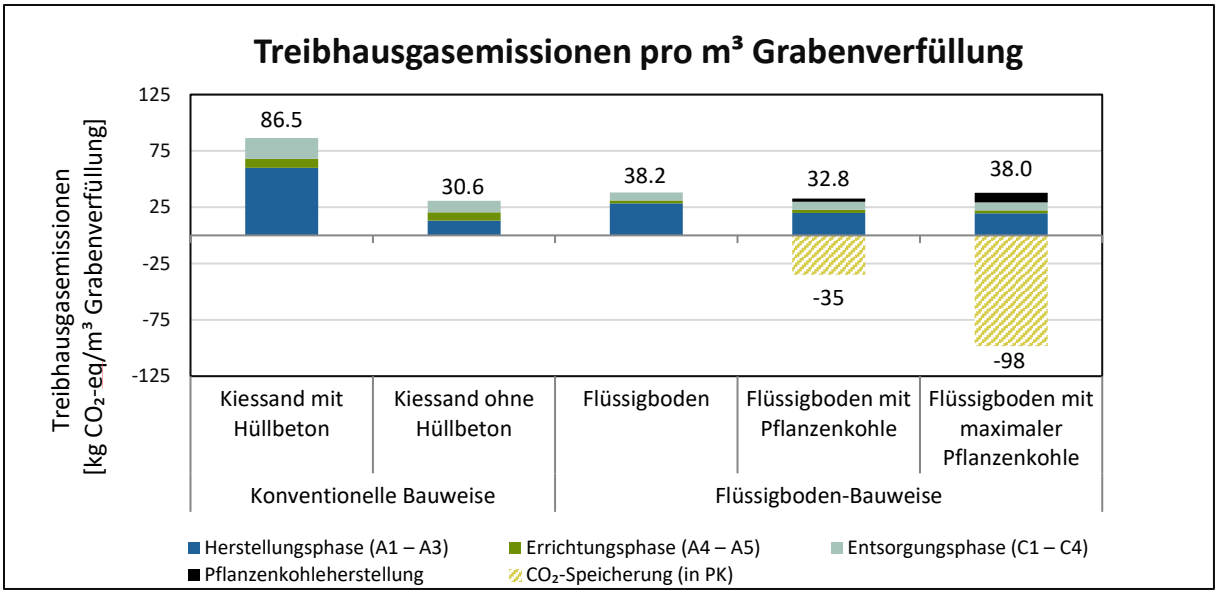


Abbildung 5-8 *Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten.*

Wie die bisherigen Ergebnisse gezeigt haben, haben sowohl die Wahl des Bindemittels als auch die Bauweise einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltwirkungen der betrachteten Verfüllsysteme. In einem nächsten Schritt wird deshalb untersucht, wie sich die Kombination aus reduzierter Grabenbreite und klinkerreduziertem Zement auf die Umweltwirkungen auswirkt. Abbildung 5-9 zeigt, dass der verbesserte Flüssigboden unter diesen Annahmen sogar tiefere Treibhausgasemissionen aufweist als Kiessand ohne Hüllbeton. Die Kombination aus reduzierter Grabenbreite und CEM III A verstärkt die ökologische Vorteilhaftigkeit der Flüssigbodenvarianten somit zusätzlich. Die Kohlenstoffspeicherung der eingesetzten Pflanzenkohle bleibt unverändert und wird daher in diesem Vergleich nicht zusätzlich dargestellt.

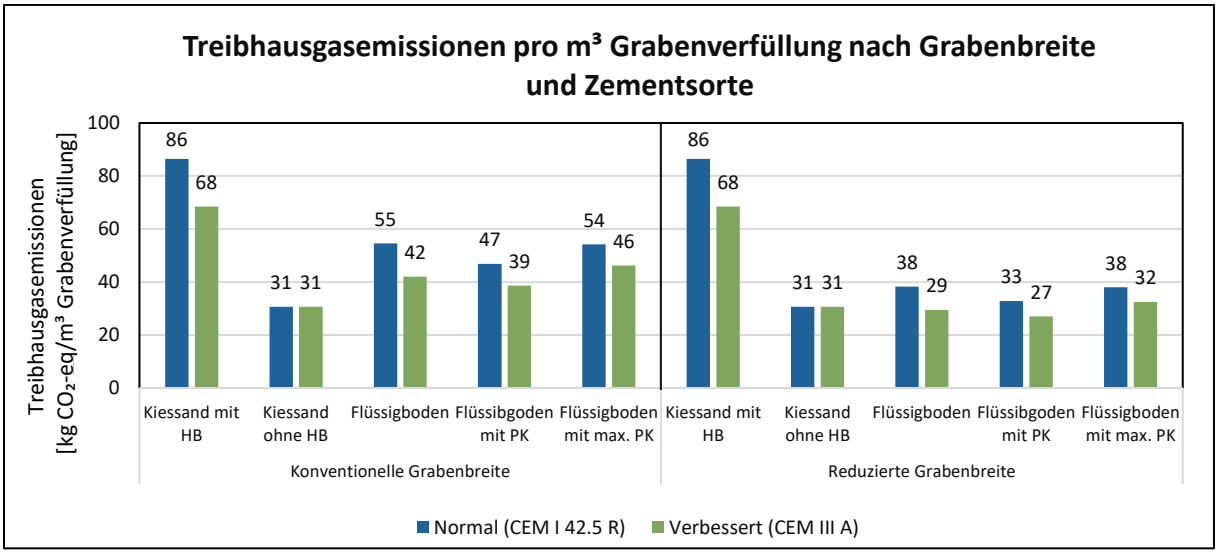
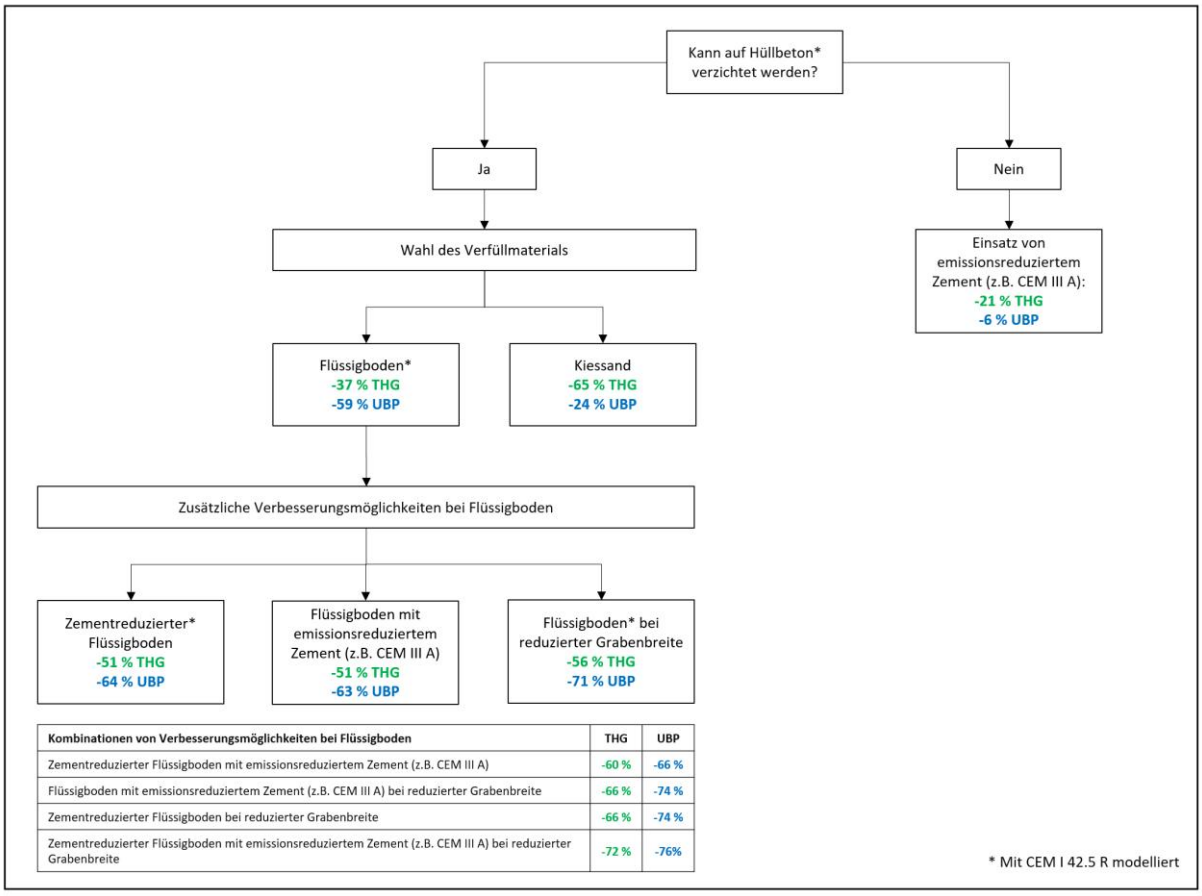


Abbildung 5-9: *Vergleich der gesamten Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte.*

In den anderen Umweltindikatoren (UBP und KEA) zeigen sich die gleichen Trends. De entsprechenden Grafiken befinden sich im Anhang C (siehe Abbildung 0-25 und Abbildung 0-26).

5.5 Fazit der vergleichenden Ökobilanz

Die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz zeigen, dass die ökologische Vorteilhaftigkeit von Flüssigboden stark davon abhängt, mit welcher konventionellen Bauweise verglichen wird und welche zusätzlichen Optimierungshebel genutzt werden. Abbildung 5-10 zeigt eine vereinfachte Entscheidungshilfe zur Reduktion der Umweltwirkungen im Leitungsbau und fasst die wesentlichen Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz zusammen. Die Reduktionspotenziale für die Treibhausgasemissionen (THG, in Grün) und Umweltbelastungspunkte (UBP, in Blau) zeigen jeweils die Reduktion der betrachteten Variante gegenüber der Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» pro m³ Grabenverfüllung.



Kombinationen von Verbesserungsmöglichkeiten bei Flüssigboden	THG	UBP
Zementreduzierter Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A)	-60 %	-66 %
Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A) bei reduzierter Grabenbreite	-66 %	-74 %
Zementreduzierter Flüssigboden bei reduzierter Grabenbreite	-66 %	-74 %
Zementreduzierter Flüssigboden mit emissionsreduziertem Zement (z.B. CEM III A) bei reduzierter Grabenbreite	-72 %	-76%

Abbildung 5-10: Entscheidungshilfe zur Reduktion von Umweltwirkungen im Leitungsbau.

5.6 Weitere materialtechnische Ansätze zur Reduktion der Umweltwirkungen

Neben der in dieser Studie untersuchten Substitution von Portlandzement durch klinkerreduzierten Zement zeigt auch die Sensitivitätsanalyse zum Zementgehalt, dass innerhalb der Flüssigbodenrezeptur weiteres Reduktionspotenzial besteht. Die mögliche Reduktion der Grabenbreite stellt darüber hinaus einen bautechnischen Hebel zur Verringerung der Umweltwirkungen dar. Ergänzend zu diesen bereits beschriebenen Optionen gibt es weitere materialtechnische Ansätze, mit denen die Umweltwirkungen von Flüssigboden- und Hüllbetonsystemen gesenkt werden können. Dieses Kapitel zeigt solche Optionen qualitativ auf und ordnet ihr mögliches Verbesserungspotenzial ein. Die dargestellten Ansätze wurden nicht als integraler Bestandteil der Hauptszenarien untersucht und sind daher als indikative Betrachtungen zu verstehen.

5.6.1 Mineralische Bindemittel

In der vorliegenden Studie wurden mit Portlandzement CEM I 42.5 R und dem klinkerreduzierten Zement CEM III A bereits zwei mineralische Bindemittel berücksichtigt (siehe Kapitel 3.5.1, 4.3 und 5.3). Darüber hinaus werden im Bauwesen alternative mineralische Bindemittel entwickelt, die entweder auf einer Reduktion des Klinkeranteils und/oder auf dem Ersatz von Primärrohstoffen durch Sekundärmaterialien basieren.

Gewisse Zemente nutzen aufbereitetes Mischabbruchgranulat als Hauptbestandteil. Gemäss Herstellerangaben lassen sich damit die CO_2-Emissionen gegenüber einem Schweizer Portlandzement (CEM II/A) um 10 % reduzieren [40].

Eine weitere Entwicklung ist LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Das ist ein Zement mit reduziertem Klinkeranteil, der typischerweise aus etwa 50 % Klinker, 30 % calciniertem Ton, 15 % Kalkstein und 5 % Gips besteht. Gemäss Angaben eines Herstellers können die Treibhausgasemissionen von LC3 im Vergleich zu Schweizer Portlandzement (CEM II/A) um bis zu 28 % reduziert werden [41] [42].

Ein anderes Beispiel sind zementfreie Bindemittel, die auf fein gemahlenem Mischabbruchmaterial und einem mineralischen Aktivator basieren. Gemäss Herstellerangaben betragen die Treibhausgasemissionen 0.244 kg CO_2-eq/kg. Dies entspricht gegenüber Portlandzement CEM I 42.5 R einer Reduktion von 68 % [43].

Grundsätzlich sind solche alternativen mineralischen Bindemittel sowohl für bindige Verfüllsysteme wie Flüssigboden als auch für konventionelle Bauweisen mit Hüllbeton von Interesse, sofern die technischen Anforderungen erfüllt werden. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass sich die Rahmenbedingungen je nach Bindemittel deutlich unterscheiden. Bei Bindemitteln, die ganz oder teilweise auf Sekundärrohstoffen basieren, hängen die Umweltwirkungen insbesondere von der Zusammensetzung, Qualität und Aufbereitung der eingesetzten Materialien ab. Für eine fundierte Bewertung wären daher vertiefte Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung, beispielsweise hinsichtlich potenzieller Schadstoffgehalte, erforderlich.

5.6.2 Betone mit reduziertem Zementanteil

Mit der SIA 262.051+A2/ND besteht in der Schweiz seit Februar 2025 die Möglichkeit, Beton leistungsbezogen auszuschreiben und zu liefern. Entscheidend sind die erfüllten Eigenschaften und Prüfwerte. Unter anderem entfällt bei leistungsbasierten Ausschreibungen der Mindestzementgehalt, wodurch zusätzliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen von Beton ermöglicht werden können. Erste Hilfsmittel hierzu stehen bereits zur Verfügung[10].

Für die in dieser Studie betrachteten Hüllbetonsysteme ist dieser Ansatz grundsätzlich relevant, da leistungsbezogene Anforderungen mit entsprechenden Anpassungen auch auf andere Betonarten wie zum Beispiel Mager- und Hinterfüllbetone übertragen werden können.

5.6.3 Pflanzenkohle im Kiessand

Die Literatur zeigt, dass Pflanzenkohle eine hohe Porosität und eine grosse spezifische Oberfläche aufweist und die Wasserspeicherung verbessern kann [32]. Aufgrund dieser Eigenschaften erscheint Pflanzenkohle primär für Anwendungen in gebundenen oder strukturierten Systemen, wie beispielsweise Flüssigboden, geeignet. In ungebundenen Materialien wie Kiessand bestehen hingegen Unsicherheiten hinsichtlich der räumlichen Fixierung und Langzeitstabilität der Pflanzenkohle. Insbesondere können Entmischung, Umlagerung oder Auswaschung nicht ausgeschlossen werden. Hinzu kommt, dass nichtmineralische Fremdstoffe in Kiessand aus normativer und abfallrechtlicher Sicht zu minimieren sind.

[10] Leistungsbasierte Ausschreibung von Beton. ASTRA (2025)

5.6.4 Pflanzenkohle im Beton

Erste Anwendungen sind bereits in der Praxis vorhanden, beispielsweise in Form von pflanzenkohlehaltigen Betonen, bei denen mittels Pyrolyse erzeugter biogener Kohlenstoff dem Beton beigemischt und langfristig im Bauteil gebunden wird [44].

Für die vorliegende Studie wird diese Option jedoch nicht quantitativ untersucht, da der Fokus auf dem Vergleich zwischen konventionellen Grabenverfüllsystemen und Flüssigboden liegt. Eine fundierte Modellierung von Hüllbeton mit Pflanzenkohle würde projektspezifische Rezepturen sowie zusätzliche materialtechnische Nachweise erfordern. Die Integration von Pflanzenkohle in Beton stellt somit eine relevante, jedoch eigenständige Optimierungsoption dar, die in einer separaten Untersuchung vertieft bewertet werden sollte.

5.7 Potenzialabschätzung von Flüssigboden im Schweizer Tiefbau

Die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz wurden auf den Schweizer Tiefbau übertragen, um die mögliche Grössenordnung der Umweltentlastung durch Flüssigboden abzuschätzen. Dazu wurde untersucht, wie viel Verfüllmaterial bei der Erneuerung und beim Ausbau von Leitungsnetzen in den Bereichen Wasser, Abwasser, Gas und Strom jährlich anfällt und potenziell durch Flüssigboden ersetzt werden kann. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde jeweils mit CEM I 42.5 R gerechnet. Die methodischen Grundlagen, Annahmen und detaillierten Resultate sind in Anhang D dokumentiert.

Unter Berücksichtigung von Instandsetzungsarbeiten und Netzwachstum können jährlich etwa 71'700 t Kiessand und 375’000 t Hüllbeton durch Flüssigboden ersetzt werden. Insgesamt ergibt sich über alle betrachteten Netze hinweg ein jährliches Reduktionspotenzial von 37'767 t CO_2-eq pro Jahr. Das modellierte Treibhausgaspotenzial entspricht ca. 0.1 % der gesamten territorialen Treibhausgasemissionen der Schweiz [45].

Die Potenzialabschätzung stellt eine vereinfachte und optimistische Abschätzung dar und basiert auf Annahmen zur Substituierbarkeit, zu Materialflüssen sowie zur Entwicklung der Infrastrukturnetze.

5.8 Kostenanalyse

Ergänzend zur ökologischen Bewertung von Flüssigboden wurde eine vereinfachte Kostenanalyse durchgeführt, um die konventionelle Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» und die Flüssigboden-Bauweise wirtschaftlich gegenüberzustellen. Dabei wurden zwei Betrachtungsebenen unterschieden:

- eine modellbasierte Lebenszykluskostenanalyse auf Grundlage eigenständig hergeleiteter Material-, Transport- und Entsorgungskosten sowie
- eine praxisbasierte Lebenszykluskostenanalyse auf Basis standardisierter Ausführungspositionen (TB-Viewer).

5.8.1 Modellbasierte Lebenszykluskostenanalyse

In einem ersten Schritt wurden die Kosten pro Kubikmeter Grabenverfüllung für die Module A1 – A5 und C1 – C4 abgeschätzt. Berücksichtigt wurden dabei die Material- und Transportkosten, ein vereinfachter Maschinenaufwand über den Dieselverbrauch sowie die Entsorgungskosten auf Basis von Mittelwerten verschiedener Deponien.

Wie Tabelle 5-4 zeigt, betragen die modellbasiert abgeschätzten Gesamtkosten für die konventionelle Bauweise 216 CHF/m³. Für Flüssigboden wurden zwei Varianten gerechnet: Beispiel A ergibt 185 CHF/m³ (-14 %), während Beispiel B 281 CHF/m³ (+30 %) beträgt.

Tabelle 5-4: Modellbasierte Lebenszykluskosten pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4).

Lebenszyklusphasen	Kiessand mit Hüllbeton [CHF/m³]	Flüssigboden – Herstellerpreis (Beispiel A) [CHF/m³]	Flüssigboden – Bottom-up-Berechnung (Beispiel B) [CHF/m³]
Herstellung und Errichtung (A1 – A5)	120	114	211
Nutzungsphase (B)	0	0	0
Entsorgung (C1 – C4)	96	71	71
Total	**216**	**185**	**281**
Differenz	-	- 14%	+30%

Beispiele A und B unterscheiden sich in der Herleitung der Bereitstellungskosten. Beispiel A basiert auf einem Herstellerpreis für das fertig aufbereitete Produkt inklusive Lieferung (Module A1 – A4). Diese Variante bildet somit einen praxisnahen Marktpreis ab. Beispiel B wurde hingegen Bottom-up berechnet, indem die Kosten der einzelnen Flüssigbodenkomponenten (z. B. Zement und Bentonit) separat pro Kilogramm ermittelt und aufsummiert wurden. Diese Vorgehensweise berücksichtigt keine Skaleneffekte oder spezifischen Einkaufskonditionen eines Herstellers. In der Praxis werden Rohstoffe in grossen Mengen beschafft, wodurch deutlich tiefere Stückpreise erzielt werden können. Die höheren Kosten in Beispiel B sind daher als konservative Annahme zu verstehen.

Die Spannweite zwischen den beiden Flüssigboden-Varianten verdeutlicht, dass die Resultate stark von den Annahmen zur Bereitstellung (insbesondere von Rohstoffpreisen, Transportdistanzen und Beschaffungsstrukturen) abhängen.

5.8.2 Praxisbasierte Lebenszykluskostenanalyse

In einem zweiten Schritt wurde eine baustellenbezogene Gesamtkostenbetrachtung vorgenommen. Im Unterschied zu Kapitel 5.8.1 basiert diese Analyse auf typischen Ausführungspositionen einer mittelgrossen Baustelle. Als Grundlage dienten standardisierte Leistungspositionen aus dem TB-Viewer, einer in der Schweizer Tiefbaubranche verwendeten Kalkulations- und Ausschreibungsdatenbank. Damit wird der Bauprozess systemischer und praxisnäher abgebildet.

Tabelle 5-5 zeigt, dass die Gesamtkosten für die konventionelle Bauweise 283 CHF/m³ betragen, während die Flüssigboden-Bauweise mit 246 CHF/m³ günstiger ist. Dies entspricht einer Kosteneinsparung von 13 % zugunsten des Flüssigbodens. Der Kostenvorteil entsteht vor allem durch den geringeren Personal- und Verdichtungsaufwand. Flüssigboden ist selbstverdichtend und kann effizienter eingebracht werden, wodurch Arbeitszeit, Maschineneinsatz und Koordinationsaufwand reduziert werden.

Tabelle 5-5: Praxisbasierte Lebenszykluskosten pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4).

Lebenszyklusphasen	**Kiessand mit Hüllbeton [CHF/m³]**	**Flüssigboden [CHF/m³]**
Herstellung und Errichtung (A1 – A5)	192	150
Nutzungsphase	0	0
Entsorgung (C1 – C4)	91	96
Total	**283**	**246**
Differenz	-	- 13%

5.8.3 Fazit der Kostenanalyse

Die Kostenanalyse zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit von Flüssigboden stark von der gewählten Kalkulationsmethodik und den getroffenen Annahmen abhängt. Während die modellbasierte Betrachtung je nach Bereitstellung sowohl Minder- als auch Mehrkosten ausweist, zeigt die praxisbasierte Analyse auf Baustellenebene einen Kostenvorteil von 13 % zugunsten des Flüssigbodens.

6 Stoffliche Bewertung und umwelttechnische Relevanz von Flüssigboden

Die bisherigen Kapitel haben die Umweltwirkungen von Flüssigboden auf Systemebene quantifiziert. Ergänzend dazu ist die lokale Umweltverträglichkeit zu beurteilen. Dabei steht im Zentrum, ob die eingesetzten Komponenten (Zement, Bentonit, Pflanzenkohle und Aushubmaterial) Schadstoffe enthalten und ob während der Nutzungsdauer ein Stoffaustrag in Boden oder Grundwasser zu erwarten ist. Im Folgenden werden die relevanten Bestandteile sowie das Eluatverhalten von Flüssigboden untersucht.

6.1 Zement

Bei den anorganischen Schadstoffen geht es vor allem um Schwermetalle wie Arsen, Zink oder Chromat aus dem Zement des Flüssigbodens. Flüssigbodenhersteller verwenden aus diesem Grund aktuell Portlandzement ohne Zusätze wie Flugaschen, Hüttensand oder Mischabbruchgranulat. Trotzdem können Schwermetalle über die eingesetzten Haupt- und Nebenbestandteile, über Calciumsulfate und die Zementzusätze in den Zement eingetragen werden. In dieser Studie wurde jedoch auch CEM III A berücksichtigt. Dabei handelt es sich um einen Hochofenzement, der sich von Portlandzement (CEM I) insbesondere durch einen höheren Anteil an Hüttensand und einen entsprechend geringeren Anteil an Portlandzementklinker unterscheidet [46].

Eine Untersuchung des Deutschen Umweltbundesamtes hat diesbezüglich gezeigt, dass die meisten Elemente innerhalb der Spannweiten von natürlichen Gesteinen liegen [46]. Gemäss der genannten Analyse können lediglich die Gehalte für Arsen, Blei, Zink und Chrom aufgrund der Rohstoffzusammensetzung und der Brennbedingungen erhöht sein. Chrom kann bis zu 20 % als toxisches Chromat (Chrom (VI)) vorliegen, das im Gegensatz zu Chrom (III) eine hohe Löslichkeit aufweist. Da der Chrom (VI)-Gehalt im Zement gemäss der Chemikalienrisikoreduktionsverordnung (ChemRRV) maximal 2mg/kg betragen darf, wird dem Zement immer ein Reduktionsmittel zugegeben, welches das Chrom (VI) zu Chrom (III) reduziert. Zudem haben Langzeittests gezeigt, dass vorhandene Schwermetalle im Zementklinker grösstenteils dort verbleiben und eingebunden werden [46]. Auch für CEM III A ist hinsichtlich der Schwermetalle gemäss der eingangs erwähnten Untersuchung keine erhöhte Belastung zu erwarten. Hochofenzement (CEM III A) weist gegenüber Portlandzement (CEM I) tendenziell tiefere Schwermetallgehalte auf, da Hüttensand in der Regel schwermetallärmer ist als Zementklinker [46].

Exkurs: Zementfreie Flüssigbodenrezepturen

Flüssigbodenrezepturen, die anstelle von Zement alternative Bindemittel (z. B. auf Flugasche- oder Mischabbruchbasis) einsetzen, sind stofflich gesondert zu beurteilen. Solche Sekundärbindemittel können, abhängig von Herkunft und Zusammensetzung, erhöhte Schwermetallgehalte sowie organische Schadstoffe enthalten. Im Vergleich zu Portlandzement ist daher mit einer grösseren Variabilität der stofflichen Qualität zu rechnen. Für einen fachgerechten Einsatz wären entsprechend projektspezifische Feststoff- und Eluatanalysen sowie belastbare Herkunftsnachweise erforderlich.

Zementfreie Flüssigbodenrezepturen waren nicht Bestandteil der in dieser Studie modellierten Szenarien, da sich derzeit noch keine Produkte im grossen Stil im Markt etabliert haben.

6.2 Bentonit

Der für Flüssigbodenrezepturen eingesetzte Compound besteht aus einer lebensmitteltauglichen Bentonitmischung. Laut Bewertung des Instituts für Umwelthygiene und Toxikologie des Ruhrgebiets (HY) hat er kein relevantes ökotoxikologisches Wirkungspotenzial auf den Boden und auf vorhandenes Grundwasser und die Verwendung aus ökotoxikologischer Sicht unbedenklich [20].

6.3 Pflanzenkohle

Beim Einsatz von Pflanzenkohle im Flüssigboden sind potenzielle Schadstoffrisiken zu berücksichtigen. Relevante Stoffgruppen sind insbesondere polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Schwermetalle, insbesondere Cr (VI), die über die eingesetzte Biomasse eingetragen oder während des Pyrolyseprozesses entstehen können. Die Qualität der Pflanzenkohle variiert je nach Biomasse und Prozessparametern. Entsprechend sind chargenspezifische Eluat- und Feststoffanalysen erforderlich, um den Schadstoffgehalt fachlich beurteilen zu können.

6.3.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

PAK entstehen bei der thermischen Umsetzung organischer Materialien während der Pyrolyse. Ein systematisches Review zeigt, dass die Gesamtgehalte an PAK in Pflanzenkohlen typischerweise im Bereich von etwa 0.1 – 100 mg/kg liegen [47]. Diese grosse Bandbreite ist darauf zurückzuführen, dass die höchsten PAK-Gehalte vor allem bei Holzvergasern und in schlecht kontrollierten, traditionellen Pyrolyseanlagen auftreten, wo Pyrolysegase nicht sauber abgeführt werden und teer- bzw. gasförmige PAK auf der Kohle kondensieren können. In gut geführten, modernen Anlagen mit geregelter Gasabführung liegen die PAK-Gehalte demgegenüber meist im Bereich von nur wenigen mg/kg.

Für Pflanzenkohle bestehen in der Schweiz keine spezifischen Grenzwerte in der Abfallverordnung VVEA. Soll Pflanzenkohle als Dünger in Verkehr gebracht werden, erfolgt die Zulassung im Rahmen der Düngerverordnung (DüV, SR 916.171) durch das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) [32]. Voraussetzung dafür ist, dass naturbelassenes Holz als Ausgangsmaterial verwendet wird und die weiteren Bedingungen gemäss Merkblatt «Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle» eingehalten werden. Diese stützen sich insbesondere auf die Vorgaben der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) sowie auf Qualitätsstandards wie das European Biochar Certificate (EBC) [32].

Wird Pflanzenkohle gemäss DüV bewilligt und als Dünger in Verkehr gebracht, gilt sie rechtlich als Produkt und fällt in dieser Eigenschaft nicht unter den Geltungsbereich der VVEA. In der Praxis orientieren sich gewerbliche Produzenten häufig am European Biochar Certificate (EBC, Klasse 1 oder 2). Das EBC ist ein privates Zertifizierungssystem und stellt keine eigenständige Rechtsnorm dar. Für Pflanzenkohlen, die in der Schweiz in der Landwirtschaft eingesetzt werden dürfen, gilt für die Summe der 16 EPA-PAK ein Grenzwert von 4 mg/kg Trockensubstanz (TS) gemäss Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) [48]. Die Einhaltung der EBC-Grenzwerte kann als Hinweis auf die stoffliche Qualität dienen, ersetzt jedoch nicht die rechtliche Zulassung nach DüV.

Für den Einsatz von Pflanzenkohle im Flüssigboden bedeutet dies: Wird qualitätsgesicherte, DüV-konforme Pflanzenkohle aus naturbelassenen Ausgangsstoffen verwendet, ist das PAK-Risiko aus stofflicher Sicht als gering einzustufen. Für Pflanzenkohlen, die nicht als Produkt zugelassen sind, fehlt derzeit jedoch eine klare rechtliche Grundlage für eine abschliessende Beurteilung des Einsatzes im Flüssigboden.

6.3.2 Schwermetalle

Schwermetalle in Pflanzenkohle stammen nicht aus dem Pyrolyseprozess, sondern hauptsächlich aus dem eingesetzten Ausgangsmaterial, da Metalle im Gegensatz zu organischen Schadstoffen nicht abgebaut werden können. Während der Pyrolyse können sie sich sogar anreichern, weil flüchtige Bestandteile der Biomasse entweichen und der mineralische Anteil relativ zunimmt. Die Qualität der Pflanzenkohle hängt daher primär von der Reinheit des Ausgangsmaterials [47], [48].

Für den Einsatz im Tiefbau gelten zudem die Anforderungen der VVEA. Für eine potenzielle spätere Ablagerung auf einer Deponie Typ B müssen die entsprechenden Feststoff-Grenzwerte eingehalten werden (VVEA, Anhang 5) [49]. Pflanzenkohlen aus forstwirtschaftlichen Reststoffen erfüllen diese Vor-

gaben in der Regel problemlos, sofern keine kontaminierten Ausgangsmaterialien (z. B. belastetes Altholz) verwendet wurden. Tabelle 6-1 zeigt einen Vergleich der Schwermetallgehalte gemäss EBC-AgroBio mit den Feststoff-Grenzwerten für Deponien Typ B sowie die rechnerisch resultierenden Schwermetallkonzentrationen im Flüssigboden bei moderatem bzw. maximalem Pflanzenkohleanteil. Die Konzentrationen im Flüssigboden wurden über den jeweiligen Massenanteil der Pflanzenkohle und die Dichte des Flüssigbodens ermittelt.

Tabelle 6-1: Vergleich der Schwermetallkonzentration der Pflanzenkohle und der Anwendung in Flüssigboden mit den Grenzwerten des Deponie Typs B.

Stoff	**Deponie Typ B Grenzwert, VVEA [mg/kg TS]** [49]	**EBC-AgroBio [mg/kg TS]** [48]	**Pflanzenkohle im Flüssigboden mit PK [mg/kg FB]**	**Pflanzenkohle im Flüssigboden mit max. PK [mg/kg FB]**
Antimon	30	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe
Arsen	30	13	0.12	0.33
Blei	500	45	0.42	1.16
Cadmium	10	0.7	0.01	0.02
Chrom gesamt	500	70	0.65	1.80
Chrom (VI)	0.1	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe
Kupfer	500	70	1	2
Nickel	500	25	0.23	0.64
Quecksilber	2	0.4	0.00	0.01
Zink	1’000	200	2	5

6.4 Aushubmaterial

Die stoffliche Qualität des eingesetzten Aushubmaterials ist für die Umweltverträglichkeit von Flüssigboden von zentraler Bedeutung. Während die Zuschlagstoffe wie Zement oder Pflanzenkohle produktspezifisch geprüfte Schadstoffgehalte aufweisen, können standortspezifische Belastungen des Flüssigbodens aus dem verwendeten Aushubmaterial resultieren. Dieses unterliegt im Rahmen des Bauvorhabens der abfallrechtlichen Beurteilung gemäss VVEA [49].

Ein besonderer Fokus liegt derzeit auf per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), da diese persistent sind und in belasteten Böden auftreten können. Allfällige PFAS-Belastungen im Flüssigboden gehen ausschliesslich auf entsprechend belastetes Aushubmaterial zurück. Ob solches Material zu Flüssigboden aufbereitet und verwertet werden darf, hängt vom jeweiligen Belastungsgrad sowie von der Einhaltung der massgeblichen Grenzwerte ab. Nur unverschmutztes Aushubmaterial gemäss Anhang 3 Ziffer 1 VVEA darf für die Herstellung von Flüssigboden verwendet werden. Respektive darf schwach verschmutztes Aushubmaterial nach Anhang 3 Ziffer 2 VVEA am Ort des Anfalls als Flüssigboden verwertet werden [49].

Beim späteren Rückbau bleibt eine allfällige PFAS-Belastung im Aushubmaterial grundsätzlich erhalten, da diese Stoffe nicht abgebaut werden. Wird belastetes Material erneut als Flüssigboden eingesetzt, kann es theoretisch zu einer Anreicherung über mehrere Nutzungszyklen kommen. In der vorliegenden Studie wird für Flüssigboden eine Nutzungsdauer von 100 Jahren angenommen. Eine potenzielle Anreicherung von persistenten Stoffen wie PFAS über mehrere Nutzungszyklen wäre somit nur in sehr

langen Zeiträumen und bei wiederholter Wiedereinbringung belasteten Materials relevant. Eine kurzfristige Akkumulation ist unter üblichen Bau- und Erneuerungsintervallen nicht zu erwarten. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass beim späteren Rückbau keine eindeutige stoffliche oder visuelle Unterscheidung zwischen ursprünglich eingebrachtem Flüssigboden und natürlichem Bodenmaterial möglich ist. Die spätere abfallrechtliche Beurteilung erfolgt daher auf Basis des dann vorliegenden Aushubmaterials als Gesamtheit.

6.5 Eluatverhalten und Grundwasserrelevanz

Zur Beurteilung der potenziellen Umweltwirkungen des Einsatzes von Flüssigboden wurden vorliegende Eluatuntersuchungen sowie hydrogeologische Überwachungsberichte ausgewertet [20]. Die Beurteilung stützt sich auf durchgeführte Eluatversuche, behördliche Stellungnahmen sowie projektbezogene Grundwasserüberwachungen. Mehrere Hersteller (RSS-Flüssigboden®, KIBAG, Logbau AG, Eco-Soil AG) stellten dem Autor Prüfberichte aus VVEA-konformen Eluatversuchen zur Akteneinsicht zur Verfügung. Die Berichte wurden vertraulich eingesehen, weiterführende Auskünfte sind bei den jeweiligen Herstellern erhältlich.

6.5.1 Eluatversuche

Die ausgewerteten Eluatversuche zeigen übereinstimmend [20]:

- keinen relevanten Austritt von Schwermetallen,
- keine auffälligen organischen Schadstoffe
- geringe eluierbare Schadstoffgehalte

Auch bei Systemen mit alternativen Bindemitteln (z. B. Holzasche in Ragazer Erdbeton® bzw. Ragazer Flüssigboden®) wurden umfangreiche Labor- und Pilotversuche durchgeführt. Trotz potenziell erhöhter Schwermetallgehalte in Aschen konnten keine nennenswerten Auswaschungen festgestellt werden.

6.5.2 Grundwasserüberwachung

Im Zusammenhang mit konkreten Bauprojekten wurden im Kanton Schwyz projektbezogene Grundwasserüberwachungen durchgeführt. Untersucht wurden unter anderem pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Ammonium, Sulfat sowie Schwermetalle. Die Überwachungen zeigten [20]:

- zeitweise leichte Erhöhungen des pH-Wertes (ca. +0.5 pH-Einheiten),
- vorübergehend erhöhte Leitfähigkeits- und Sulfatwerte,
- keine nachweisbaren relevanten Schwermetall- oder organischen Schadstoffeinträge.

Die erhöhten Parameter normalisierten sich innerhalb von rund 9 bis 12 Monaten nach Einbau. Die zuständigen Behörden kamen zum Schluss, dass der Einbau von Flüssigboden keine stärkeren Auswirkungen auf das Grundwasser verursacht als konventionelle Bauweisen. Der Einsatz wurde daraufhin im Gewässerschutzbereich Au[11] zugelassen.

6.5.3 Hydraulische Durchlässigkeit

Neben den stofflichen Prüfungen ist auch die hydraulische Durchlässigkeit (k_f-Wert) für die Beurteilung des potenziellen Strofftransports relevant. Flüssigboden weist je nach Ausgangsmaterial typischerweise eine Wasserdurchlässigkeit im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-10} m/s auf [20]. Durch die Aufbereitung

[11] Der Bereich Au umfasst nutzbare unterirdische Gewässer sowie die angrenzenden Gebiete, die zu deren Schutz erforderlich sind.

und Rückverfestigung reduziert sich der k_f-Wert gegenüber dem ursprünglichen Aushubmaterial häufig um etwa eine Zehnerpotenz. Eine geringere Durchlässigkeit kann das potenzielle Wassertransportvolumen und damit auch den Stofftransport begrenzen.

6.6 Fazit der stofflichen Bewertung von Flüssigboden

Die stoffliche Bewertung zeigt, dass Flüssigboden bei fachgerechter Herstellung und normkonformer Anwendung aus umwelttechnischer Sicht als unproblematisch einzustufen ist. Die eingesetzten Komponenten weisen, bei Einhaltung der geltenden Qualitätsanforderungen, keine relevanten Schadstoffgehalte oder Auswaschungspotenziale auf. Eluatversuche sowie Grundwasserüberwachungen bestätigen, dass kein signifikanter Stoffaustrag in Boden oder Grundwasser zu erwarten ist.

Allfällige standortspezifische Belastungen resultieren primär aus dem eingesetzten Aushubmaterial und sind projektspezifisch gemäss abfall- und umweltrechtlichen Vorgaben zu beurteilen.

7 Technische Einordnung und Anwendung von Flüssigboden

Dieses Kapitel ordnet Flüssigboden aus technischer Sicht ein und stellt ihn der konventionellen Bauweise im Leitungsbau gegenüber. Ziel ist es, die systemischen Unterschiede, Einsatzgrenzen und technischen Besonderheiten darzustellen sowie die Eignung für unterschiedliche Anwendungsfälle zu bewerten.

7.1 Technische Daten

Die nachfolgenden Materialkennwerte hängen wesentlich von der Bodenart des eingesetzten Aushubs ab und zeigen eine entsprechende Bandbreite. Typische technische Parameter des Flüssigbodens, jeweils abhängig von der Bodenklassifikation nach DIN 18196, sind [50]:

- Rohdichte: 1.6 – 2.1 kg/dm³ (Einbau-/Endzustand identisch)
- Druckfestigkeit nach DIN 18136: 28 Tage = 0.1-0.8 N/mm²
- Lösbarkeit nach DIN 18300: Bodenklasse[12] 3-5
- EV2[13]-Wert nach DIN 18134: nach 28 Tage > 45 MN/m²
- Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18310: 10^{-5} – 10^{-10} m/s

7.2 Technische Abgrenzung gegenüber der konventionellen Bauweise

Wie im Kapitel 1.2 bereits erwähnt, ist Flüssigboden technisch als zeitweise fliessfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff einzuordnen. Im Leitungsbau steht er in direktem Vergleich zur konventionellen Bauweise mit Hüllbeton im Rohrbereich und Kiessand in der darüberliegenden Leitungszone.

In der konventionellen Bauweise wird das Rohr zunächst lagegesichert, häufig durch Hüllbeton. Darüber erfolgt der lagenweise Einbau von Kiessand als Rohr- bzw. Leitungszone, bevor der restliche Graben mit geeignetem Material verfüllt und verdichtet wird. Dieses System erzeugt klar abgegrenzte Materialschichten mit unterschiedlichen Steifigkeiten und Verdichtungszuständen. Flüssigboden basiert hingegen auf einer homogenen Verfüllstrategie. Das Material wird in fliessfähigem Zustand eingebracht, umschliesst das Rohr vollständig und verdichtet sich selbstständig. Nach dem Einbau erfolgt die Rückverfestigung. Ziel ist ein möglichst homogener Verfüllkörper, der sich hinsichtlich Verformungsmodul, Setzungsverhalten und Konsolidierung vergleichbar zum umgebenden Boden verhält. Die Rückverfestigung erfolgt friktional-kohäsiv unter weitgehender Erhaltung der bodenmechanischen Charakteristik des Ausgangsmaterials.

Ein weiterer Unterschied betrifft den mechanischen Schutz und die Erkennbarkeit der Leitungszone bei späteren Eingriffen. In der konventionellen Bauweise stellt der Hüllbeton eine klar definierte, feste Schutzschicht um das Rohr dar. Diese kann beim Rückbau sowohl visuelle als auch mechanisch erkennbar sein und bietet einen gewissen Widerstand gegen unbeabsichtigtes Beschädigen durch Baggerarbeiten. Bei Flüssigboden entsteht hingegen ein homogener Verfüllkörper ohne ausgeprägte harte Abgrenzungsschicht. Beim späteren Aufbruch kann die Leitungszone dadurch weniger klar erkennbar sein. Hier besteht das Risiko, dass bei unvorsichtigem Maschineneinsatz das Rohr beschädigt werden könnte.

[12] Unterteilung von Böden im Baugewerbe nach der Lösbarkeit und den erdbautechnischen Eigenschaften in insgesamt sieben Boden- und Felsklassen (vereinfachend umgangssprachlich «Bodenklassen» genannt). Die Einteilung geht von Bodenklasse 1 «Oberboden» bis hin zu Bodenklasse 7 «schwer lösbarer Fels».

[13] Verformungsmodul, beschreibt das Spannungsverformungsverhalten von Böden bei behinderter Seitenausdehnung, z.B. im Plattendruckversuch.

Dieses Risiko ist jedoch stark abhängig von der Leitungsdokumentation, der Einhaltung von Ortungs- und Sondierungsverfahren sowie der Ausführungspraxis beim Rückbau.

Ein weiterer systemischer Unterschied betrifft den erforderlichen Arbeitsraum im Graben. Da Flüssigboden ohne mechanische Verdichtung eingebaut wird, kann der seitliche Arbeitsraum unter bestimmten Voraussetzungen reduziert werden (siehe Kapitel 5.4). In der konventionellen Bauweise ist hingegen oberhalb des Hüllbetons weiterhin ein seitlicher Arbeitsraum für den lagenweisen Einbau und die Verdichtung des Kiessands erforderlich. Ob eine solche Reduktion zulässig ist, hängt jedoch von den jeweiligen sicherheitstechnischen und baubetrieblichen Randbedingungen ab und ist projektspezifisch zu prüfen. Mit der in Erarbeitung befindlichen SIA 4016 ist zu erwarten, dass die Voraussetzungen, Anwendungsbereiche und Mindestanforderungen für eine solche Reduktion künftig klarer geregelt werden.

Technisch ergeben sich daraus folgende systemische Unterschiede zur konventionellen Bauweise:

- Wegfall der lagenweisen Verdichtung
- Vermeidung von Schichtgrenzen innerhalb der Verfüllung
- reduzierte Steifigkeitssprünge zwischen Rohrzone und Umgebungsboden
- gute Lösbarkeit im Rückbau
- Fehlende harte Abgrenzungsschicht um das Rohr
- Potenziell reduzierter seitlicher Arbeitsraum und damit einhergehende Materialeinsparungen

Für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Standardanwendungen im Leitungsbau ist Flüssigboden als grundsätzlich geeignete Alternative zur konventionellen Bauweise einzuordnen. Die wesentlichen Unterschiede liegen dabei weniger in der grundsätzlichen Tragfunktion sondern vielmehr im Einbauprinzip, in der Homogenität des Verfüllkörpers und in den Anforderungen an Qualitätssicherung und projektspezifische Bemessung.

7.3 Technische Rahmenbedingungen und Qualitätssicherung

Die Analyse der relevanten Schweizer Normen zeigt, dass Flüssigboden bislang nicht vollständig normativ erfasst ist. Ein eigenständiges, verbindliches Normdokument existiert derzeit nicht. Allerdings befindet sich mit der SIA 4016 derzeit ein eigenständiges Regelwerk zu Flüssigboden in Erarbeitung, das künftig eine zentrale Rolle bei der technischen und normativen Einordnung spielen wird [4].

Das SIA 4016 wird innerhalb der SIA-Kommission 190 (Kanalisationsbau) erarbeitet und geht über eine reine Begriffsdefinition hinaus. Es behandelt insbesondere:

- die Abgrenzung zu hydraulisch gebundenen Materialien,
- Anforderungen an Baugrund und Bemessung,
- Vorgaben zu Einbau, Rückverfestigung und Festigkeitsentwicklung,
- Aspekte des Auswaschverhaltens und der Qualitätssicherung,
- sowie Fragen der Umweltbewertung, Entsorgung und des Bodenschutzes.

Damit wird erstmals ein gesamtheitlicher Rahmen für Planung, Ausführung und Rückbau von Flüssigbodenanwendungen in der Schweiz geschaffen [4].

Bis zur Veröffentlichung der SIA 4016 erfolgt die technische Beurteilung in der Praxis unter Rückgriff auf bestehende Regelwerke wie die SIA 190:2017, einschlägige VSS-Merkblätter oder die SN 592000. Internationale Regelwerke wie die RAL GZ 507 bieten zudem eine praxiserprobte Orientierung hinsichtlich Anforderungen an Pumpbarkeit, Wassergehalt und Rückverfestigung [2].

Keine der bestehenden Normen schliesst den Einsatz von Flüssigboden explizit aus. Normative Einschränkungen ergeben sich vielmehr indirekt aus den geforderten technischen Nachweisen. Schweizer Regelwerke wie die SN 592000 verlangen, dass Rohrbettung und -umhüllung statisch bemessen und an die Einbausituation angepasst werden. Entscheidend ist dabei nicht der eingesetzte Baustofftyp, sondern die Erfüllung der geforderten Trag- und Verformungskriterien. In Abhängigkeit von Verkehrslasten, Einbautiefe, Baugrundverhältnissen oder Auftriebssituationen kann es erforderlich sein, erhöhte Steifigkeiten oder zusätzliche Sicherungsmassnahmen vorzusehen. Ob diese Anforderungen mit konventionellen Systemen (z. B. Hüllbeton und Kiessand) oder mit Flüssigboden erfüllt werden können, ist projektspezifisch nachzuweisen. Die technische Zulässigkeit hängt somit nicht primär vom Bindemitteltyp ab, sondern von der Erfüllung der jeweiligen Bemessungskriterien. Die in Erarbeitung befindliche SIA 4016 soll diese Abgrenzung künftig klarer strukturieren und Anwendungsbereiche sowie Mindestanforderungen systematisch definieren.

Die nachfolgende Auflistung fasst die wesentlichen Anforderungen an die Qualitätssicherung bei der Herstellung und Anwendung von Flüssigboden zusammen und kann Bauerschaften in der Ausarbeitung eines Anforderungskatalogs für Flüssigboden unterstützen. Sie stützt sich im Wesentlichen auf die RAL-GZ 507 als derzeit wichtigstes Orientierungsdokument [2]. Die beschriebenen Elemente entsprechen im Grundsatz einer strukturierten Qualitätssicherung, wie sie zur Sicherstellung einer konstanten Materialqualität ohnehin erforderlich ist. Mit der in Erarbeitung befindlichen SIA 4016 ist zu erwarten, dass diese Anforderungen künftig für die Schweiz klarer geregelt werden.

Gütesicherungsplan

Bis zur Veröffentlichung eines eigenständigen Schweizer Regelwerks kommt der projektspezifischen Qualitätssicherung eine besondere Bedeutung zu. Für jedes Bauvorhaben sollte ein Gütesicherungsplan erstellt werden, der Herstellung, Einbau und Prüfung des Flüssigbodens verbindlich regelt. Ein solcher Plan dient in erster Linie der transparenten Festlegung von Zuständigkeiten, Prüfgrössen und Vorgehensweisen und entspricht damit im Grundsatz einer guten fachlichen Praxis. Er sollte mindestens enthalten:

- Projektbeschreibung und Randbedingungen
- Verantwortlichkeiten (Auftraggeber, Planer, Baugrundgutachter, Hersteller, Bauunternehmung)
- Beschreibung des eingesetzten Aushubmaterials
- Festlegung interner und externer Qualitätskontrollen
- Prüfkriterien und zulässige Toleranzen
- Vorgehen bei Abweichungen
- Regelungen bei Auftreten von kontaminiertem Aushub
- Arbeitsschutzmassnahmen

Anforderung an Flüssigbodenhersteller

Der Hersteller hat die technischen Eigenschaften des Materials nachzuweisen. Dazu gehören insbesondere:

- Lösbarkeit (Bodenklasse 3 – 5)
- Druckfestigkeit (z. B. nach DIN 18136)
- Ausbreitmass an der Entladestelle
- Absetzmass

- Dokumentation von Herstell- und Einbauzeit (z. B. Lieferschein mit Zeitangaben)

Die Dichte des Flüssigbodens wird wesentlich durch das verwendete Aushubmaterial bestimmt. Die Rezeptur ist daher projektspezifisch auf Bodenart, Bauweise und Einbaubedingungen abzustimmen. Voraussetzung hierfür ist eine fachgerechte Bodenansprache sowohl des Ausgangs- als auch des Umgebungsmaterials.

Qualitätskontrollen Flüssigboden

Zur Sicherstellung einer konstanten Materialqualität sind Eigen- und Fremdüberwachung vorzusehen. Im Rahmen der Eigenüberwachung erfolgen typischerweise:

- Sichtprüfung des Aushubmaterials
- Bestimmung des Feuchtegehalts
- Kontrolle des Ausbreitmasses

Zusätzlich sollten in definierten Produktionsintervallen (z. B. 200 – 500 m^3) Probekörper hergestellt und hinsichtlich bautechnischer und bodenmechanischer Eigenschaften geprüft werden (z. B. nach DIN 18136). Die Fremdüberwachung sollte durch ein spezialisiertes und zertifiziertes Bauprüflabor erfolgen.

Einbau und Dokumentation

Der Einbau erfolgt in der Regel mittels Fahrmischer mit Schlauch. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten können zusätzliche Einbauhilfen wie Betonpumpen, Schüttrohre oder Trichter erforderlich sein. Eine lückenlose Dokumentation des Einbaus (Einbautagebuch) ist empfehlenswert. Sie erhöht die Nachvollziehbarkeit, erleichtert die Qualitätssicherung und reduziert spätere Haftungsrisiken.

Haftungs- und Verantwortungsregelung

Da die Materialeigenschaften stark von der projektspezifischen Rezeptur abhängen, ist eine klare Regelung der Verantwortlichkeiten erforderlich. In der Praxis liegt die Verantwortung für die Rezeptur in der Regel beim Flüssigbodenhersteller.

Statische Nachweise, insbesondere hinsichtlich Rohrstatik (z.B. Überdeckung) oder besonderen Belastungssituationen, sind projektspezifisch zu klären. Es ist sicherzustellen, dass entsprechende Versicherungsdeckungen bestehen.

7.4 Überblick bestehender Anwendungen und Erfahrungen

Die Auswertung bestehender Anwendungen in der Schweiz, in Deutschland und in Österreich zeigt, dass Flüssigboden seit vielen Jahren erfolgreich in einer Reihe typischer Tiefbauanwendungen eingesetzt wird [20]. Die dokumentierten Erfahrungen deuten darauf hin, dass die im Rahmen dieser Studie betrachteten Anwendungen in den meisten Fällen technisch unkritisch sind, sofern die projektspezifischen Randbedingungen berücksichtigt und die erforderlichen Nachweise erbracht werden.

Mittlerweile sind über 190 verschiedene Einsatzbereiche dokumentiert, vor allem im Tiefbau. Nachfolgend werden die wichtigsten Anwendungsfelder dargestellt und in unkritische sowie potenziell kritische Einsatzbereiche unterteilt [51].

7.4.1 Unkritische Anwendungsfelder

Diese Einsatzbereiche gelten als technisch etabliert, da hier die materialtypischen Eigenschaften des Flüssigbodens den funktionalen Anforderungen vollständig entsprechen [51].

- Grabenverfüllungen im Leitungs- und Kabelbau (inkl. Kanalisationsrohrverlegungen)
- Bettungs- und Schutzschichten sowie Verfüllungen im Fernwärmeleitungsbau
- Hohlraum- und Baugrubenverfüllungen
- Leitungszonen mit geringen mechanischen Lasten
- Trassenbau für Standard-Kabel
- Erschütterungsentkopplungen in gering belasteten Bereichen
- Trockenlegungen
- Einbau in Bereichen mit ausreichendem Abstand zum Grundwasser (> 2 m), sofern keine erhöhten hydrogeologischen Sensitivitäten vorliegen
- Abschottung kontaminierter Böden

In diesen Einsatzbereichen entspricht das geforderte Materialverhalten, rieselfähig, selbstverdichtend, rückverfestigend und bodenähnlich, den Eigenschaften aller Rezepturvarianten. Zementfreie und pflanzenkohlebasierten Varianten sind hier ohne Einschränkungen einsetzbar.

Ergänzende Rückmeldungen aus der Praxis zeigen zudem, dass in vielen Leitungsbauprojekten auch bei grösseren Überdeckungen auf Betonummantelungen verzichtet werden kann, sofern die statischen Anforderungen durch Rohrtyp, Bettung und Einbaubedingungen nachgewiesen sind. Dies spricht dafür, dass die hier betrachteten Standardanwendungen in einem grossen Teil der Fälle technisch nicht als kritisch einzustufen sind. Beispielhafte Typenstatiken für Stahlbetonrohre gemäss SIA 190 / SIA 261 bestätigen dies und zeigen, dass Überdeckungsbereiche von mehreren Metern auch bei Verwendung ungebundener Bettungs- und Verfüllmaterialien (z. B. Kies/Sand) ohne Betonummantelung nachweisbar sind (siehe Anhang E). Dies deutet darauf hin, dass Betonummantelungen in vielen Standardanwendungen nicht grundsätzlich erforderlich sind.

7.4.2 Potenziell kritische Anwendungsfelder

In diesen Bereichen können erhöhte technische Anforderungen oder normative Vorgaben dazu führen, dass bestimmte Rezepturen zusätzliche Prüfungen oder projektspezifische Nachweise erfordern [51].

- Verkehrsflächen mit hohen dynamischen Lasten (EV_2-Werte, Verdichtungs- und Verformungsanforderungen)
- Frost-/Tausalz-exponierte Bereiche (Strassenrandzonen, Winterdienstbereiche)
- Rohrbettungen nach streng geregelten Normen (z. B. SN 592000, Spezialleitungen)
- Bauwerke in unmittelbarer Grundwassernähe oder im Gewässerschutzbereich Au/Ao[14]
- Bauvorhaben in Grundwasserschutzzonen, bei denen pH-Veränderungen oder Sulfatmobilisierung relevant sein können
- Anwendungen im Bereich von Altlasten mit Überwachungskonzepten (Einfluss auf pH/eh-Parameter möglich)

[14] Der Bereich Au umfasst nutzbare unterirdische Gewässer sowie die angrenzenden Gebiete, die zu deren Schutz erforderlich sind. Der Bereich Ao umfasst oberirdische Gewässer und deren Uferbereiche, soweit diese für eine besonders Nutzung, beispielsweise zur Trinkwasserversorgung, geschützt werden müssen.

Hier können einzelne Eigenschaften, beispielsweise Festigkeitsentwicklung, Wasserdurchlässigkeit, Dauerhaftigkeit oder karbonatisierungsrelevante Parameter, je nach Rezeptur variieren. Dies gilt zum Beispiel für Rezepturen mit hohem Pflanzenkohleanteil, die zwar bezüglich Kohlenstoffspeicherung vorteilhaft sind, aber mechanisch-technisch noch weniger standardisiert.

Für bewährte Standardrezepturen kann auf bestehende Erfahrungswerte und Nachweise zurückgegriffen werden. Bei innovativen oder deutlich abweichenden Zusammensetzungen empfiehlt es sich jedoch, ergänzende Prüfungen vorzusehen und die Eignung im konkreten Anwendungsfall zu überprüfen. Langfristig könnte eine stärkere Standardisierung, etwa im Rahmen der in Erarbeitung befindliche SIA 4016, dazu beitragen, wiederkehrende Anwendungen klarer zu definieren und die Skalierbarkeit des Verfahrens zu erhöhen. Ziel wäre es, projektspezifische Zusatzprüfungen auf Sonderfälle oder innovative Varianten zu beschränken.

Im Sinne des RSS®-Flüssigbodenverfahrens nach RAL-GZ 507 umfasst dies eine systematische Fachplanung mit baugrundbezogener Modellierung, anwendungsspezifischer Rezepturentwicklung, funktionsbezogenen Nachweisen (z.B. Schwindungsfreiheit, Relaxations- und Schwingungsdämpfungsverhalten, Wärmeleitfähigkeit) sowie einer durchgängigen Gütesicherung durch anerkannte Prüfinstitutionen [51].

7.4.3 Eignungsmatrix der Flüssigbodenvarianten

Die Matrix in Tabelle 7-1 stellt die wesentlichen Anwendungsfelder der vier untersuchten Flüssigbodenrezepturen gegenüber. Sie zeigt auf einen Blick, in welchen Bereichen eine klare Eignung besteht (grün), wo projektspezifische Prüfungen notwendig sind (orange) und in welchen Fällen besondere Risiken oder Einschränkungen berücksichtigt werden müssen (rot). Die qualitative Bewertung der Eignung stützt sich neben der Literatur [20] insbesondere auf dokumentierte Referenzprojekte des RSS®-Flüssigbodenverfahrens [51].

Tabelle 7-1: Matrix der Anwendungsfelder und der Eignung der Flüssigbodenrezepturen basierend auf Literaturrecherche [20], [51]. «Grün» steht für etablierte Anwendungen. «Orange» erfordert projektspezifische Nachweise. «Rot» kennzeichnet Anwendungen mit unzureichender Datenlage oder erhöhtem Risiko.[15]

Einsatzfeld	**Flüssigboden**	**Verbesserter Flüssigboden**	**Flüssigboden mit Pflanzenkohle**	**Flüssigboden mit maximalen Pflanzenkohleanteil**
Grabenverfüllungen im Leitungs- und Kabelbau (inkl. Kanalisationsrohrverlegungen)				
Fernwärmeleitungsverlegungen				
Bettungs- und Schutzschichten				
Trassenbau für Standard-Kabel				
Hohlraum- und Baugrubenverfüllungen				
Erschütterungsentkopplungen				
Trockenlegungen				
Einbau >2 m über Grundwasserspiegel				
Abschottung kontaminierter Böden				
Verkehrsflächen / dynamische Lasten				
Frost-/Tausalzbereiche				
Rohrbettungen SN 592000				
Fundamentunterlagen				
Gleisbau / Schwingungsentkopplung				
Einbau <2 m über GW-Spiegel				
Gewässerschutzbereiche Au/Ao				
pH-/eh-sensitive Gebiete				
Altlasten mit Monitoring				
Rückbauverpflichtete Anlagen (VVEA)				
Wasserbau (strömungsrelevant)				

[15] Die dargestellte Bewertung der Eignung der Flüssigboden-Varianten basiert auf dem aktuellen Stand der Literatur, auf Projekterfahrungen sowie auf fachlicher Einschätzung. Sie ist als vorläufige Einordnung zu verstehen. Für einzelne Anwendungsfelder sind weitere Abklärungen, projektspezifische Prüfungen und zusätzliche Langzeiterfahrungen erforderlich.

7.5 Empfehlungen für den Praxiseinsatz

Flüssigboden kann für einen grossen Teil typischer Tiefbauanwendungen als technisch geeignet eingestuft werden. Dies betrifft insbesondere Grabenverfüllungen im Leitungs- und Kabelbau, Hohlraum- und Baugrubenverfüllungen, Bettungs- und Schutzschichten sowie Anwendungen mit geringen bis moderaten mechanischen Beanspruchungen. Für diese Standardanwendungen erfüllen sowohl herkömmliche als auch verbesserte Flüssigbodenrezepturen die funktionalen Anforderungen zuverlässig. Auch Varianten mit Pflanzenkohle sind in diesen Bereichen grundsätzlich einsetzbar, sofern die materialtechnischen Anforderungen erfüllt sind.

Bei Anwendungen mit hohen dynamischen Verkehrslasten, in Frost-/Tausalzbereichen, bei normativ geregelten Rohrbettungen (z. B. SN 592000), in grundwassernahen Situationen oder in sensiblen Gewässerschutzbereichen ist die Eignung projektspezifisch zu prüfen. In diesen Fällen können zusätzliche Nachweise oder ergänzende Prüfungen erforderlich sein. Rezepturen mit hohem Pflanzenkohleanteil können aufgrund geringerer Festigkeitsreserven ebenfalls zusätzliche Nachweise erfordern.

Hydraulisch gebundene Systeme mit Hüllbeton sind insbesondere dann zweckmässig, wenn hohe Einzellasten gefordert sind. Flüssigboden bietet demgegenüber Vorteile in der Systemintegration. Durch die homogene Verfüllstruktur werden Steifigkeitssprünge innerhalb des Grabens reduziert, was sich positiv auf das Setzungsverhalten auswirken kann. Gleichzeitig bleibt der Verfüllkörper in der Regel gut lösbar, was die spätere Zugänglichkeit und Anpassungsfähigkeit von Leitungsnetzen erleichtert.

Rückmeldungen aus der Praxis sowie Erfahrungen aus Deutschland und Österreich zeigen, dass in vielen Leitungsbauprojekten auch ohne Betonummantelung grosse Überdeckungsbereiche technisch beherrschbar sind, sofern die Rohrstatik, Bettung und Einbausituation entsprechend nachgewiesen und ausgeführt werden. Dies bestätigt, dass die technische Eignung nicht pauschal am Vorhandensein einer Betonummantelung festzumachen ist.

Für den Praxiseinsatz wird empfohlen, Flüssigboden insbesondere dort zu prüfen, wo konventionelle Bauweisen mit Hüllbeton ersetzt werden können oder wo durch den Wegfall der mechanischen Verdichtung eine reduzierte Grabenbreite möglich ist. Die Wahl der Rezeptur sollte stets an die projektspezifischen Anforderungen hinsichtlich Lastabtragung, Dauerhaftigkeit, Grundwassersituation und normativer Vorgaben angepasst werden.

7.6 Weiterer technischer und normativer Handlungsbedarf

Obwohl Flüssigboden technisch breit einsetzbar ist, besteht im Hinblick auf Normierung, Standardisierung und die stoffliche Verwertung von rückgebautem Flüssigboden noch Weiterentwicklungsbedarf.

Mit der in Erarbeitung befindliche SIA 4016 wird erstmals eine schweizweit einheitliche technische Grundlage geschaffen. Künftig wäre jedoch eine weitergehende Standardisierung von Leistungsanforderungen, Prüfmethoden und Dokumentationspflichten sinnvoll, um die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Rezepturen zu verbessern und die Skalierung im Markt zu erleichtern.

Ein weiterer Aspekt betrifft die langfristige Materialtransparenz. Flüssigboden bildet nach dem Einbau einen homogenen Verfüllkörper, der beim späteren Rückbau nicht ohne Weiteres vom umgebenden Boden unterscheidbar ist. Vor dem Hintergrund der in dieser Studie angenommenen Nutzungsdauer von 100 Jahren gewinnt daher eine systematische Dokumentation an Bedeutung. Analog zu Material- oder Gebäudepässen im Hochbau könnte im Tiefbau künftig eine standardisierte Erfassung der eingebauten Materialien erfolgen. Dies würde Informationen zu Rezeptur, Einbauort und stofflicher Qualität enthalten und die spätere Beurteilung beim Rückbau erleichtern und im Hinblick auf Kreislaufwirtschaft, Verwertung und den Umgang mit potenziell belastetem Material von Vorteil sein.

8 Abfallrechtliche Einordnung von Flüssigboden

Neben der technischen und ökologischen Bewertung stellt sich die Frage, wie Flüssigboden am Ende seiner Nutzungsdauer abfallrechtlich einzuordnen ist. Während der Nutzungsphase verbleibt das Material dauerhaft im Untergrund, beim späteren Rückbau fällt es jedoch als Aushubmaterial an und unterliegt damit den geltenden abfallrechtlichen Bestimmungen.

Im Rahmen dieser Studie wurde angenommen, dass beim Rückbau rund 50 % des anfallenden Materials verwertet und 50 % abgelagert werden. Vor diesem Hintergrund ist zu klären, unter welchen rechtlichen Voraussetzungen eine Verwertung zulässig ist und welche Anforderungen für eine allfällige Entsorgung gelten.

Die folgende abfallrechtliche Einordnung wurde in Abstimmung mit dem BAFU verfasst:

Flüssigboden besteht zu einem überwiegenden Teil aus Aushubmaterial und kann in Analogie auch für die Entsorgung als solches behandelt werden. Damit lässt sich für die Entsorgung von Flüssigboden auf die Vorgaben in Art. 19 und in den Anhängen 3 und 5 VVEA abstützen.

Bei unverschmutztem Aushubmaterial gilt der Grundsatz, dass kein Verdacht auf eine Verschmutzung vorliegen darf. Es handelt sich also typischerweise um «Material von der grünen Wiese», welches nicht durch menschlichen Einfluss verändert wurde. Abfallrechtlich muss unverschmutztes Aushubmaterial die Anforderungen nach Anhang 3 Ziffer 1 VVEA einhalten, wobei es zu mindestens 99 Gewichtsprozent aus Lockergestein oder gebrochenem Fels bestehen muss und maximal 1 Gewichtsprozent mineralische Bauabfälle enthalten darf. Wenn das Aushubmaterial zu einem gewissen Umfang durch menschliche Tätigkeiten verschmutzt wurde, gilt es als schwach verschmutzt. Abfallrechtlich muss schwach verschmutztes Aushubmaterial die Anforderungen nach Anhang 3 Ziffer 2 VVEA einhalten, wobei es zu mindestens 95 Gewichtsprozent aus Lockergestein oder gebrochenem Fels und im Übrigen aus anderen mineralischen Bauabfällen bestehen muss.

Bei der Herstellung von Flüssigboden wird Aushubmaterial mit Zement und Bentonit vermischt. Zudem können dem Flüssigboden weitere Zuschlagstoffe wie Pflanzenkohle zugegeben werden. Damit steigt das Risiko eines Eintrags von Fremd- und Schadstoffen. Teilweise wird Flüssigboden bereits aus schwach verschmutztem Aushubmaterial hergestellt.

Die abfallrechtliche Klassierung von Flüssigboden ist von der Qualität des eingesetzten Aushubmaterials sowie von Art und Menge der eingesetzten Zuschlagstoffe abhängig. Für die Verwendung von Aushubmaterial zur Herstellung von Flüssigboden gelten dabei die Vorgaben von Art. 19 VVEA; primär soll unverschmutztes Aushubmaterial verwendet werden. Bei einer Herstellung direkt auf der Baustelle darf jedoch auch das vor Ort anfallende, schwach verschmutzte Aushubmaterial verwertet werden (Art. 19 Abs. 2 Bst. d VVEA).

Bezüglich der Zuschlagstoffe spielt der eingesetzte Bentonit, wie in Kapitel 6.2 ausgeführt, für die Umwelt und die Wahl des Entsorgungsweges keine Rolle. Allfällige weitere Zuschlagstoffe wie Pflanzenkohle sind hingegen bei der Wahl des Entsorgungswegs zu berücksichtigen. Da solche Rezepturen aktuell noch nicht im grossen Stil eingesetzt werden und sich das Thema Pflanzenkohle sehr dynamisch entwickelt, wird hier auf eine weitergehende Bewertung verzichtet.

Aus abfallrechtlicher Sicht ist hauptsächlich der Zementanteil im rückgebauten Flüssigboden ausschlaggebend. Zement kann mit mineralischem Bauabfall gleichgesetzt werden, da natürlicherweise kein Zement im Aushubmaterial vorkommt. Ein durchschnittlicher Flüssigboden, der heute im Normalfall verwendet wird, enthält 2.3 % Zement (siehe Kapitel 3.1.1) und gilt somit als schwach verschmutztes Aushubmaterial gemäss Anhang 3 Ziffer 2 VVEA.

Flüssigboden, welcher ausschliesslich aus unverschmutztem Aushubmaterial und Bentonit besteht und weniger als 1 % Zement enthält, könnte beim Rückbau grundsätzlich als unverschmutztes Aushubma-

terial klassiert werden. Hier ergibt sich jedoch die Herausforderung der Nachvollziehbarkeit der Zusammensetzung und Abgrenzung von «durchschnittlichem» Flüssigboden, wenn der Flüssigboden künftig ausgebaut wird.

Im Normalfall sollte bei ausgebautem Flüssigboden zumindest von schwach verschmutztem Aushubmaterial gemäss Anhang 3 Ziffer 2 VVEA ausgegangen werden und er muss gemäss den Vorgaben von Art. 19 Abs. 2 VVEA verwertet werden. Konkret kann er

- für die Herstellung von hydraulisch oder bituminös gebundenen Baustoffen verwendet, oder
- am Ort des Anfalls (zur Wiederauffüllung des Grabens) wieder eingesetzt werden.

Nur wenn eine solche Verwertung nicht möglich ist, kann er unter Einhaltung der Vorgaben von Anhang 5 Ziffer 2 VVEA auf einer Deponie Typ B abgelagert werden.

Im Gegensatz zum Flüssigboden kann Magerbeton nach dem Ausbau nicht einfach vor Ort wieder zur Grabenverfüllung verwendet werden. Somit hat der Flüssigboden bei der Entsorgung Vorteile im Vergleich zu einer herkömmlichen Grabenverfüllung mit «Kiessand mit Hüllbeton».

9 Hemmnisse und Lösungsansätze von Flüssigboden

Die technische Bewertung zeigt, dass Flüssigboden in vielen Anwendungsbereichen einsetzbar ist. Dennoch erfolgt die Anwendung in der Schweiz bislang nicht flächendeckend. Die begrenzte Marktdurchdringung ist weniger auf technische Defizite zurückzuführen, sondern primär auf normative, vollzugstechnische und wahrnehmungsbezogene Faktoren. Nachfolgend werden diese Hemmnisse dargestellt und den jeweiligen Lösungsansätzen gegenübergestellt.

Gewässerschutz und Auswaschverhalten

Ein zentrales Akzeptanzthema betrifft mögliche Auswirkungen auf Boden und Grundwasser während der Nutzungsphase, insbesondere in grundwassernahen Bereichen oder in Gewässerschutzbereichen. Obwohl die in Kapitel 6.5 dargestellten Eluatuntersuchungen sowie Grundwasserüberwachungen keine relevanten Schadstoffausträge zeigen, bestehen in der Praxis teilweise weiterhin Vorbehalte, insbesondere in grundwassernahen Bereichen und Gewässerschutzbereiche. Diese betreffen weniger konkrete Schadensfälle, sondern vielmehr die noch begrenzte Anzahl langfristig dokumentierter Referenzprojekte in der Schweiz.

Lösungsansatz

Eine systematische Dokumentation von Eluatdaten, projektbezogenen Monitoring-Ergebnissen und behördlich begleiteten Referenzprojekten kann zur weiteren Vertrauensbildung beitragen. Mit zunehmender Vollzugserfahrung und klaren technischen Leitlinien (Stichwort Norm SIA 4016) ist davon auszugehen, dass sich die Beurteilungspraxis weiter standardisiert und der zusätzliche Abklärungsaufwand reduziert.

Erkennbarkeit und mechanischer Schutz im Rückbau

Wie in Kapitel 7.2 dargestellt, entsteht bei Flüssigboden eine homogene Verfüllstruktur ohne ausgeprägte harte Abgrenzungsschicht um das Rohr. Im Vergleich zur konventionellen Bauweise mit Hüllbeton kann die Leitungszone beim späteren Aufbruch dadurch weniger klar erkennbar sein. In der Praxis wird dies teilweise als Risiko wahrgenommen, da bei unvorsichtigem Maschineneinsatz eine Beschädigung des Rohres nicht ausgeschlossen werden kann.

Lösungsansatz

Das Schadensrisiko ist wesentlich abhängig von der Qualität der Leitungsdokumentation, der konsequenten Anwendung von Ortungs- und Sondierungsverfahren sowie der Ausführungspraxis beim Rückbau. Eine klare Dokumentation der Einbausituation, Markierungssysteme sowie spezifische Rückbauleitlinien können dazu beitragen, dieses Hemmnis zu reduzieren.

Fehlende nationale Normierung

Ein zentraler Hemmnisfaktor ist das Fehlen einer verbindlichen nationalen Normierung. Während in Deutschland mit der RAL GZ 507 ein etabliertes Güte- und Regelwerk existiert, fehlt in der Schweiz bislang ein allgemein anerkanntes Referenzdokument (siehe Kapitel 7.3) [2]. Öffentliche Bauherrschaften und Vollzugsbehörden orientieren sich an normativen Vorgaben. Ohne verbindliche Definitionen zu Bemessung, Mindestanforderungen und Qualitätssicherung entsteht ein erhöhter Abstimmungs- und Nachweisbedarf im Einzelfall.

Lösungsansatz

Die in Erarbeitung befindliche SIA 4016 wird voraussichtlich eine zentrale Grundlage schaffen. Eine klare Definition von Anwendungsbereichen, Leistungskennwerten und Prüfanforderungen dürfte die Planungssicherheit wesentlich erhöhen und die Standardisierung fördern. Ergänzend könnten klarere Hilfsmittel oder Vollzugshilfen zur Abgrenzung beitragen, in welchen Anwendungsfällen Betonummantelungen erforderlich sind und wo alternative Bauweisen technisch zulässig und zweckmässig sind.

Materialidentität

Vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauer von Infrastrukturanlagen stellt sich die Frage der langfristigen stofflichen Nachvollziehbarkeit. Flüssigboden bildet nach dem Einbau einen homogenen Verfüllkörper, der beim späteren Rückbau nicht vom umgebenden Boden unterscheidbar ist. Ohne systematische Dokumentation können Rezeptur, Bindemittelanteil oder eingesetzte Zusatzstoffe nach Jahrzehnten kaum rekonstruiert werden. Für Bauherrschaften kann dies im Hinblick auf zukünftige Rückbau- und Verwertungsszenarien als Unsicherheitsfaktor wahrgenommen werden. Unabhängig davon unterliegt rückgebautes Material einer erneuten abfallrechtlichen Beurteilung gemäss VVEA [49]. Eine Verwertung ist somit nur zulässig, wenn die jeweiligen Grenzwerte eingehalten werden.

Im Zusammenhang mit möglichen Mehrfachnutzungen wird zudem teilweise die Frage einer möglichen schrittweisen Anreicherung nicht abbaubarer Stoffe diskutiert.

Lösungsansatz

Eine Schadstoff-Anreicherung wäre nur dann denkbar, wenn belastetes Material wiederholt ohne Prüfung in neue Anwendungen eingebracht werden würde. Zur Erhöhung der langfristigen Transparenz kann, wie in Kapitel 7.6 ausgeführt, eine projektbezogene Materialdokumentation sinnvoll sein. Eine standardisierte Erfassung von Rezeptur, Einbauort und stofflicher Qualität würde die spätere Beurteilung beim Rückbau erleichtern und die Nachvollziehbarkeit über mehrere Nutzungszyklen hinweg verbessern.

10 Schlussfolgerung

Diese Studie konnte zeigen, dass Flüssigboden im Schweizer Tiefbau ein relevantes ökologisches Potenzial aufweist. Besonders vorteilhaft ist sein Einsatz dort, wo konventionelle Bauweisen mit Hüllbeton ersetzt werden können. Die wesentlichen Gründe dafür sind der geringere Einsatz zementintensiver Materialien und die Nutzung von Aushubmaterial anstelle von Primärrohstoffen wie Kies und Sand. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass die Umweltvorteile von Flüssigboden stark von der konkreten Ausgestaltung abhängen. Der wichtigste Hebel liegt in der Wahl des Bindemittels, da der Zement trotz seines geringen Massenanteils den grössten Beitrag zu den Umweltwirkungen von Flüssigboden leistet. Ein weiterer zentraler Hebel ist die reduzierte Grabenbreite, da sie den Materialbedarf und damit die Umweltwirkungen deutlich verringert. Die grössten ökologischen Potenziale ergeben sich somit aus der Kombination mehrerer Hebel.

Auch technisch und umwelttechnisch ist Flüssigboden für viele Standardanwendungen als geeignete Alternative zur konventionellen Bauweise einzuordnen. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass diese Anwendungen in der Regel technisch unkritisch sind, sofern die projektspezifischen Randbedingungen berücksichtigt und die erforderlichen Nachweise erbracht werden. Eluatversuche und Grundwasserüberwachungen zeigen zudem, dass bei fachgerechter Herstellung und Anwendung keine relevanten Schadstoffeinträge zu erwarten sind. Einschränkungen bestehen vor allem bei Anwendungen mit erhöhten technischen Anforderungen.

Für eine breitere Anwendung in der Praxis wäre es sinnvoll, wenn Bauherrschaften wie zum Beispiel Tiefbauämter weitere Pilot- und Referenzprojekte gezielt durchführen, begleiten und die dabei gewonnenen Erkenntnisse zentral auswerten lassen würden. Dies könnte dazu beitragen, die Vollzugspraxis weiter zu vereinheitlichen, bestehende Vorbehalte abzubauen und die Anwendungssicherheit zu erhöhen.

11 Grenzen der Studie

Dieses Kapitel erläutert die zentralen Annahmen und Unsicherheiten der vorliegenden Studie und zeigt auf, in welchen Bereichen weiterer Vertiefungsbedarf besteht.

Funktionelle Vergleichbarkeit

Eine erste wesentliche Einschränkung betrifft die funktionelle Vergleichbarkeit der untersuchten Verfüllvarianten. Die Analysen basieren auf der Annahme, dass die betrachteten Systeme in den definierten Anwendungsfällen die gleiche technische Funktion erfüllen können. Diese Annahme ist für viele Standardanwendungen plausibel, gilt jedoch nicht uneingeschränkt für sämtliche Einbausituationen. Insbesondere bei erhöhten mechanischen Anforderungen, speziellen Rohrbettungen oder sensiblen hydrogeologischen Randbedingungen kann die technische Eignung einzelner Bauweisen projektspezifisch anders ausfallen. Die ökologische Vergleichbarkeit ist daher immer an die jeweilige technische Umsetzbarkeit gekoppelt.

Darüber hinaus wurde in dieser Studie nicht vertieft untersucht, unter welchen technischen Bedingungen der Einsatz von Flüssigboden den Verzicht auf Hüllbeton ermöglicht. Weitere Massnahmen zur Vermeidung von Hüllbeton, etwa die Wahl bestimmter Rohrtypen bzw. Rohrmaterialien, lagen ausserhalb des Untersuchungsrahmens.

Hüllbeton in der konventionellen Bauweise

Eine weitere zentrale Unsicherheit betrifft die Modellierung der konventionellen Referenzsysteme. Für die Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» wurde vereinfachend ein fester Hüllbetonanteil von 20 % am Grabenvolumen angenommen. Diese Annahme dient der Vergleichbarkeit, bildet die reale Baupraxis jedoch nur vereinfacht ab. Je nach Grabengeometrie, Rohrtyp und Einbausituation kann der tatsächliche Hüllbetonanteil tiefer oder höher ausfallen. Da Hüllbeton aufgrund seines hohen Zementgehalts den Haupttreiber der Umweltwirkungen darstellt, hat diese Annahme einen relevanten Einfluss auf die Resultate der vergleichenden Ökobilanz.

Reduzierte Grabenbreite

Die reduzierte Grabenbreite wurde in dieser Studie vereinfacht mit einer pauschalen Reduktion um 0.30 m modelliert. Diese Annahme basiert auf einer praxisnahen Abschätzung, ist jedoch nicht für alle Leitungsdurchmesser, Einbauverfahren und Baustellenrandbedingungen gleichermassen gültig. Da die reduzierte Grabenbreite einen grossen Einfluss auf die Materialmengen und damit auf die Umweltwirkungen hat, stellt sie einen der wichtigsten Unsicherheits- und zugleich Verbesserungsparameter der Studie dar.

Pflanzenkohle im Flüssigboden

Die Resultate der Varianten mit Pflanzenkohle sind besonders vorsichtig zu interpretieren. Deren ökologische Vorteilhaftigkeit hängt stark davon ab, ob die Kohlenstoffspeicherung bilanziell berücksichtigt wird und ob angenommen werden kann, dass der biogene Kohlenstoff langfristig stabil im Material gebunden bleibt. Gleichzeitig zeigt die Systembetrachtung, dass bereits für vergleichsweise eng abgegrenzte Anwendungen relevante Mengen an Pflanzenkohle erforderlich wären. Vor dem Hintergrund der heutigen Produktionskapazitäten sowie möglicher Nutzungskonkurrenzen ist der Einsatz von Pflanzenkohle im hier untersuchten System daher als eher langfristige und derzeit nur eingeschränkt skalierbare Option zu betrachten.

Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Potenzialabschätzung auf Ebene des schweizweiten Infrastrukturnetzes. Diese stellt bewusst eine vereinfachte und eher optimistische Abschätzung dar. Insbesondere die Annahmen zur Substituierbarkeit von Kiessand und Beton, zur Verfügbarkeit des rückgebauten Materials sowie zur Übertragbarkeit auf verschiedene Netztypen sind mit Unsicherheiten behaftet.

Gerade beim Beton ist zu betonen, dass der ausgewiesene substituierbare Anteil von 77 % eine modellhafte Annahme innerhalb der gewählten Systemgrenzen darstellt (siehe Anhang D). Dieser Wert ist nicht als technisch gesichertes oder kurzfristig realisierbares Marktpotenzial zu verstehen. In der Praxis kann das tatsächlich erschliessbare Potenzial aufgrund technischer, normativer, baubetrieblicher und projektspezifischer Randbedingungen deutlich tiefer liegen. Die ausgewiesenen Potenziale sind daher in erster Linie als theoretische Grössenordnung zu interpretieren.

Ausblick

Für geeignete Standardanwendungen im Leitungsbau kann Flüssigboden bereits heute eine technisch und ökologisch sinnvolle Alternative darstellen, vor allem dort, wo Bauweisen mit Hüllbeton ersetzt oder Materialflüsse reduziert werden können.

Aus Anwendungssicht ist für Bauherrschaften wichtig, die Eignung im konkreten Projekt zu prüfen und die projektspezifischen Rahmenbedingungen klar festzulegen. Dazu gehören beispielsweise die Einbautiefe, die Last- und Baugrundsituation, Anforderungen an die Rezeptur sowie die Bedingungen für Einbau und späteren Rückbau. Für Standardanwendungen können bestehende Erfahrungen und Referenzprojekte bereits eine wichtige Orientierung bieten.

Aus fachlicher Sicht besteht weiterer Vertiefungsbedarf, um die Einsatzbereiche genauer abzugrenzen und die für den modellierten Leitungsgraben berechneten Umweltwirkungen auf weitere Anwendungsfälle zu übertragen. Dazu gehören technische und ökologische Vergleiche anhand konkreter Leitungsbauanwendungen mit definierten Rohrtypen, Einbautiefen und Lastsituationen. Zudem wäre eine vertiefte Analyse der realen Hüllbetonanteile und der tatsächlich möglichen Reduktion der Grabenbreite in unterschiedlichen Standardanwendungen sinnvoll. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere bei Pflanzenkohle, etwa zur langfristigen Stabilität, zur Verfügbarkeit geeigneter Rohstoffe und zur ökologisch sinnvollen Priorisierung solcher Anwendungen. Auch die Potenzialabschätzung zum Einsatz von Flüssigboden im Tiefbau sollte weiter verfeinert werden, insbesondere hinsichtlich der technisch realisierbaren Substitutionspotenziale in den verschiedenen Netztypen und Anwendungsbereichen.

Insgesamt zeigt diese Studie klare Potenziale für den Einsatz von Flüssigboden im Leitungsbau auf. Weitere technische, ökologische und vollzugsspezifische Vertiefungen können dazu beitragen, die Ergebnisse auf zusätzliche Anwendungsfälle zu übertragen, Einsatzbereiche gezielter abzugrenzen und die Anwendung in der Praxis weiter zu unterstützen.

Literaturverzeichnis

[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 zeiweise 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 + to the Sixth Assessment Report of the Intergeovernmental Panel on Climate Change“ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom an New York USA, 2021.

[9] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2007: Synthesis Report“ Valencia, 2007.

[10] BAFU (Hrsg.), «Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz» Bundesamt für Umwelt, 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 und U. W. Schenker, „Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting“ *International Journal of Life Cycle Assessment,* 5 Mai 2015.

[13] R. Frischknecht, F. Wyss, S. Büsser Knöpfel, T. Lützkendorf und M. Balouktsi, „Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach“ The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015.

[14] T. Neidhart und 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 und 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. [Online]. Available: https://www.terex.com/docs/librariesprovider2/default-document-library/evoquip-product-catalogue-2023-de.pdf?sfvrsn=711a7890_24. [Zugriff am 8 12 2025].

[24] Liebherr, „LH 18 M Industry Litronic“ Liebherr, 2025. [Online]. Available: https://www.liebherr.com/de-ch/p/277280-3925633#energysavingcalculator. [Zugriff am 8 Dezember 2025].

[25] S. Kytzia und T. Pohl, „Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen“ Ostschweizer Fachhochschule OST, Rapperswil, 2021.

[26] Liebherr, „LTB 12+4+1 GL. Förderband für Fahrmischer“ Liebherr, 2026. [Online]. Available: https://www.liebherr.com/de-ch/p/85074-3911478. [Zugriff am 6 Januar 2026].

[27] Liebherr, „Verbrauchsrechner“ Liebherr, 2025. [Online]. Available: https://www.liebherr.com/de-ch/erdbewegung/beratung-kauf/verbrauchsrechner-6354255. [Zugriff am 27 November 2025].

[28] Wacker Neuson, „Mobilbagger: Flexibel zum Einsatzort“ Wacker Neuson, 2025. [Online]. Available: https://www.wackerneuson.ch/produkte/bagger/mobilbagger. [Zugriff am 27 November 2025].

[29] M. Klingler und 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 und T. Bucheli, „Pflanzenkohle in der Landwirtschaft“ 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 und 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. [Online]. Available: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/de?version=20241231. [Zugriff am 5 Februar 2026].

[35] S. Rubli, „Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau Aktualisierung 2015“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2016.

[36] BFS, „Forstwirtschaft der Schweiz - Taschenstatistik 2025“ Bundesamt für Statistik, Neuchâtel , 2025.

[37] P. Niemz, „Physik des Holzes“ ETH Zürich, Zürich, 2005.

[38] N. Hagemann, V. Kamra und 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. [Online]. Available: https://lc3.ch/wp-content/uploads/2023/02/LC3-A-sustainable-alternative-FINAL-EN-WEB2-2023.pdf. [Zugriff am 14 März 2026].

[42] „Calterra®“ 2026.

[43] Oxara, „Summary - Life Cycle Assessment of Oxacrete Oulesse®“ 26 September 2025. [Online]. Available: https://oxara.earth/files/media/files/1778c9f50c5b431c39b0bf99daa475bf/251029_4605_Oxara_Oulesse_summary_V2.2.pdf. [Zugriff am 17 Dezember 2025].

[44] Klark AG, „KLARK – Der Klimabeton“ Klark AG, 2026. [Online]. Available: https://www.klark.swiss/klark-beton/. [Zugriff am 16 Januar 2026].

[45] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Treibhausgasinventar der Schweiz“ 10 Juli 2025. [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/de/treibhausgasinventar. [Zugriff am 5 Februar 2026].

[46] R. Ehrnsperger und 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 und H.-P. Schmidt, „Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated aromatic compounds in biochar“ in *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, [Online]. Available: https://rss-system.de/rssfluessigboden/. [Zugriff am 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 und 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. [Online]. Available: https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/umweltgesamtrechnung/fussabdruecke.html. [Zugriff am 26 März 2026].

[55] Empa, „Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz“ Bundesamt für Umwelt BAFU, St. Gallen, 2016.

Begriffe und Abkürzungen

CEM	Zement, engl. cement
CO_2-eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «Functional unit»
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial.
HB	Hüllbeton
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse = Ökobilanz, die Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder life cycle assessment (LCA) genannt, ist ein Hilfsmittel zur Analyse der Umweltwirkung. Der Wortteil «Öko» steht dabei für die Umweltwirkung und der Wortteil «Bilanz» für die buchhalterische Erfassung sämtlicher Umweltwirkungen über den ganzen Lebenszyklus eines Produkts oder Prozesses in quantitativer/numerischer Form. Wichtig dabei ist, dass alle Emissionen und Ressourcenverbräuche während der Entstehung, über die eigentliche Lebenszeit bis zur Entsorgung oder Verwertung in die Lebenszyklusanalyse einfliessen – «von der Wiege bis zur Bahre».
KEA	Kumulierter Energieaufwand; Ökobilanzmethode zur Erfassung des Gesamtenergieaufwandbedarfs inkl. «Grauer Energie». KEA zeigt den direkten und auch den indirekten nicht erneuerbaren Energieverbrauch, welche über Charakterisierungsfaktoren in MJ Öl-Equivalente umgerechnet werden. Dieses Wirkungsmodell beinhaltet die energetischen Inputs für die Gewinnung, Herstellung und Entsorgung aller benötigten Materialien und Hilfsstoffe und bewertet dabei den Bedarf an nicht erneuerbaren primären Energieträgern wie Kohle, Öl oder Uran.
kWh Oil-eq	Kilowattstunden Öl Äquivalente (“equivalents”)
PK	Pflanzenkohle
UBP	Umweltbelastungspunkte (Einheit der vollaggregierten Ökobilanz-Methode der ökologischen Knappheit, engl. Ecological Scarcity)
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)
ZFSV	Zeitweise fliessfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe

Abbildungen

Abbildung 0-1: Gesamte Treibhausgasemissionen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). 4

Abbildung 0-2: Gesamtumweltbelastung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). 4

Abbildung 0-3: Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde CEM I 42.5 R modelliert. 5

Abbildung 0-4: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde CEM I 42.5 R modelliert. 6

Abbildung 0-5: Entscheidungshilfe zur Reduktion von Umweltwirkungen im Leitungsbau. 8

Abbildung 2-1: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [7]. 15

Abbildung 3-1: Materialflussanalyse und Transportdistanzen des Flüssigbodens (A1 – A5). 19

Abbildung 3-2: Materialflussanalyse und Transportdistanzen des Flüssigbodens (C1 – C4). 20

Abbildung 3-3: Gesamte Treibhausgasemissionen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. 29

Abbildung 3-4: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. 29

Abbildung 3-5: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. 30

Abbildung 3-6: Hotspot-Analyse: Umweltwirkungen der Referenzrezeptur nach Materialkomponenten (A1 – A3). 31

Abbildung 3-7: Treibhausgasemissionen von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A). 31

Abbildung 3-8: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse gegenüber der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur bei unterschiedlichem Zementanteil. 33

Abbildung 3-9: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlicher Verwertung des bei der Flüssigbodenproduktion entstehenden Siebrückstands gegenüber der Baseline. 34

Abbildung 3-10: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlichen Transportdistanzen zwischen Baustelle und Flüssigbodenanlage gegenüber der Baseline. 35

Abbildung 3-11: Sensitivitätsanalyse: Relative Abweichung der Ökobilanzergebnisse bei unterschiedlichen Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens gegenüber der Baseline. 36

Abbildung 4-1: Treibhausgasemissionen der Pflanzenkohleherstellung und separat ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung (pro kg Pflanzenkohle). 39

Abbildung 4-2: Gesamte Treibhausgasemissionen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). Die in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung der Pflanzenkohle ist separat ausgewiesen. 41

Abbildung 4-3: Gesamte Umweltbelastungen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). Die in CO_2 umgerechnete Kohlenstoffspeicherung der Pflanzenkohle ist separat ausgewiesen. 42

Abbildung 4-4: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle. 42

Abbildung 5-1: Schematische Volumenaufteilung von Hüllbeton und Verfüllmaterial bei zwei unterschiedlichen Grabentiefen (2D). 48

Abbildung 5-2: Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. 50

Abbildung 5-3: Vergleich der gesamten Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung ohne CO_2-Speicherung in Pflanzenkohle bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A. 50

Abbildung 5-4: Gesamte Umweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. 51

Abbildung 5-5: Vergleich der Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A, ohne Berücksichtigung der unveränderten CO_2-Speicherung in Pflanzenkohle. 52

Abbildung 5-6: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. 52

Abbildung 5-7: Vergleich des kumulierten Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I 42.5 R bzw. CEM III A. 53

Abbildung 5-8 Gesamte Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten 55

Abbildung 5-9: Vergleich der gesamten Treibhausgasemissionen pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte. 55

Abbildung 5-10: Entscheidungshilfe zur Reduktion von Umweltwirkungen im Leitungsbau. ... 56

Abbildung 0-1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschema der Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindexes der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis). 93

Abbildung 0-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14‘040ff [5], [52], [53]. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist meistens iterativ. 94

Abbildung 0-3: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. 98

Abbildung 0-4: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. 98

Abbildung 0-5: Gesamtumweltbelastungen von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A). 99

Abbildung 0-6: Kumulierter Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A). 99

Abbildung 0-7: Nicht erneuerbarer Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A). 100

Abbildung 0-8: Erneuerbarer Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A). 100

Abbildung 0-9: Gesamtumweltbelastungen der Pflanzenkohleherstellung und separat ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung (pro kg Pflanzenkohle). 101

Abbildung 0-10: Kumulierter Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle). 101

Abbildung 0-11: Nicht erneuerbarer Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle). 102

Abbildung 0-12: Erneuerbarer Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle). 102

Abbildung 0-13: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle. 103

Abbildung 0-14: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle. 103

Abbildung 0-15: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» (A1 – A5). 104

Abbildung 0-16: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» (C1 – C4). 104

Abbildung 0-17: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand ohne Hüllbeton» (A1 – A5). 105

Abbildung 0-18: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand ohne Hüllbeton» (C1 – C4). 105

Abbildung 0-19: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. 106

Abbildung 0-20: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien. 106

Abbildung 0-21: Vergleich des nicht erneuerbaren Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I bzw. CEM III A. 107

Abbildung 0-22: Vergleich des erneuerbaren Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I bzw. CEM III A. 107

Abbildung 0-23: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten 108

Abbildung 0-24: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten 108

Abbildung 0-25: Vergleich der Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte. 109

Abbildung 0-26: Vergleich des kumulierten Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte. 109

Abbildung 0-27: Betrachtetes System zur Potenzialabschätzung von Flüssigboden 111

Abbildung 0-28: Materiallager im Schweizer Tiefbau nach Kanton und Infrastrukturwerk im Jahr 2025. 114

Abbildung 0-29: Materiallager im Schweizer Tiefbau nach Infrastrukturwerken und Materialart. 115

Abbildung 0-30: Jährliche Bauabfallmengen von Beton und Kiessand nach Verwertungsart. 115

Abbildung 0-31: Treibhausgasemissionen der betrachteten Verfüllmaterialien bezogen auf 1 Tonne Verfüllmaterial über den Lebenszyklus A1 – A5 bis C1 – C4. Die Darstellung dient der Vergleichbarkeit der Verfüllmaterialien und der damit verbundenen Bauweisen..... 117

Abbildung 0-32: Jährliche Treibhausgasemissionen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller Grabenbreite bei allen Verfüllvarianten und reduzierter Grabenbreite nur bei Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. 118

Abbildung 0-33: Jährliche Treibhausgasemissionen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert. 119

Abbildung 0-34: Jährliche Gesamtumweltbelastungen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. . 120

Abbildung 0-35: Jährliche Gesamtumweltbelastungen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert. 121

Abbildung 0-36: Jährlicher kumulierter Energieaufwand der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert. . 122

Abbildung 0-37: Jährlicher kumulierter Energieaufwand der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert. 123

Tabellen

Tabelle 3-1: Daten zur Mittelwertbildung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur. 17

Tabelle 3-2: Sachbilanz – Bereitstellung der Flüssigbodenkomponenten (A1). 21

Tabelle 3-3: Sachbilanz – Transport der Flüssigbodenkomponenten zur Flüssigbodenanlage (A2). 22

Tabelle 3-4: Sachbilanz – Flüssigbodenproduktion (A3). 23

Tabelle 3-5: Sachbilanz – Transport des Flüssigbodens auf die Baustelle (A4). 24

Tabelle 3-6: Sachbilanz – Einbau vom Flüssigboden (A5). 24

Tabelle 3-7: Sachbilanz – Rückbau vom Flüssigboden (C1). 25

Tabelle 3-8: Sachbilanz – Transport von der Baustelle zur Entsorgung bzw. Verwertung (C2). 25

Tabelle 3-9: Sachbilanz – Entsorgung vom Flüssigboden (C3, C4). 26

Tabelle 3-10: Übersicht der untersuchten Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens in der Sensitivitätsanalyse. 27

Tabelle 3-11: Übersicht der Umweltwirkungen der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur pro m^3 Grabenverfüllung, aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen. 28

Tabelle 3-12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Variation des Zementanteils innerhalb der 12 berücksichtigten Flüssigbodenrezepturen. 32

Tabelle 3-13: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Verwertung des Siebrückstands während der Flüssigbodenproduktion. 33

Tabelle 3-14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu vorgelagerten Transportdistanzen zwischen Baustelle und Flüssigbodenanlage. 34

Tabelle 3-15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu unterschiedlichen Entsorgungsszenarien des Flüssigbodens. 35

Tabelle 4-1: Rezepturen der Flüssigbodenvarianten mit unterschiedlichem Pflanzenkohleanteil. 37

Tabelle 4-2: Umweltwirkungen der Pflanzenkohleherstellung [21]. 38

Tabelle 4-3: Übersicht der Umweltwirkungen der untersuchten Flüssigbodenvarianten mit und ohne Pflanzenkohle pro m^3 Grabenverfüllung. 40

Tabelle 5-1: Rezepturen der untersuchten Verfüllmaterialien. 47

Tabelle 5-2: Übersicht der Umweltwirkungen der untersuchten Verfüllvarianten pro m^3 Grabenverfüllung. 49

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Resultate der vergleichenden Ökobilanz. Dargestellt sind die prozentualen Unterschiede der betrachteten Verfüllvarianten gegenüber der Referenzvariante «Kiessand mit Hüllbeton». 54

Tabelle 5-4: Modellbasierte Lebenszykluskosten pro m^3 Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). 59

Tabelle 5-5: Praxisbasierte Lebenszykluskosten pro m^3 Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4). 60

Tabelle 6-1: Vergleich der Schwermetallkonzentration der Pflanzenkohle und der Anwendung in Flüssigboden mit den Grenzwerten des Deponie Typs B. 63

Tabelle 7-1: Matrix der Anwendungsfelder und der Eignung der Flüssigbodenrezepturen basierend auf Literaturrecherche [20], [51]. «Grün» steht für etablierte Anwendungen. «Orange» erfordert projektspezifische Nachweise. «Rot» kennzeichnet Anwendungen mit unzureichender Datenlage oder erhöhtem Risiko. 72

Tabelle 0-1: Wirkungsabschätzung – Bereitstellung der Flüssigbodenkomponenten (A1). 95

Tabelle 0-2: Wirkungsabschätzung – Transport der Flüssigbodenkomponenten zur Flüssigbodenanlage (A2). 95

Tabelle 0-3: Wirkungsabschätzung – Flüssigbodenproduktion (A3). 95

Tabelle 0-4: Wirkungsabschätzung – Transport des Flüssigbodens auf die Baustelle (A4). 96

Tabelle 0-5: Wirkungsabschätzung – Einbau vom Flüssigboden (A5). 96

Tabelle 0-6: Wirkungsabschätzung – Rückbau vom Flüssigboden (C1). 96

Tabelle 0-7: Wirkungsabschätzung – Transport von der Baustelle zur Entsorgung bzw. Verwertung (C2). 97

Tabelle 0-8: Wirkungsabschätzung – Entsorgung vom Flüssigboden (C3, C4). 97

Tabelle 0-9: Annahmen zur Abfallbewirtschaftung für Kiessand und Beton [35]. 111

Tabelle 0-10: Berücksichtigte Materialsubstitutionen in der Potenzialabschätzung..... 112

Tabelle 0-11: Grabengeometrien zur Modellierung der Infrastrukturnetze [35]. 112

Tabelle 0-12: Instandsetzungsraten zur Abschätzung der jährlichen Bauabfallmengen [35]..... 113

Tabelle 0-13: Reduzierte Grabengeometrien beim Einsatz von Flüssigboden. 114

Tabelle 0-14: Substituierbare Materialmengen von Kiessand und Beton durch Flüssigboden unter Berücksichtigung von Instandsetzung und Netzwachstum (t/a). 116

Tabelle 0-15: Prozentuale Reduktionspotenziale der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur. 123

Anhang

Anhang A. Methodische Grundlagen Ökobilanz

In dieser Studie wurden alle Ökobilanzen gemäss ISO 14040:2006 [5] bzw. ISO 14044:2006 [6] erstellt. Nach dieser Norm umfasst eine Ökobilanz die nachfolgenden Schritte:

1. Ziel- und Rahmenbedingungen

In diesem Schritt werden die Ziele der Studie festgelegt und die folgenden, wesentlichen Annahmen für die Analyse definiert:

- Auswahl der betrachteten Phasen im Lebenszyklus eines Bauwerks (Herstellung, Bau, Nutzung etc.),
- Auswahl der in diesen Phasen analysierten Prozesse (z.B. Entsorgung),
- Definition der Nutzungsdauer des Bauwerks,
- Definition der funktionalen Anforderungen an das Bauwerk, die von allen betrachteten Varianten erfüllt werden müssen,
- Auswahl der Wirkungsmodelle, die für die Bewertung der Varianten verwendet werden (z.B. Umweltbelastungspunkte).

Die vorliegende Studie orientiert sich an der EN 15643-5 [7] für die Systemdefinition und die Beschreibung der funktionellen Einheit und den Ökobilanzdaten im Baubereich [1] für die Auswahl der Wirkungsmodelle.

2. Sachbilanz

In diesem Schritt werden die Emissionen und der Ressourcenverbrauch bzw. –Inanspruchnahme für sämtliche Prozesse der untersuchten Systeme erfasst bzw. abgeschätzt. Grundlagen dafür sind:

- Materialbedarf, Abfallmengen, Inanspruchnahme von Boden, Maschinenstunden der Bauprozesse, im Bauprozess entstehende Emissionen (z.B. durch Baumaschinen) und geplante Transportleistungen in den betrachteten Varianten des Bauprojekts.
- Daten zu den Prozessen der Nutzung, Instandhaltung, Instandsetzung und des Rückbaus der betrachteten Varianten des Bauwerks.
- Daten zu den Prozessen der Rohstoff-/Energiegewinnung, der Herstellung, der Entsorgung oder des Transports, die von Dritten bereitgestellt werden.

In der Sachbilanz werden die Mengen der kumulierten Emissionen und Ressourceninanspruchnahmen über den ganzen Lebensweg des Produkt-/Prozesssystems hinweg berechnet. Dafür werden verschiedene Annahmen getroffen, z.B. bei der Allokation von Emissionen im Falle von Kuppelproduktion.

Die vorliegende Studie orientiert sich an der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2025) [21].

3. Wirkungsbilanz

In der Wirkungsbilanz wird beschrieben, wie sehr die verschiedenen Varianten die Umwelt belasten. Nach ISO 14040/44 [5], [6] oder EN 15643-6 [7] geht man dabei von einer Reihe allgemein akzeptierter Umweltprobleme aus, wie beispielsweise dem Treibhauseffekt oder der Zerstörung der Ozonschicht, und zeigt mit Hilfe von Wirkungsmodellen, wie stark die untersuchten Varianten zu diesen Umweltproblemen beitragen. Man erhält so eine mehrdimensionale Bewertung und letztlich muss der Bauherr entscheiden, welchem Umweltproblem er die grösste Bedeutung beimisst. Alternativ dazu wird in der Schweiz seit vielen Jahren ein alternativer Bewertungsansatz propagiert, der zu einem Gesamtindex für alle Umweltbelastungen führt: die «Methode der ökologischen Knappheit» mit der Masseinheit «Umweltbelastungspunkte» (siehe Abbildung 0-1) [10]. Bewertungsmassstab ist hier der aktuelle Zielerreichungsgrad der nationalen Umweltpolitik. International bezeichnet man den Ansatz allgemein mit dem Begriff «distance to target»: ein Umweltproblem ist umso schlimmer, je weiter ein Land von der Erreichung seiner problembezogenen Umweltziele ist. Dieser Ansatz ist aber nicht konform zur ISO 14040/44, da für solche Vergleiche keine Gesamtindizes in Ökobilanzen verwendet werden dürfen. In der Schweiz ist die Methode der ökologischen Knappheit jedoch besonders bei Entscheidungsträgern sehr etabliert und akzeptiert [11], [52] und [53].

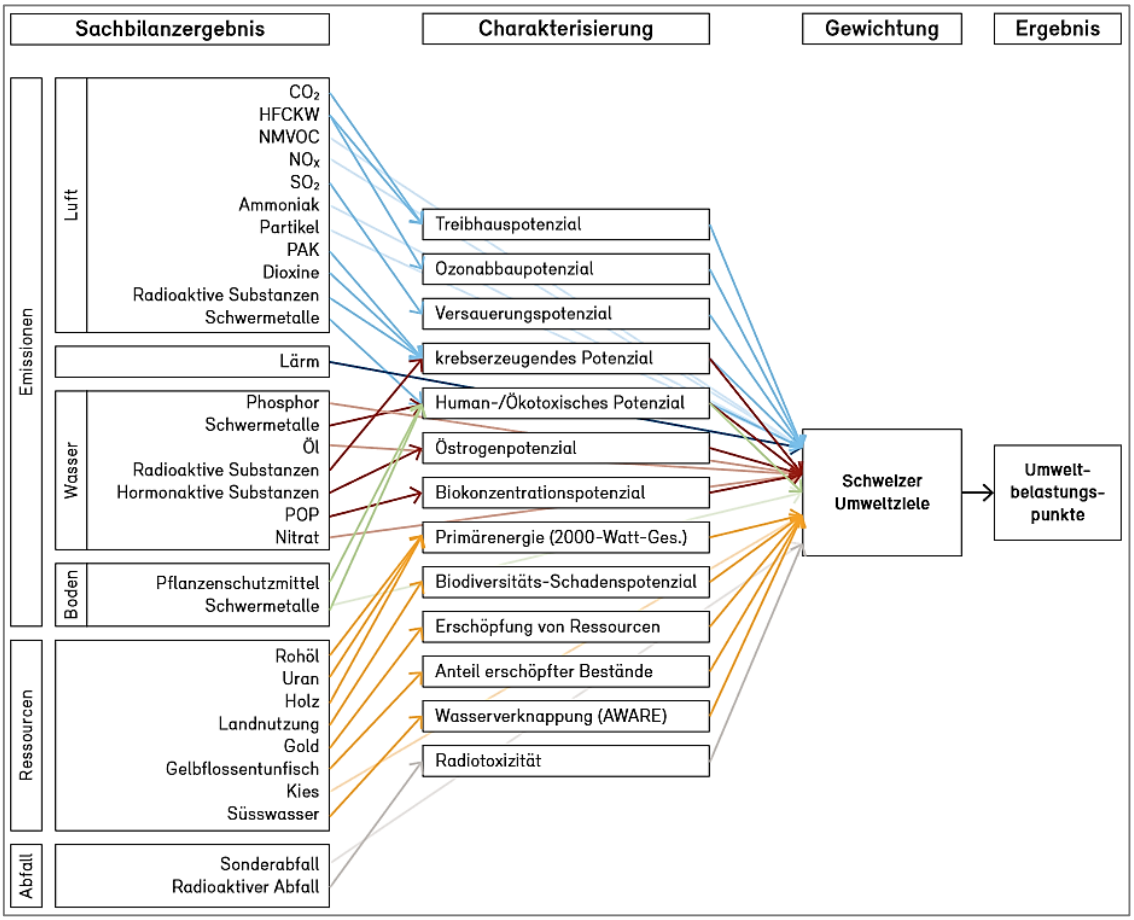


Abbildung 0-1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschema der Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindexes der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis).

4. Auswertung und Interpretation

Im letzten Schritt der Anwendung der Methode werden die Ergebnisse der Wirkungsbilanzen der betrachteten Varianten aufgrund der Zielsetzungen der Studie ausgewertet und interpretiert. Dies kann im Verlauf der Untersuchung dazu führen, dass die im ersten Schritt festgelegten Annahmen der Analyse angepasst werden (z.B. die Systemgrenzen oder die Auswahl der Wirkungsmodelle). Dadurch wird die Aussagekraft der Untersuchung in einem iterativen Prozess schrittweise verbessert.

Ein wichtiger Teil von Auswertung und Interpretation ist die Unsicherheitsanalyse. Dabei unterscheidet man zwischen Datenunsicherheiten, die mit Hilfe statistischer Methoden analysiert werden, und Modellunsicherheiten, die man durch Szenarioanalysen abschätzen kann. In der vorliegenden Studie werden beide Methoden angewandt.

Abbildung 0-2 fasst die vier Schritte einer Ökobilanz gemäss ISO 14'040:2006 [5] nochmals zusammen.

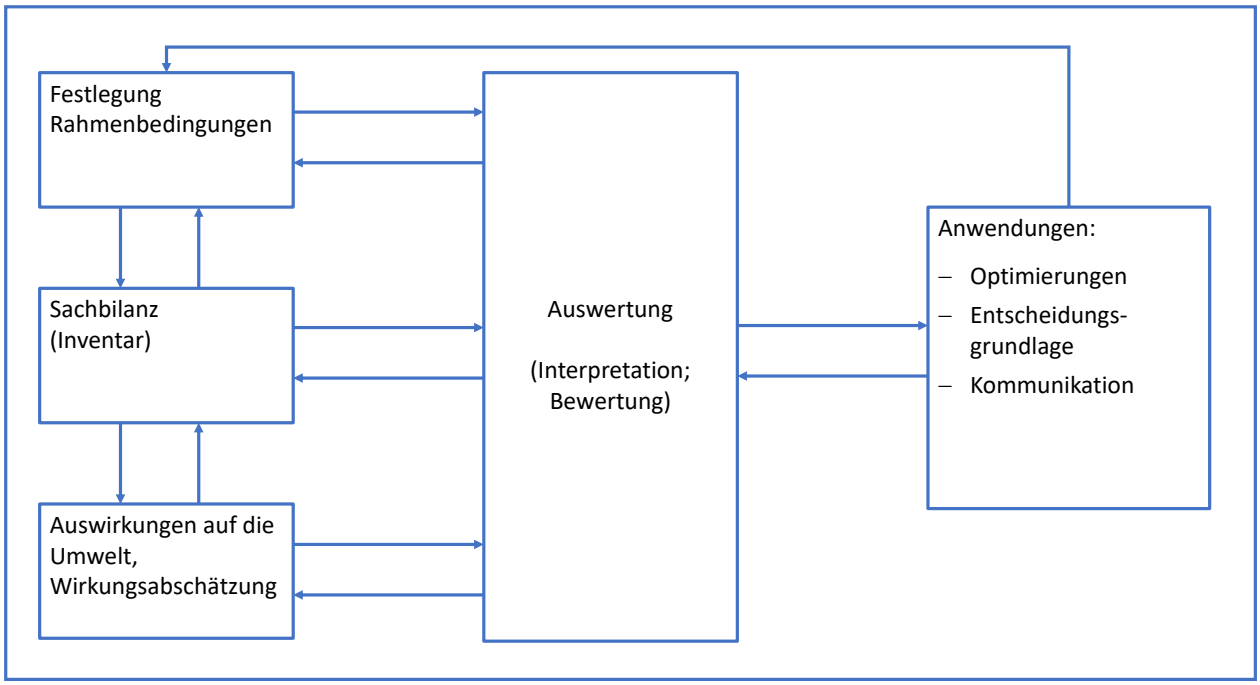


Abbildung 0-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14‘040ff [5], [52], [53]. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist meistens iterativ.

Anhang B. Wirkungsabschätzung der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur

In den folgenden Tabellen (Tabelle 0-1 bis Tabelle 0-8) sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die durchschnittliche Flüssigbodenrezeptur dargestellt, ausgewertet nach GWP, UBP und *KEA.*

Tabelle 0-1: Wirkungsabschätzung – Bereitstellung der Flüssigbodenkomponenten (A1).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Aushub	0.428	679	1.632	1.599	0.033
Aushub in Flüssigbodenanlage	0	0	0	0	0
Zement CEM I 42.5 R	31.255	37’061	34.763	30.791	3.972
Bentonit	0.924	1’650	3.832	3.622	0.209
Wasser	0.057	210	0.625	0.462	0.163
Kalk	0.013	34	0.102	0.075	0.028

Tabelle 0-2: Wirkungsabschätzung – Transport der Flüssigbodenkomponenten zur Flüssigbodenanlage (A2).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Aushub, Zement und Kalk	3.26	6’092	14.79	13.86	0.93
Bentonit	2.12	3’997	9.84	8.99	0.85

Tabelle 0-3: Wirkungsabschätzung – Flüssigbodenproduktion (A3).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Mobile Siebmaschine / Schaufelseparator	0.013	28	0.039	0.033	0.005
Diesel für Siebmaschine / Schaufelseparator	0.170	263	0.647	0.635	0.012

Bodenmaterial-überschuss	0	0	0	0	0
Silos	0.019	40	0.055	0.048	0.008
Förderband	0.021	41	0.064	0.056	0.008
Fahrmischer	0.062	134	0.185	0.160	0.025
Diesel für Fahrmischer	1.507	2’339	5.752	5.643	0.109
Radlader	0.049	87	0.203	0.179	0.024
Diesel für Radlader	0.475	737	1.813	1.778	0.034
Strom	0.045	219	1.241	0.943	0.298
Flüssigbodenanlage	0.154	341	0.608	0.541	0.067

Tabelle 0-4: Wirkungsabschätzung – Transport des Flüssigbodens auf die Baustelle (A4).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
LKW-Fahrmischer	3.111	5’818	14.128	13.239	0.889

Tabelle 0-5: Wirkungsabschätzung – Einbau vom Flüssigboden (A5).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Fahrmischer und Schlauch	0.807	1’252	3.080	3.021	0.059

Tabelle 0-6: Wirkungsabschätzung – Rückbau vom Flüssigboden (C1).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Radbagger und Baggerschaufel	2.495	3’873	9.524	9.343	0.181

Tabelle 0-7: Wirkungsabschätzung – Transport von der Baustelle zur Entsorgung bzw. Verwertung (C2).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Transport zur Deponie, zu einem anderen Bauperimeter und zu einem Zwischenlager	6.650	12'437	30.202	28.301	1.900

Tabelle 0-8: Wirkungsabschätzung – Entsorgung vom Flüssigboden (C3, C4).

Umweltindikator	**GWP**	**UBP**	**KEA (total)**	**KEA (nicht erneuerbar)**	**KEA (erneuerbar)**
Einheit	[kg CO_2-eq/m³]	[UBP/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]	[kWh Oil-eq/m³]
Entsorgung des Aushubmaterials in einer Deponie	0.990	43'254	4.630	4.320	0.310
Verwertung auf einem externen Bauperimeter	0	0	0	0	0
Verwertung vor Ort	0	0	0	0	0

Anhang C. Ergänzende Grafiken

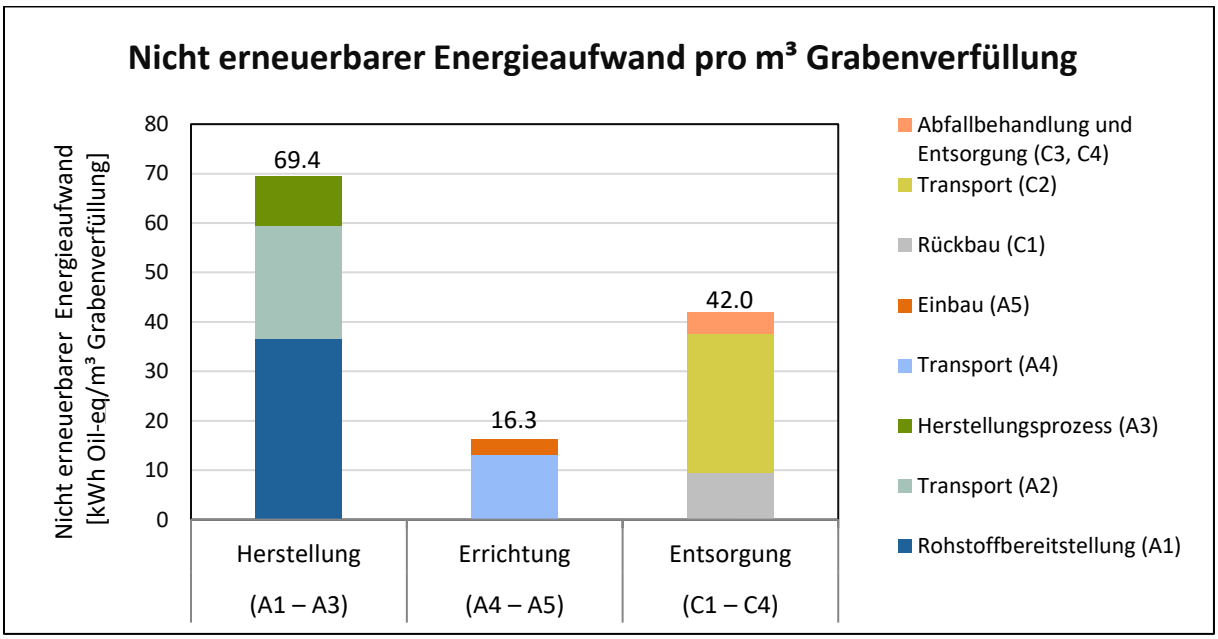


Abbildung 0-3: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden.

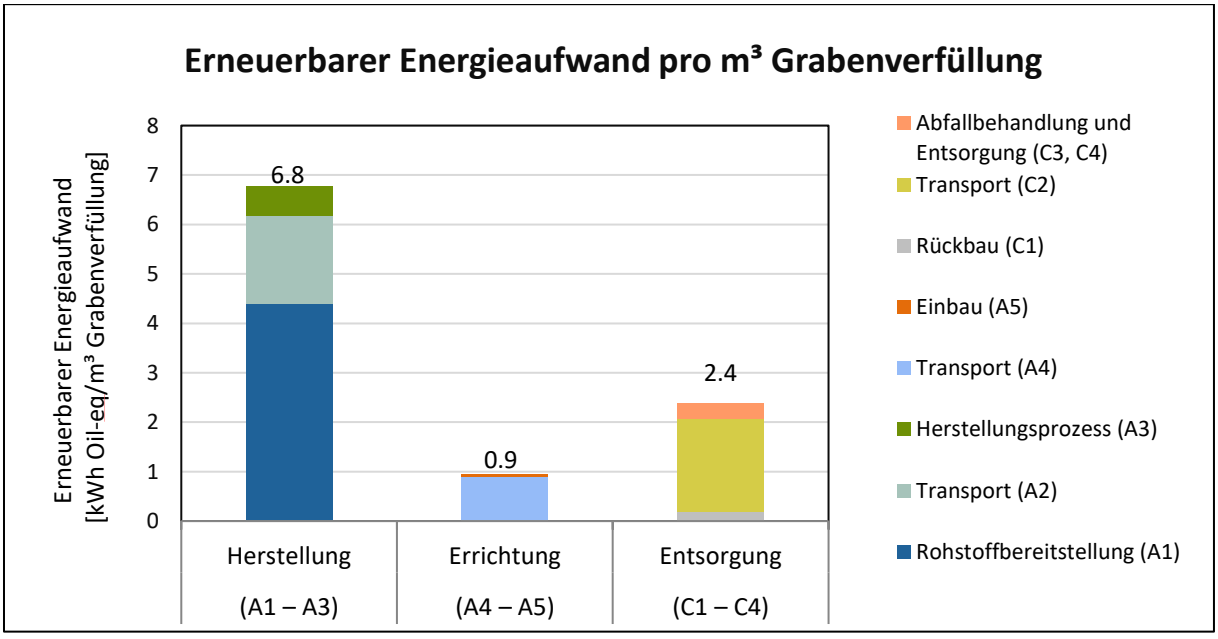


Abbildung 0-4: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden.

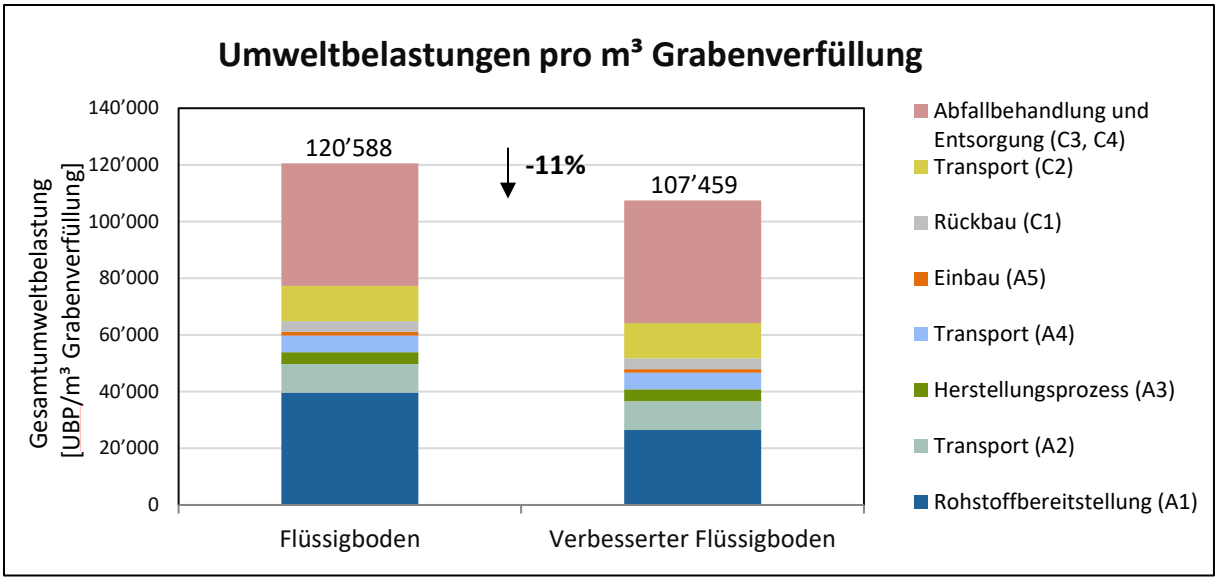


Abbildung 0-5: Gesamtumweltbelastungen von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A).

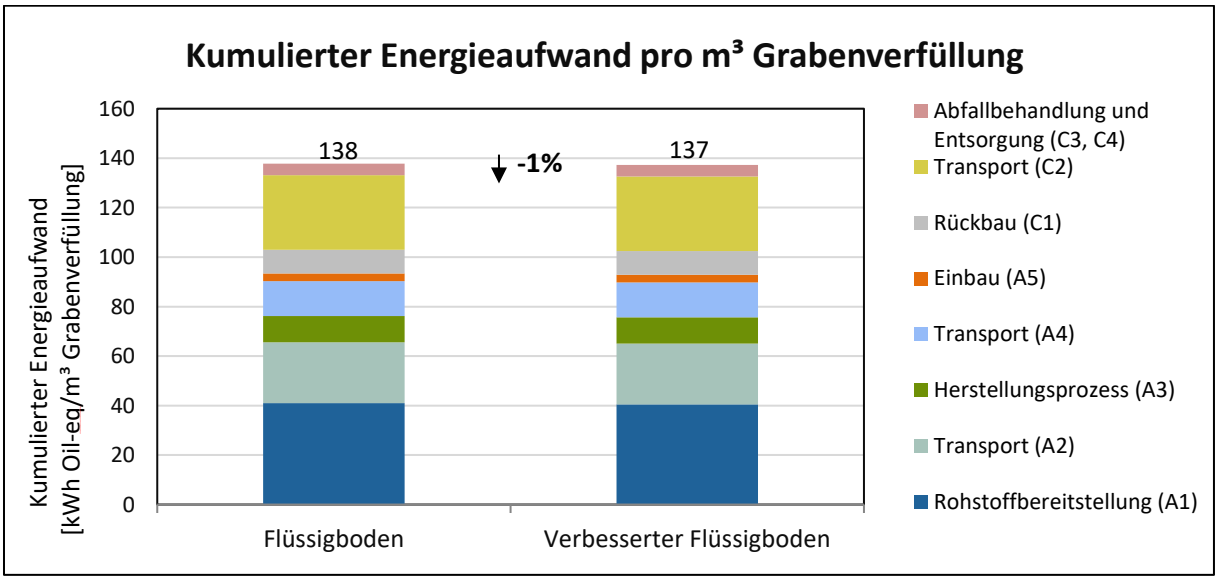


Abbildung 0-6: Kumulierter Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A).

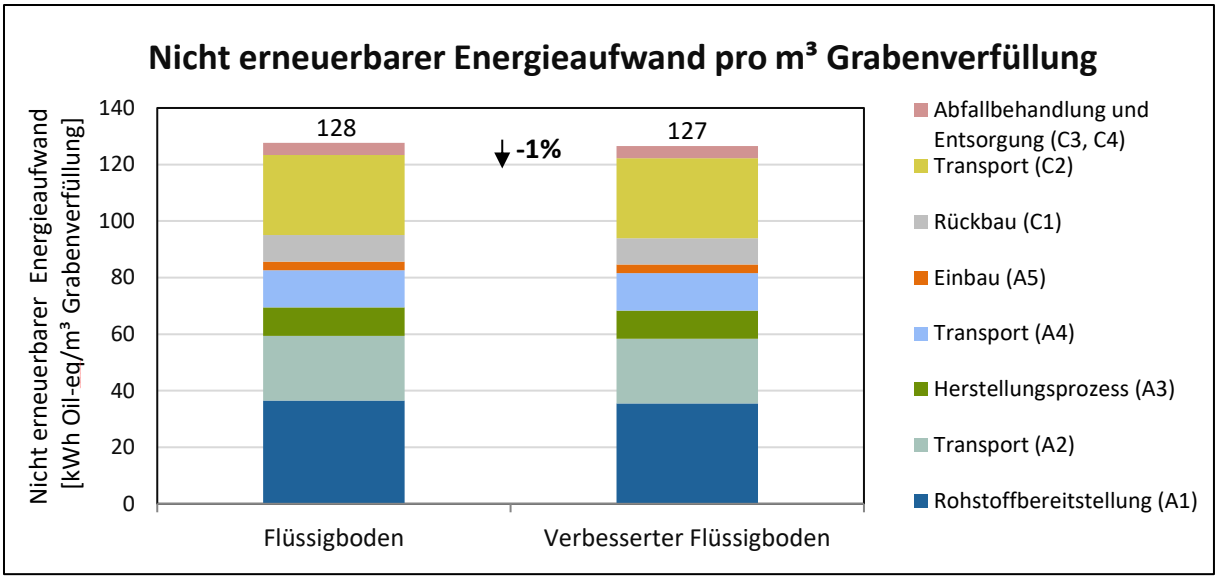


Abbildung 0-7: *Nicht erneuerbarer Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A).*

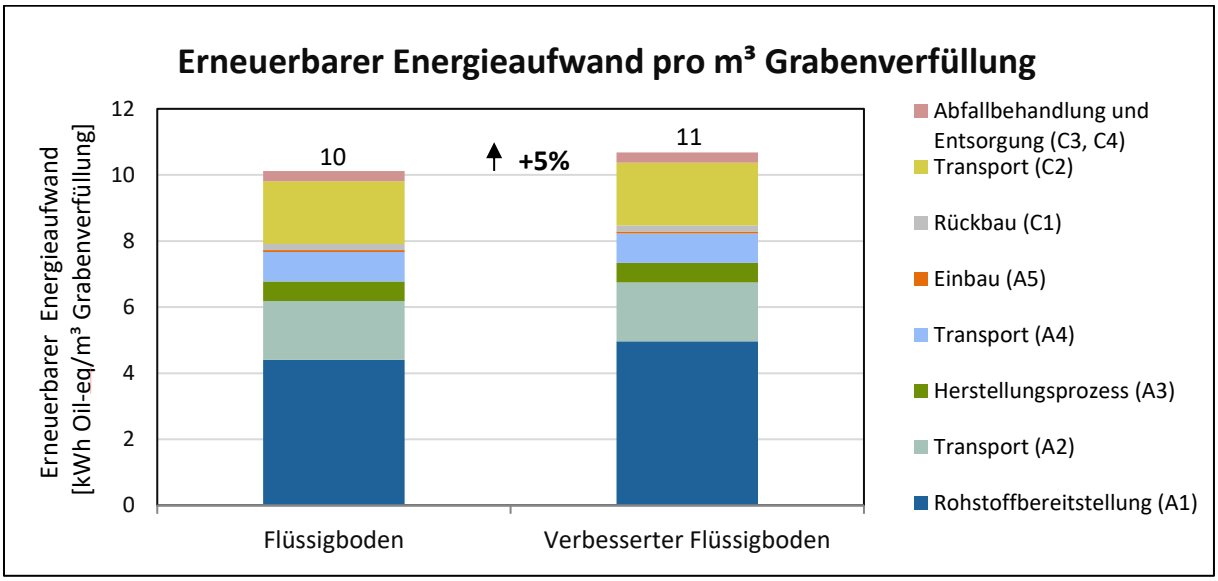


Abbildung 0-8: *Erneuerbarer Energieaufwand von herkömmlichem und verbessertem Flüssigboden (CEM I 42.5 R vs. CEM III A).*

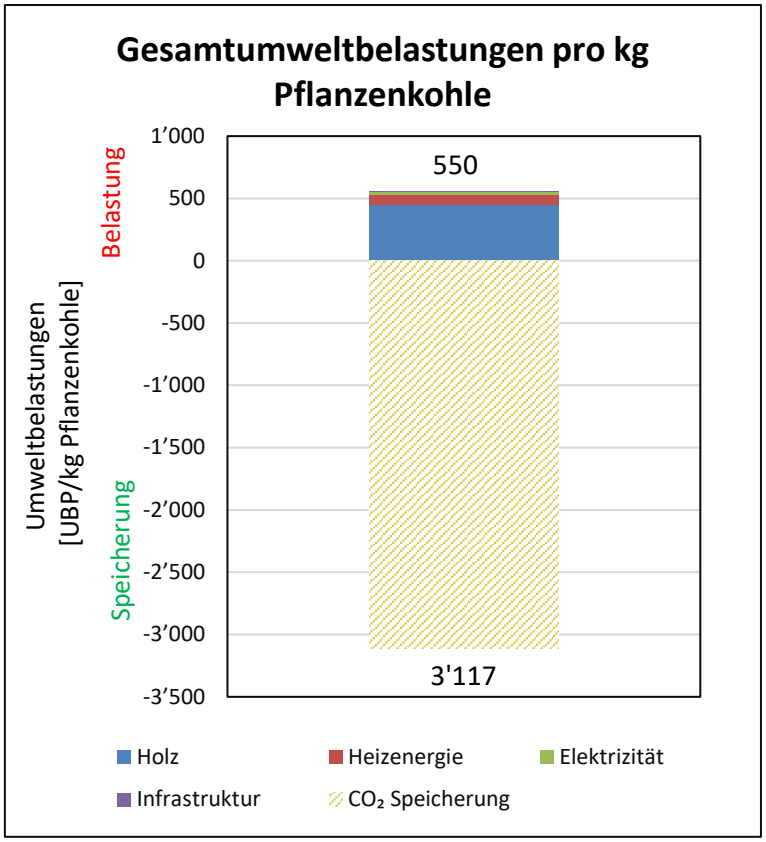


Abbildung 0-9: *Gesamtumweltbelastungen der Pflanzenkohleherstellung und separat ausgewiesene Kohlenstoffspeicherung (pro kg Pflanzenkohle).*

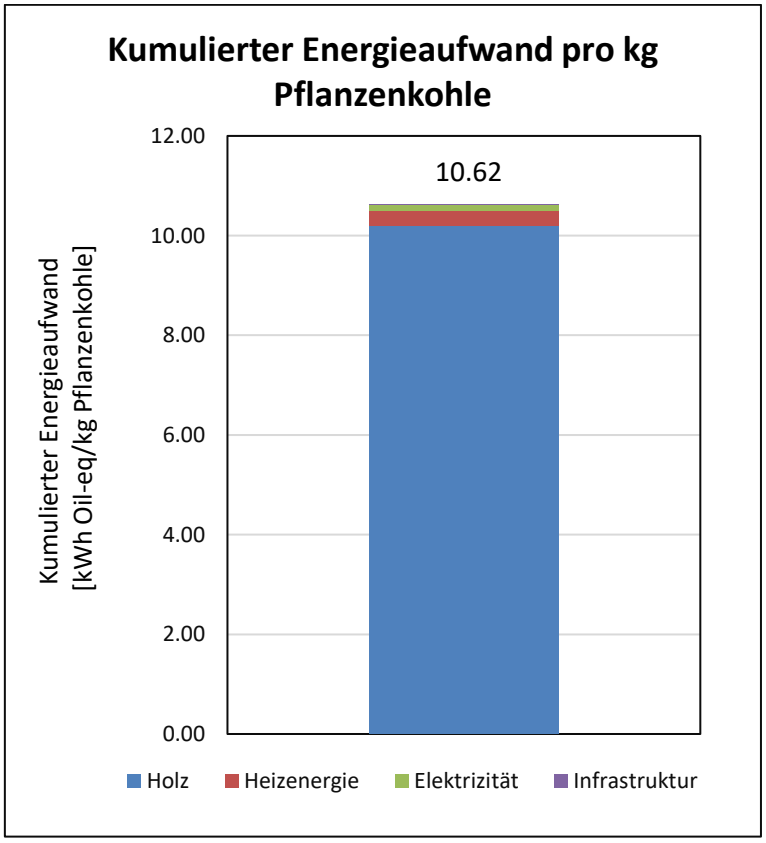


Abbildung 0-10: *Kumulierter Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle).*

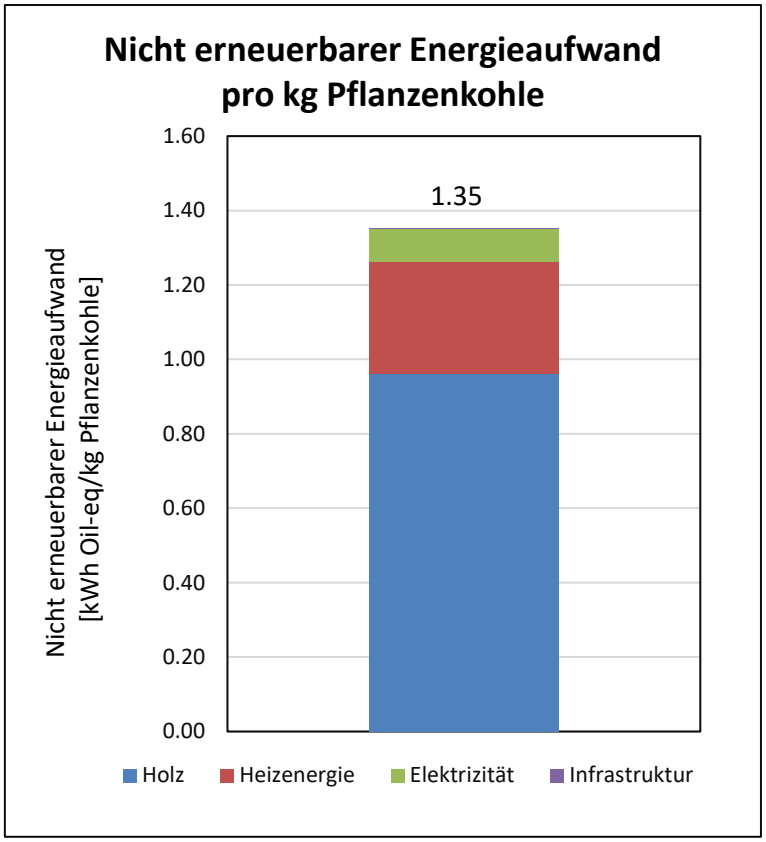


Abbildung 0-11: Nicht erneuerbarer Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle).

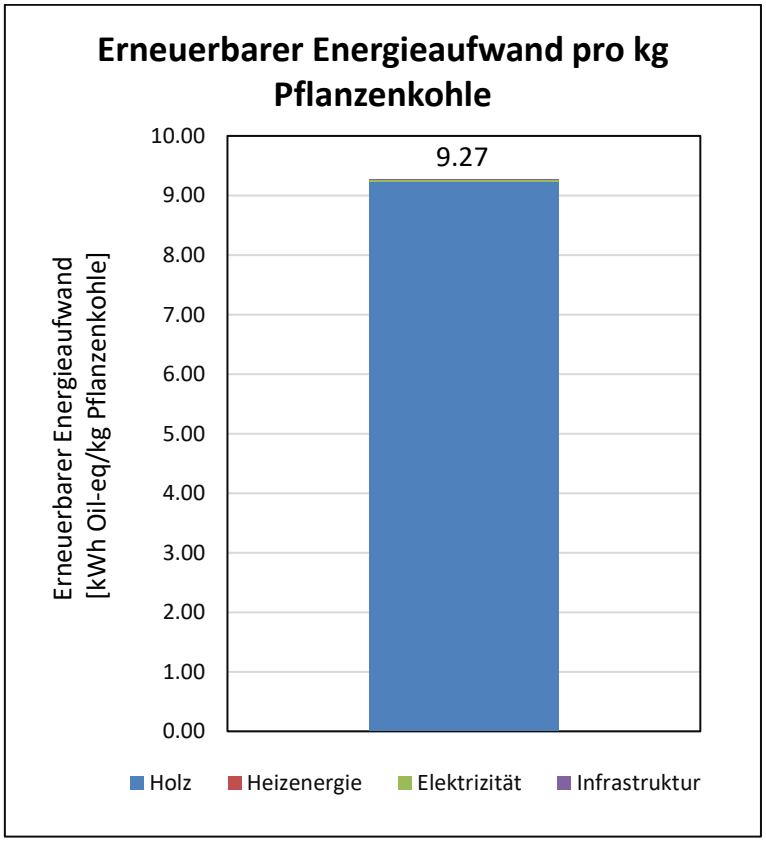


Abbildung 0-12: Erneuerbarer Energieaufwand der Pflanzenkohleherstellung (pro kg Pflanzenkohle).

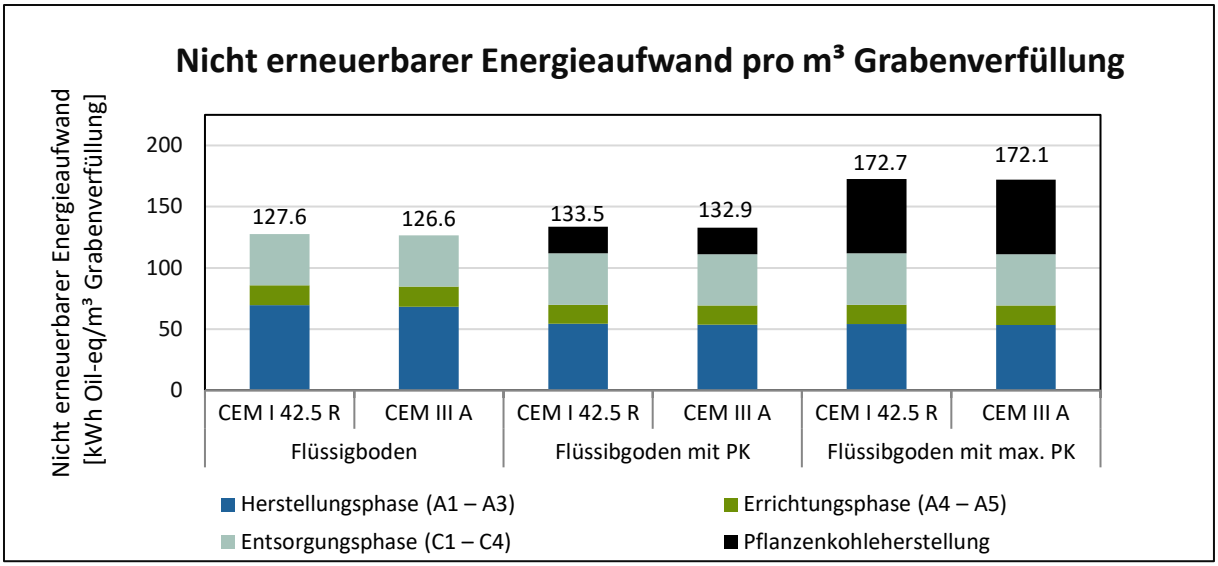


Abbildung 0-13: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle.

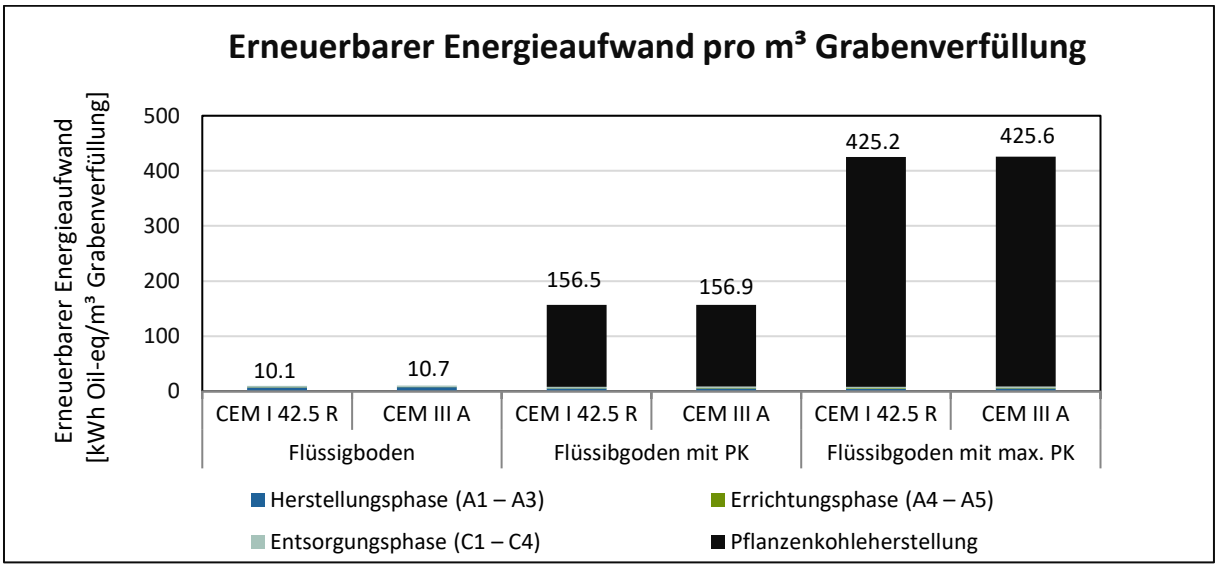


Abbildung 0-14: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit Flüssigboden. Vergleich der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur, der verbesserten Variante und zweier Varianten mit Pflanzenkohle.

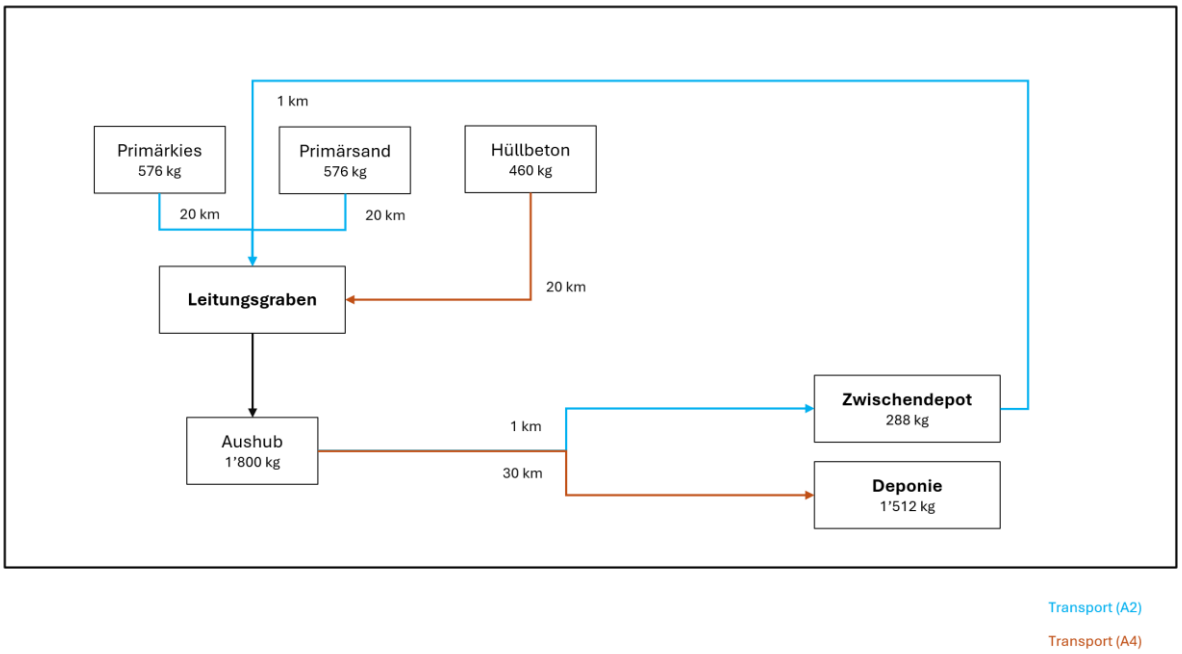


Abbildung 0-15: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» (A1 – A5).

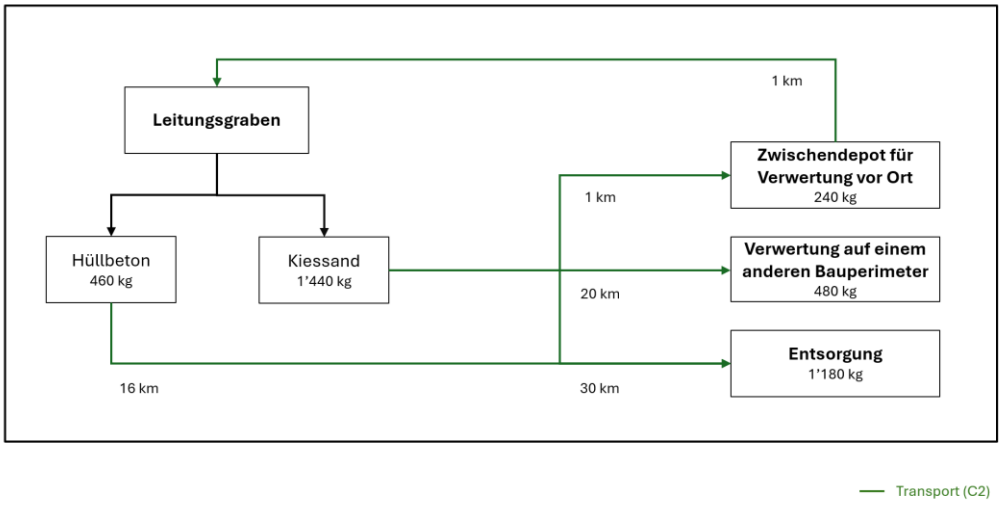


Abbildung 0-16: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand mit Hüllbeton» (C1 – C4).

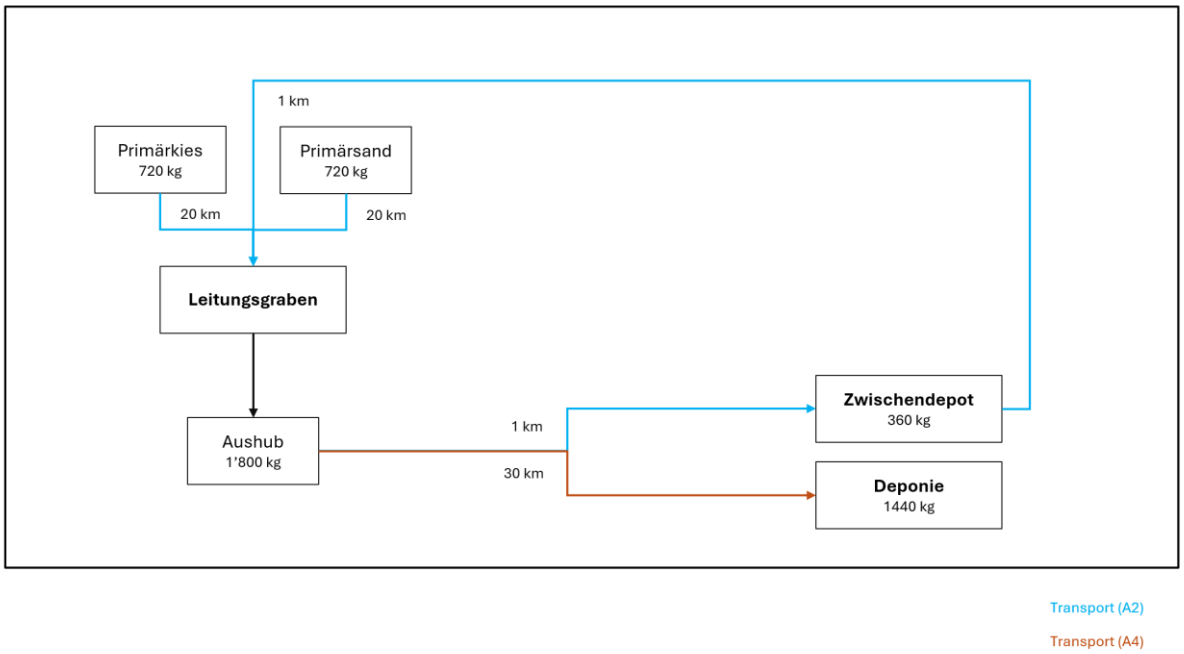


Abbildung 0-17: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand ohne Hüllbeton» (A1 – A5).

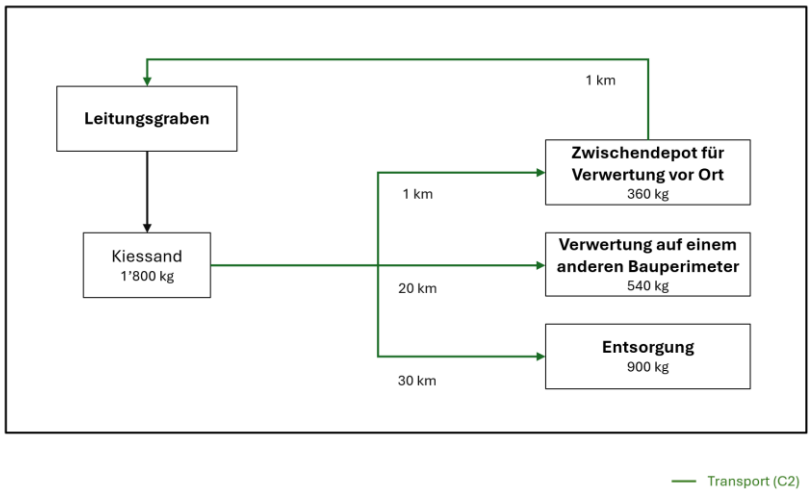


Abbildung 0-18: Materialflussanalyse und Transportdistanzen der konventionellen Bauweise «Kiessand ohne Hüllbeton» (C1 – C4).

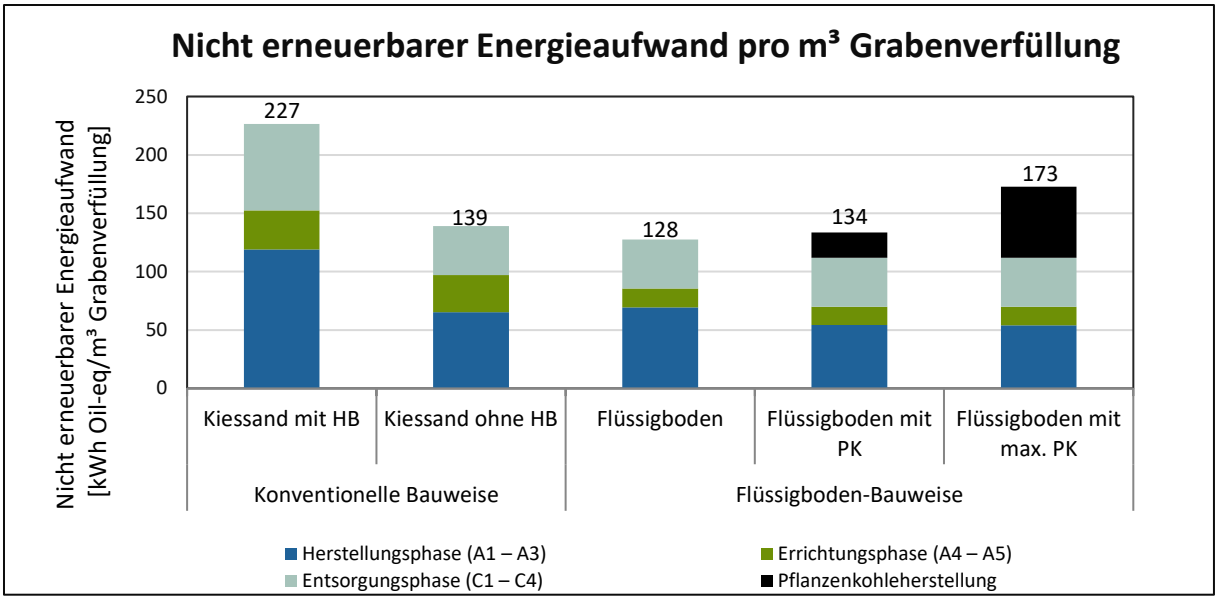


Abbildung 0-19: Nicht erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien.

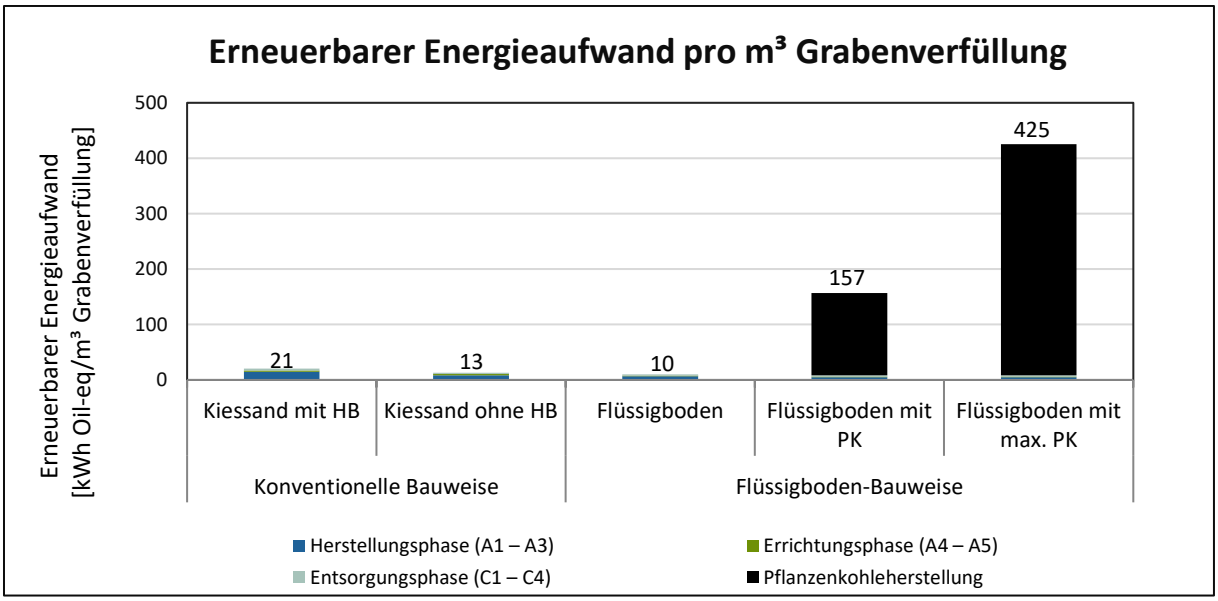


Abbildung 0-20: Erneuerbarer Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien.

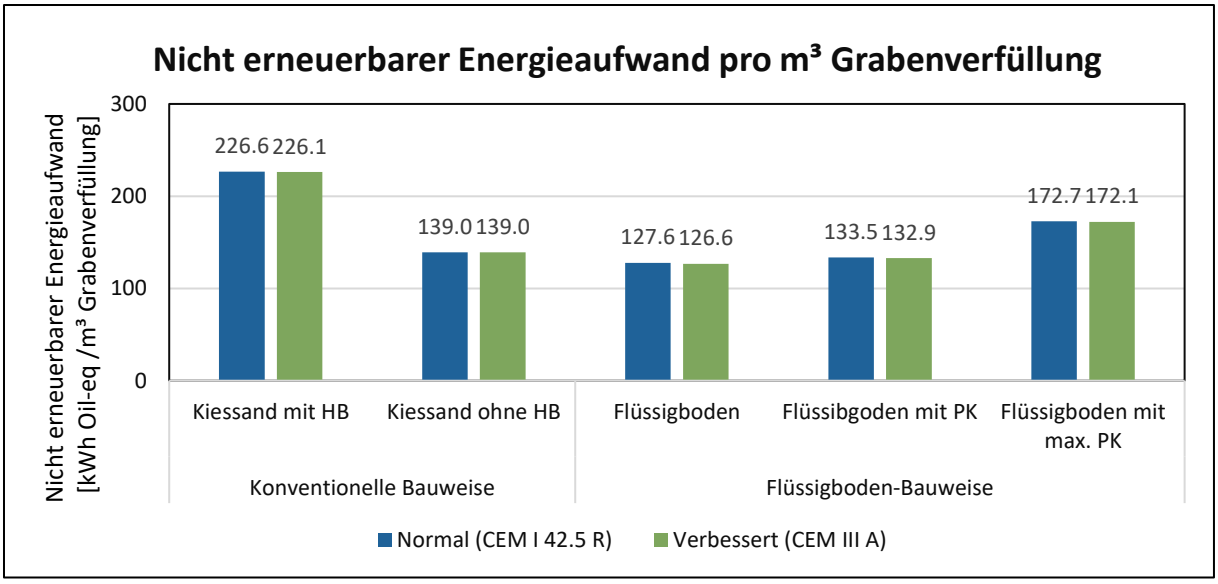


Abbildung 0-21: Vergleich des nicht erneuerbaren Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I bzw. CEM III A.

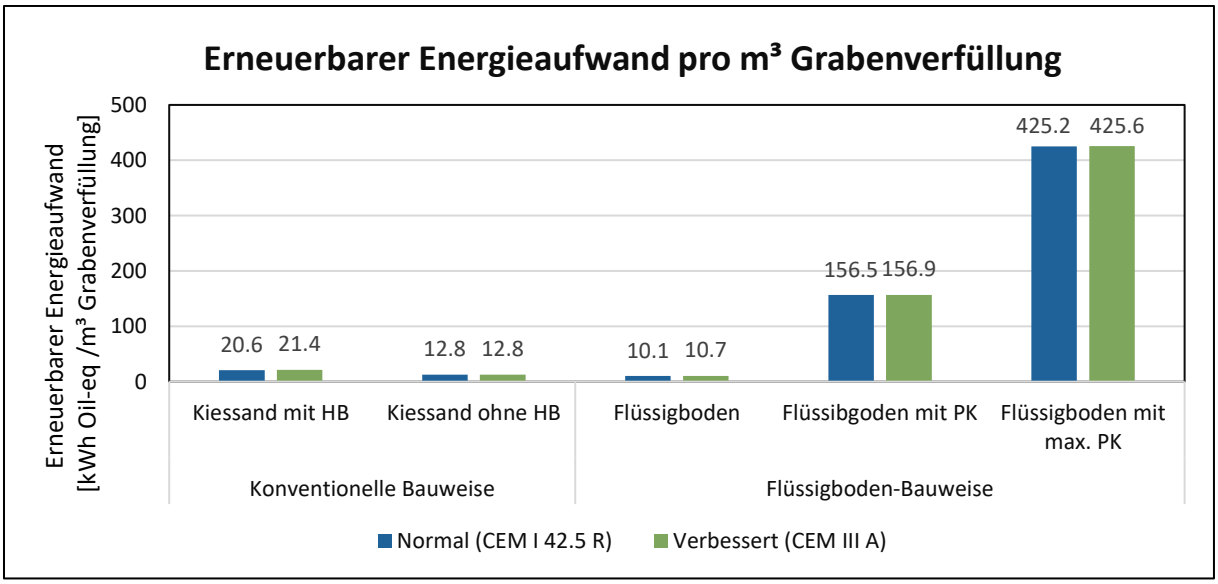


Abbildung 0-22: Vergleich des erneuerbaren Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung bei Verwendung von CEM I bzw. CEM III A.

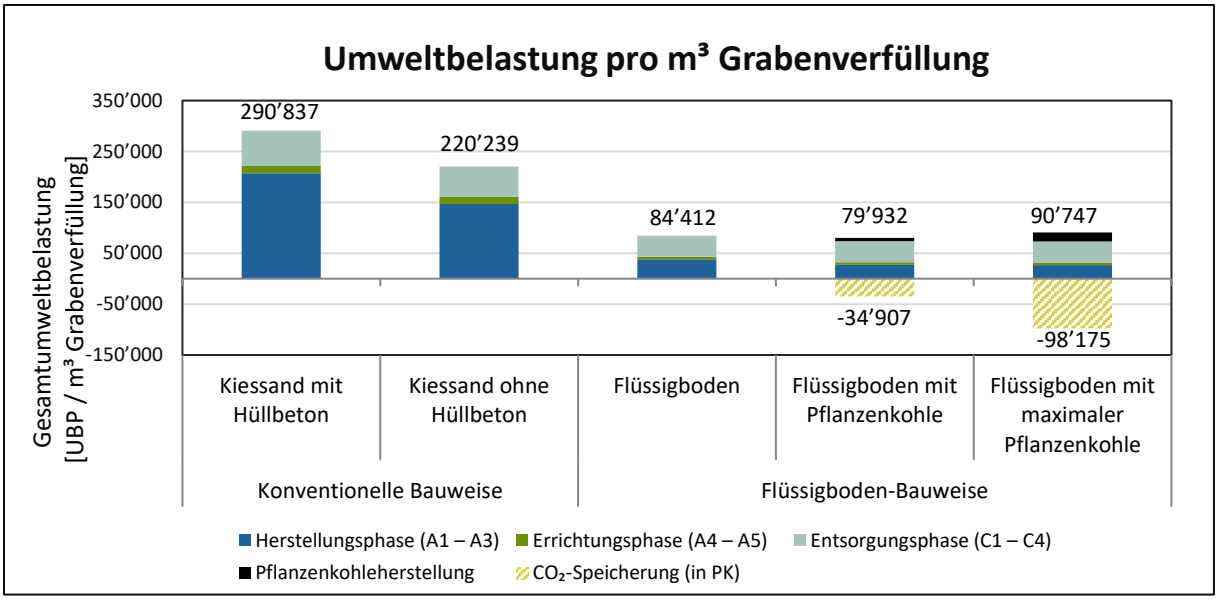


Abbildung 0-23: Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten.

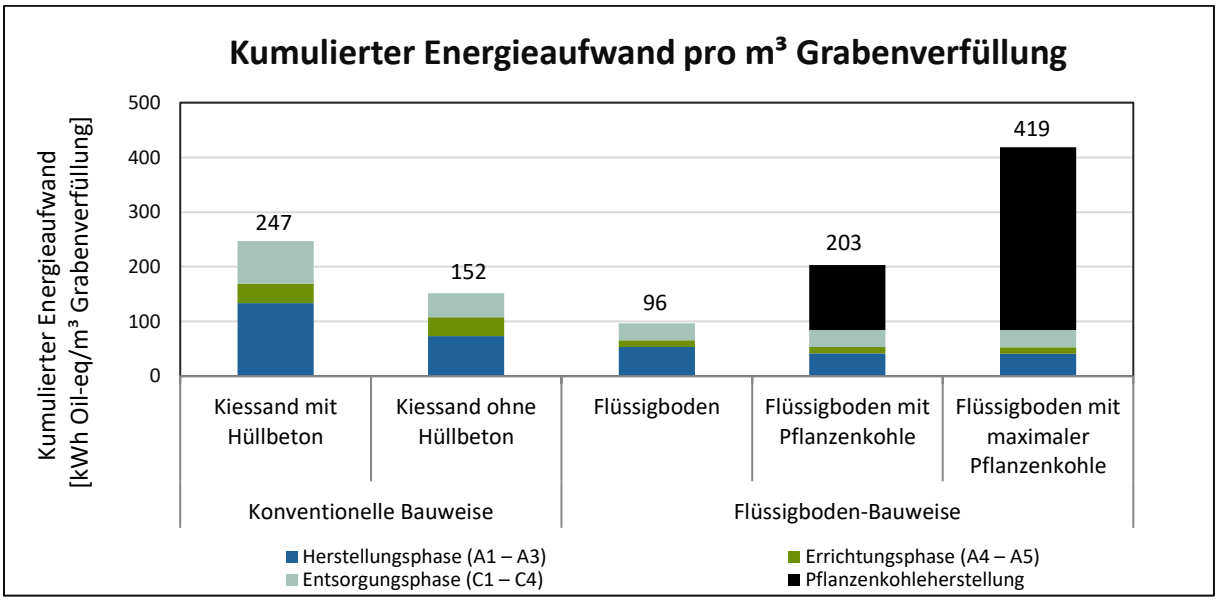


Abbildung 0-24: Kumulierter Energieaufwand pro m³ Grabenverfüllung (A1 – A5, C1 – C4) mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien unter Berücksichtigung einer reduzierten Grabenbreite bei den Flüssigbodenvarianten.

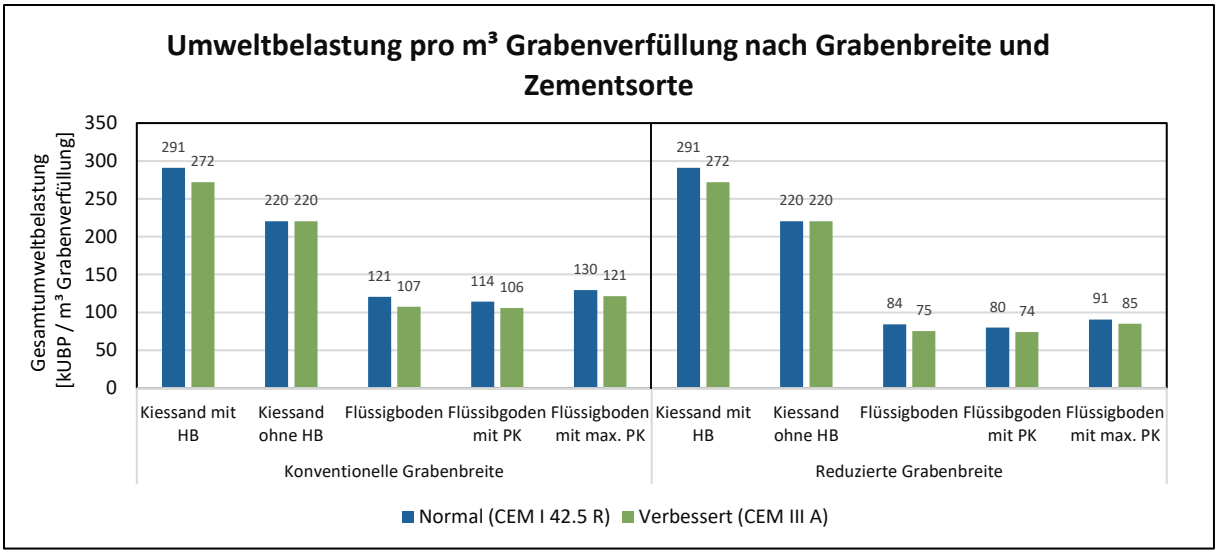


Abbildung 0-25: Vergleich der Gesamtumweltbelastungen pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte.

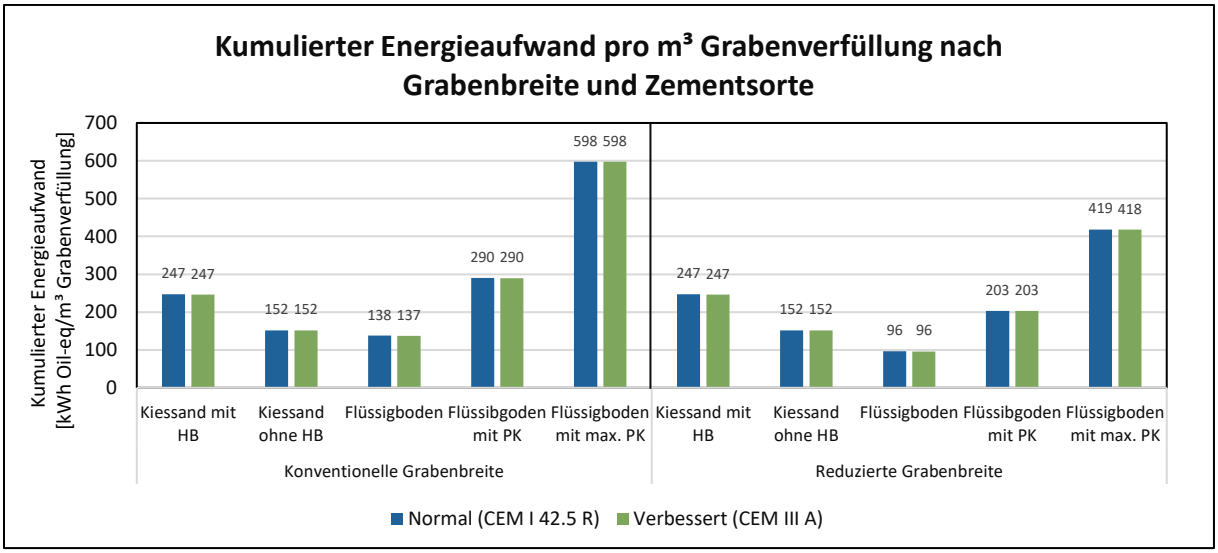


Abbildung 0-26: Vergleich des kumulierten Energieaufwands pro m³ Grabenverfüllung nach Grabenbreite und Zementsorte.

Anhang D. Potenzialabschätzung von Flüssigboden im Tiefbau

Methodik zur Potenzialabschätzung

Die Abschätzung des schweizweiten ökologischen Potenzials von Flüssigboden basiert auf der Studie «Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau Aktualisierung 2015» [35]. Dort wurden die mineralischen Materiallager und Bauabfallmengen im Tiefbau für die Schweiz und die einzelnen Kantone abgeschätzt für das Jahr 2015. Dabei wurden die Infrastrukturnetze der Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Gasversorgung und Stromversorgung über Leitungslängen und typische Querschnittsprofile für das Jahr 2015 abgebildet.

Die Leitungslängen wurden, je nach Netz, nach Leitungstypen (z. B. Zubringer-, Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen) oder nach Netzebenen (z. B. Hoch-, Mittel- und Niederspannung im Stromnetz) differenziert. Auf Basis dieser Leitungslängen und der jeweiligen Querschnittsprofile wurden Materiallager für Kiessand und Beton abgeleitet. Anschliessend werden über netzspezifische Instandsetzungsraten die jährlichen Bauabfallmengen berechnet. Diese Materialflüsse bilden die Grundlage für die Abschätzung, wie viel Verfüllmaterial pro Jahr im Tiefbau anfällt und potenziell durch Flüssigboden ersetzt werden kann.

Für die vorliegende Studie wurde das bestehende Modell aktualisiert, um ein Materiallager für das Bezugsjahr 2025 abzuleiten. Dazu wurden insbesondere die kantonalen Bevölkerungszahlen auf den Stand vom 31. Dezember 2024 aktualisiert und als Grundlage für die Hochrechnung verwendet.

Da sich das ökologische Potenzial von Flüssigboden insbesondere aus der Substitution von Primärmaterialien ergibt, und dieses Potenzial bei bestimmten Flüssigbodenvarianten zusätzlich erhöht werden könnte, wurden die Materialflüsse in dieser Studie getrennt nach den relevanten Materialgruppen Kiessand und Beton ausgewertet. Im Unterschied zu den modellierten Vergleichsszenarien im Kapitel 5 wurde hier keine fixe Volumenaufteilung zwischen Kiessand und Hüllbeton angenommen, sondern die Materialströme einzeln betrachtet. Dadurch können die theoretisch verfügbaren Substitutionsmengen für Flüssigboden transparent aus den jährlich anfallenden mineralischen Bauabfällen abgeleitet werden.

Das Potenzial von Flüssigboden im Tiefbau ergibt sich aus zwei Komponenten:

- dem Anteil des Bauabfalls, der nicht vor Ort verwertet und daher entsorgt wird und im Folgeprozess durch neues Verfüllmaterial ersetzt werden muss, sowie
- dem zusätzlichen Materialbedarf aus Netzerweiterungen (Netzwachstum), bei welchem ebenfalls neues Verfüllmaterial zum Einsatz kommt.

Der Anteil des Bauabfalls, der vor Ort direkt verwertet wird, wurde in der Potenzialabschätzung nicht berücksichtigt. Dabei handelt es sich um direkt vor Ort verwerteten Kiessand (siehe Tabelle 0-9). Hintergrund ist, dass die unmittelbare Verwertung vor Ort in der Regel mit geringen zusätzlichen Umweltwirkungen verbunden ist, vor allem aufgrund des vermiedenen Einsatzes von Primärrohstoffen und zusätzlicher Transporte. Würde dieses Material durch herkömmlichen Flüssigboden substituiert werden, ergäbe sich ökologisch kein Vorteil, sondern sogar eine höhere Umweltbelastung. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Potenzialabschätzung auf einer gesamtschweizerischen Betrachtung basiert. Ob jener kleine Anteil an Kiessand, der bei einzelnen Projekten nicht direkt vor Ort wiederverwertet wird, tatsächlich zu Flüssigboden aufbereitet und im selben Projekt wieder eingesetzt werden kann, ist von den jeweiligen Projektbedingungen abhängig. Da in dieser Studie primär konventionelle Bauweisen mit herkömmlichen Flüssigboden verglichen wurden und alternative Varianten als Spannweite des Potenzials dienen, fokussiert die Potenzialabschätzung auf jene mineralischen Bauabfälle, die nicht bereits vor Ort verwertet werden.

Betrachtetes System

Grundsätzlich besteht das betrachtete System aus zwei Teilprozessen für das rückgebaute Material: der direkten Verwertung vor Ort und der Entsorgung. Abbildung 0-27 zeigt das betrachtete System. Die Systemgrenze setzt nach dem Rückbau des Materials an.

Bei der direkten Verwertung vor Ort wird das Material auf oder nahe der Baustelle zwischengelagert, erneut eingebaut und erst am Ende der nächsten Nutzungsdauer entsorgt. Dieser Prozess ist in Abbildung 0-27 grau dargestellt und dient der Einordnung des Gesamtsystems, wird jedoch in der eigentlichen Potenzialabschätzung nicht berücksichtigt.

Für die Potenzialabschätzung werden ausschliesslich jene Materialmengen berücksichtigt, die nicht direkt vor Ort verwertet, sondern entsorgt werden. Für diese Materialmengen werden der Transport zur Entsorgung sowie die Entsorgung selbst berücksichtigt. Zusätzlich wird der gesamte Lebenszyklus des neu eingebrachten Verfüllmaterials einbezogen, das als Ersatz in das System eingebracht wird.

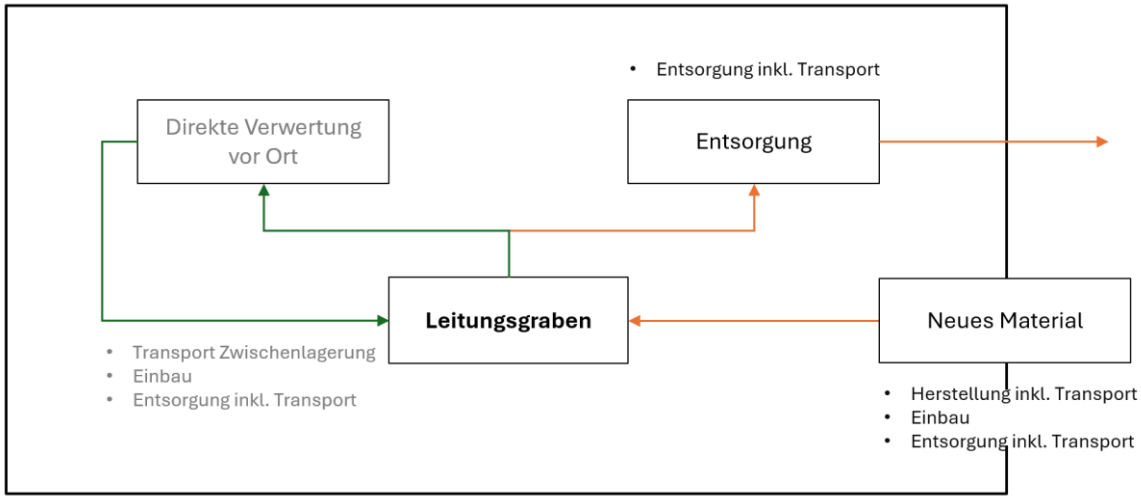


Abbildung 0-27: Betrachtetes System zur Potenzialabschätzung von Flüssigboden.

Abfallbewirtschaftung

Für die Abschätzung des verfügbaren Substitutionspotenzials wird zwischen entsorgtem Bauabfall und vor Ort verwertetem Material unterschieden. Tabelle 0-9 zeigt die in dieser Studie verwendeten Annahmen zur Abfallbewirtschaftung. Diese basieren auf [35] und wurden für die vorliegende Studie unverändert übernommen.

Tabelle 0-9: Annahmen zur Abfallbewirtschaftung für Kiessand und Beton [35].

Netz	Kiessand direkt verwertet [%]	Kiessand entsorgt [%]	Beton direkt verwertet [%]	Beton entsorgt [%]
Wasserversorgung	90	10	0	100
Abwasserentsorgung	90	10	0	100
Gasversorgung	90	10	0	0
Stromversorgung	50	50	0	100

Tabelle 0-10 zeigt, welche Materialflüsse dadurch im Ausgangszustand und nach der Substitution betrachtet werden. Beim Ersatz von Kiessand wird jener Kiessand, der im Referenzszenario entsorgt

würde, für die Herstellung von Flüssigboden genutzt und neues Kiessandmaterial durch Flüssigboden ersetzt. Beim Ersatz von Hüllbeton bleibt der anfallende Beton in der Entsorgung, während anstelle von neuem Hüllbeton Flüssigboden eingebaut wird[16].

Tabelle 0-10: Berücksichtigte Materialsubstitutionen in der Potenzialabschätzung.

Ersatz von Kiessand durch Flüssigboden		**Ersatz von Hüllbeton durch Flüssigboden**	
Vorher	**Nachher**	**Vorher**	**Nachher**
Kiessand wird entsorgt (C2 – C4)	Kiessand wird für die Flüssigbodenherstellung verwertet	Beton wird entsorgt (C2 – C4)	Beton wird entsorgt (C2 – C4)
Neues Kiessandmaterial wird eingebaut (A1 – A5, C1 – C4)	Flüssigboden wird eingebaut (A1 – A5, C1 – C4)	Neuer Beton wird eingebaut (A1 – A5, C1 – C4)	Flüssigboden wird eingebaut (A1 – A5, C1 – C4)

Dichten

Für die Potenzialabschätzung wurden für Flüssigboden und Kiessand jeweils Dichten von 1’800 kg/m³ angenommen. Für Hüllbeton wurde eine Dichte von 2’300 kg/m³ verwendet.

Grabengeometrien

Für die Abschätzung des Materiallagers und der jährlichen Materialflüsse wurden netzspezifische Grabengeometrien verwendet (Tabelle 0-11). Die geometrischen Annahmen basieren auf [35] und wurden für die vorliegende Studie unverändert übernommen.

Tabelle 0-11: Grabengeometrien zur Modellierung der Infrastrukturnetze [35].

Netz	**Breite [m]**	**Tiefe [m]**	**Länge [m]**
Wasserversorgung	0.6	1.4	1
Abwasserentsorgung	1.05	2	1
Gasversorgung	0.6	0.9	1
Stromversorgung	0.6	0.6	1

Instandsetzungsraten

Die jährlichen Bauabfallmengen werden auf Basis der Materiallager und netzspezifischer Instandsetzungsraten abgeschätzt. Tabelle 0-12 zeigt die verwendeten Instandsetzungsraten nach Netz [35]. Diese Raten repräsentieren die durchschnittliche jährliche Instandsetzung der bestehenden Infrastruktur und bestimmen damit die Mengen an Bauabfall, die aus dem Bestandssystem anfallen.

[16] Beim Ersatz von Hüllbeton durch Flüssigboden wird der anfallende Beton sowohl im Ausgangszustand als auch nach der Substitution entsorgt, da er nicht für die Herstellung von Flüssigboden verwertet werden kann. Die damit verbundenen Umweltwirkungen werden daher in der Potenzialabschätzung vernachlässigt, weil sie vor und nach der Substitution gleich bleiben.

Tabelle 0-12: Instandsetzungsraten zur Abschätzung der jährlichen Bauabfallmengen [35].

Netz	Instandsetzungsrate [%]
Wasserversorgung	1.5
Abwasserentsorgung	1.25
Gasversorgung	1.5
Stromversorgung	2

Grundannahmen zur Substitution von Kiessand und Beton durch Flüssigboden

Die Potenzialabschätzung basiert auf einer abfallbasierten Betrachtung der jährlichen Materialflüsse und bildet ein vereinfachtes, optimistisches Potenzial auf gesamtschweizerischer Ebene ab. Es wurden folgende zentrale Annahmen getroffen:

- Die jährlich als Bauabfall aus dem System abgehenden Materialmengen werden durch gleich grosse Mengen an neuem Verfüllmaterial ersetzt.
- Jene Kiessandmengen, die im Rahmen von Instandsetzungsarbeiten nicht direkt vor Ort wiederverwertet werden, werden für die Herstellung von Flüssigboden als grundsätzlich verfügbar angenommen.
- Für diese als substituierbar angenommenen Kiessandmengen wird ein volumengleicher Ersatz durch Flüssigboden unterstellt.
- Beim Beton werden nur jene Anwendungen berücksichtigt, die funktional als substituierbar eingestuft wurden.
- Für substituierbaren Hüllbeton wird ein volumengleicher Ersatz durch Flüssigboden angenommen. Aufgrund der geringeren Dichte von Flüssigboden gegenüber Hüllbeton reduziert sich die eingesetzte Masse dabei auf 78 %.
- Die Potenzialabschätzung setzt voraus, dass geeignete Aufbereitungsanlagen und logistische Strukturen verfügbar sind, sodass Flüssigboden in sinnvoller Distanz zu den Baustellen hergestellt und eingesetzt werden kann.

Berücksichtigung des Netzwachstums

Zusätzlich zum abfallbasierten Potenzial wurde ein möglicher Materialbedarf aus Netzerweiterungen (Neubau) berücksichtigt. Das Netzwachstum wurde jeweils als Anteil des jährlichen Materialoutputs modelliert und dient dazu, den potenziellen zusätzlichen Bedarf an neuem Verfüllmaterial abzuschätzen.

- Für das Wasser-, Abwasser- und Stromnetz wurde ein jährliches Netzwachstum von 0.5 % angenommen.
- Für das Gasnetz wurde ein jährliches Netzwachstum von 0.1 % angenommen.

Reduzierte Grabenbreite bei Flüssigboden

Zusätzlich zur abfallbasierten Substitution wurde der potenzielle Einfluss einer reduzierten Grabenbreite beim Einsatz von Flüssigboden berücksichtigt (siehe Kapitel 5.4). In der vorliegenden Studie wurde vereinfachend eine pauschale Reduktion der Grabenbreite um 0.30 m gegenüber der konventionellen Bauweise angenommen [39]. Grabentiefe und -länge blieben unverändert. Diese Annahme ist

insbesondere für Ausbau- beziehungsweise Neubausituationen plausibel, in denen die Grabengeometrie bei der Planung gezielt auf den Einsatz von Flüssigboden abgestimmt werden kann. Bei Instandsetzungsarbeiten ist eine Reduktion der Grabenbreite hingegen nicht in allen Fällen gleichermassen realisierbar, da die bestehende Leitungsführung und die baulichen Randbedingungen den Grabenquerschnitt häufig vorgeben.

Die reduzierten Grabengeometrien sind in Tabelle 0-13 dargestellt.

Tabelle 0-13: Reduzierte Grabengeometrien beim Einsatz von Flüssigboden.

Netz	Breite [m]	Tiefe [m]	Länge [m]
Wasserversorgung	0.3	1.4	1
Abwasserentsorgung	0.75	2	1
Gasversorgung	0.3	0.9	1
Stromversorgung	0.3	0.6	1

Materiallager nach Infrastrukturnetz

Abbildung 0-28 zeigt die geschätzten Materiallager in den vier betrachteten Infrastrukturnetzen (Wasser-, Abwasser-, Gas- und Stromversorgung) für jeden Kanton für das Jahr 2025. Die gesamten Materialmengen an Kiessand und Beton werden in Millionen Tonnen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bevölkerungsreiche Kantone wie Zürich, Bern oder Aargau die grössten Materiallager aufweisen. Zudem zeigt sich, dass insbesondere das Abwassernetz in allen Kantonen den grössten Anteil am gesamten Materiallager ausmacht.

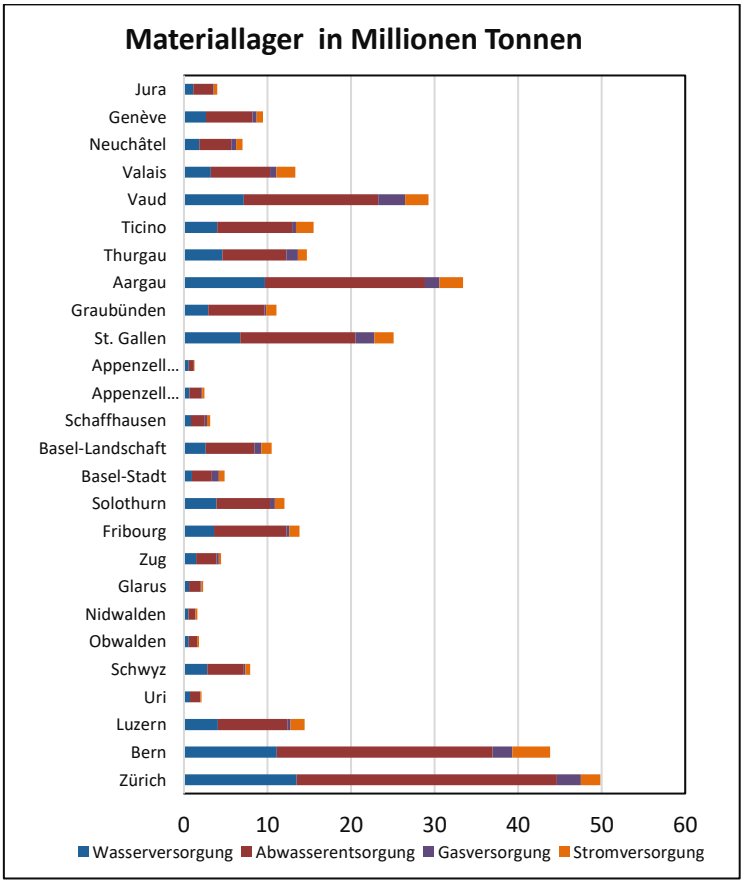


Abbildung 0-28: Materiallager im Schweizer Tiefbau nach Kanton und Infrastrukturwerk im Jahr 2025.

Abbildung 0-29 fasst die Materiallager auf nationaler Ebene zusammen und zeigt die Gesamtmengen an Kiessand und Beton je Infrastrukturnetz. Besonders deutlich wird, dass das Abwassernetz mit Abstand das grösste Materiallager aufweist. Zudem zeigt die Darstellung, dass Beton vor allem im Abwassernetz relevant ist, während die übrigen Netze überwiegend durch Kiessand geprägt sind.

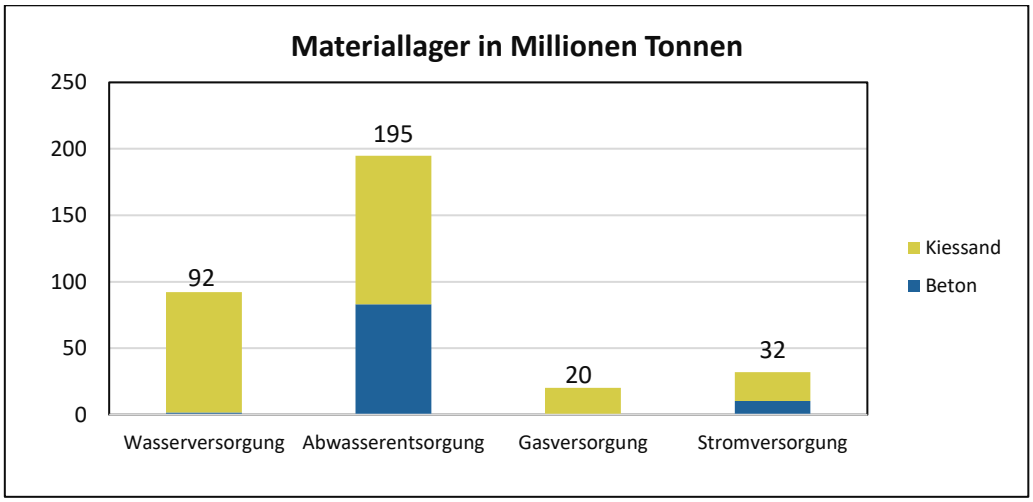


Abbildung 0-29: Materiallager im Schweizer Tiefbau nach Infrastrukturwerken und Materialart.

Abbildung 0-30 zeigt die geschätzten jährlichen Bauabfallmengen von Beton und Kiessand. Auffällig ist, dass Beton nicht direkt vor Ort verwertet wird. Die gesamte Betonmenge fällt somit im Bereich der indirekten Verwertung bzw. Deponierung an. Beim Kiessand zeigt sich ein anderes Bild, hier wird der grösste Teil, ca. 84 %, direkt vor Ort verwertet.

Das relevante Substitutionspotenzial für Flüssigboden liegt bei jenen Materialmengen, die nicht vor Ort verwertet werden. Diese Mengen stellen das theoretisch verfügbare Potenzial dar. Insgesamt ergibt sich daraus eine verfügbare Bauabfallmenge von 556’276 t pro Jahr aus Beton und Kiessand (486'551 t Beton und 69'725 t Kiessand).

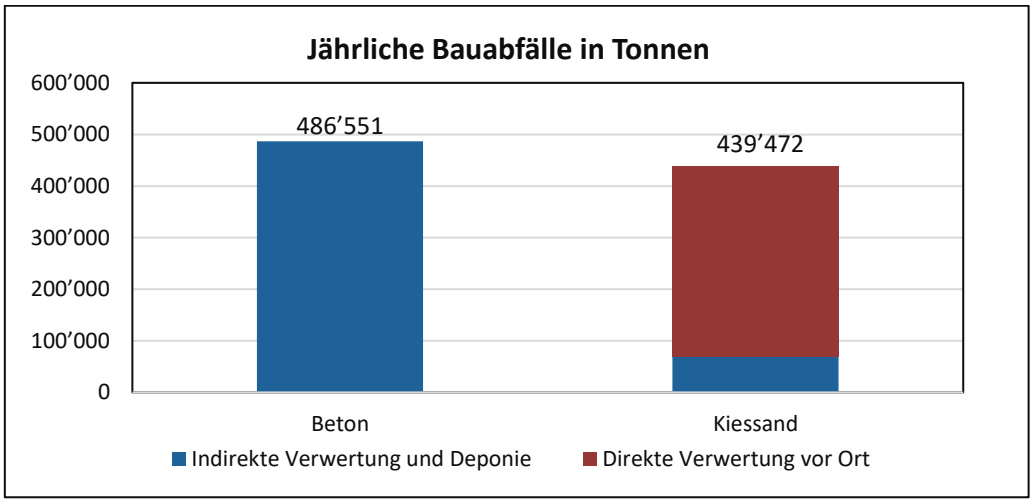


Abbildung 0-30: Jährliche Bauabfallmengen von Beton und Kiessand nach Verwertungsart.

Resultate zur Potenzialabschätzung

Substituierbare Materialmengen

Ausgehend von der theoretisch verfügbaren Bauabfallmenge von 556’276 t pro Jahr wurde abgeschätzt, welche Mengen tatsächlich durch Flüssigboden ersetzt werden können. Dabei wurden netzspezifische Einschränkungen sowie das Netzwachstum berücksichtigt. Tabelle 0-14 zeigt die substituierbaren Materialmengen aus rückgebautem Grabenmaterial, das nicht vor Ort wieder eingebaut wird und deshalb durch neues Verfüllmaterial ersetzt werden muss, sowie die zusätzlichen Mengen infolge Netzwachstums.

Tabelle 0-14: Substituierbare Materialmengen von Kiessand und Beton durch Flüssigboden unter Berücksichtigung von Instandsetzung und Netzwachstum (t/a).

Material	Dichte [kg/m³]	Substituierbare Menge aus Instandsetzung [t/a]	Substituierbarer Anteil aus Instandsetzung [%]	Menge aus Netzwachstum [t/a]
Kiessand	1'800	69’725	100%	1’954
Beton	2'300	373’466	77%	1’488

Annahmen

Beim Kiessand wird für die Potenzialabschätzung angenommen, dass die gesamte nicht vor Ort verwertete Bauabfallmenge vollständig durch Flüssigboden ersetzt werden kann. Dies betrifft den entsorgten Kiessand. Da Kiessand und Flüssigboden beide eine Dichte von 1’800 kg/m³ aufweisen, erfolgt die Substitution massengleich.

Beim Beton wird nicht die gesamte anfallende Betonmenge als substituierbar angenommen, sondern nur jene Anwendungen, die im Rahmen dieser Potenzialabschätzung funktional als grundsätzlich ersetzbar eingestuft wurden. Auf dieser Basis ergibt sich modellhaft ein substituierbarer Anteil von insgesamt 77 % der anfallenden Betonmenge. Nicht berücksichtigt wurden Betonanwendungen, bei denen Flüssigboden die Funktion des Betons nicht übernehmen kann, beispielsweise bei Regenbecken, Kanalbauwerken oder Abwasserreinigungsanlagen.

- Im Wasserversorgungsnetz wurde daher kein Substitutionspotenzial für Beton angesetzt, da sich der modellierte Betonbedarf auf Regenbecken bezieht.
- Im Abwasserentsorgungsnetz wurde Bettungsbeton in der Potenzialabschätzung als grundsätzlich substituierbar angenommen, während Beton für Kanalbauwerke, Abwasserreinigungsanlagen und Regenbecken nicht berücksichtigt wurde.
- Im Gasnetz wurde gemäss zugrunde liegender Studie kein Beton modelliert [35], weshalb hier kein Substitutionspotenzial für Beton besteht.
- Im Stromversorgungsnetz bezieht sich der Betonbedarf auf Überdeckung, Rohrumhüllung und Bettung. Analog zum Abwasserentsorgungsnetz wurde angenommen, dass der Rohrumhüllungsbeton vollständig ersetzt werden kann.

Da Hüllbeton mit 2’300 kg/m³ eine höhere Dichte aufweist als Flüssigboden (1’800 kg/m³), wurde die substituierbare Betonmenge bei der Umrechnung massenbasiert mit dem Faktor 0.78 berücksichtigt. Dieser Faktor ergibt sich aus dem Verhältnis der Materialdichten und stellt sicher, dass die Substitution volumengleich erfolgt.

Die ausgewiesenen Betonsubstitutionspotenziale sind als stark vereinfachte und optimistische Modellannahmen im Rahmen der Potenzialabschätzung zu verstehen.

Einordnung der Umweltwirkungen der Verfüllmaterialien

Zur Einordnung der nachfolgenden Resultate zeigt Abbildung 0-31 die Treibhausgasemissionen der betrachteten Verfüllmaterialien bezogen auf 1 Tonne Verfüllmaterial über den betrachteten Lebenszyklus A1 – A5 bis C1 – C4. Dargestellt sind Hüllbeton (CEM I 42.5 R), verbesserter Hüllbeton (CEM III A), Kiessand, Flüssigboden (CEM I 42.5 R) und verbesserter Flüssigboden (CEM III A).

Im Unterschied zu den modellierten Vergleichsszenarien in Kapitel 5 wurde für die Potenzialabschätzung keine feste Volumenaufteilung zwischen Kiessand und Hüllbeton angenommen. Stattdessen wurden die Materialströme von Kiessand und Beton getrennt betrachtet und entsprechend durch Flüssigboden ersetzt. Die Darstellung auf 1 Tonne dient daher der Einordnung und Vergleichbarkeit der verschiedenen Verfüllmaterialien und der damit verbundenen Bauweisen.

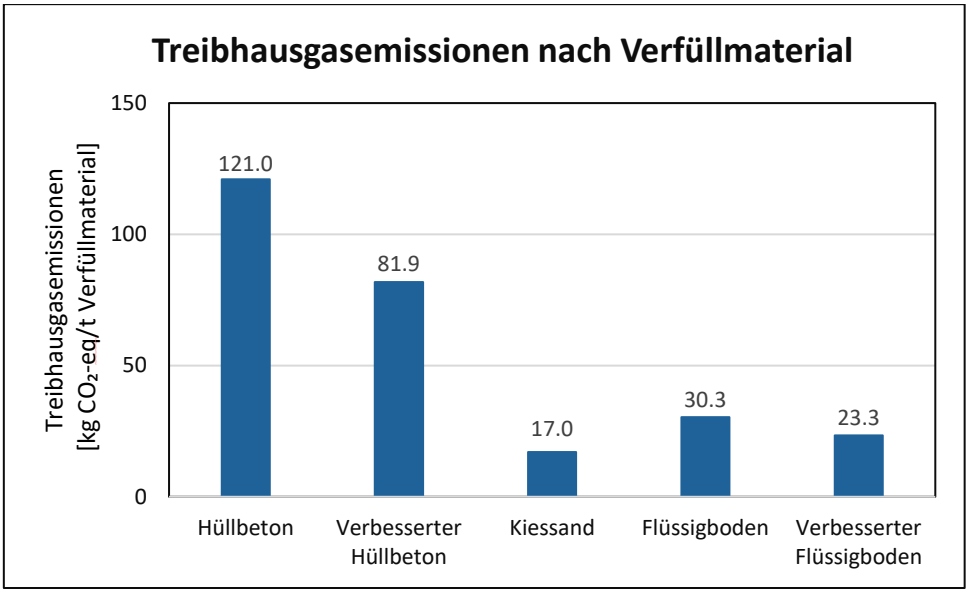


Abbildung 0-31: Treibhausgasemissionen der betrachteten Verfüllmaterialien bezogen auf 1 Tonne Verfüllmaterial über den Lebenszyklus A1 – A5 bis C1 – C4. Die Darstellung dient der Vergleichbarkeit der Verfüllmaterialien und der damit verbundenen Bauweisen.

Die verwendete Rezeptur für Flüssigboden bzw. verbesserten Flüssigboden entspricht der durchschnittlichen Rezeptur aus Kapitel 3. Die verwendeten Rezepturen für Kiessand, Beton und verbesserten Beton entsprechen den in Kapitel 5 verwendeten Rezepturen. Analog zu Kapitel 5 werden in diesem Kapitel Flüssigboden und Hüllbeton jeweils sowohl mit CEM I 42.5 R als auch mit dem klinkerreduzierten Zement CEM III A betrachtet. Für Kiessand entfällt diese Unterscheidung, da es sich nicht um ein zementhaltiges Material handelt.

Gesamtpotenzial der Treibhausgasemissionsreduktion

Abbildung 0-32 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen der mit Flüssigboden substituierbaren Materialmengen von Kiessand und Hüllbeton. Für die Berechnung wurden beim Flüssigboden und beim Hüllbeton Zement CEM I 42.5 R verwendet.

Bei konventioneller Grabenbreite führt die Substitution der relevanten Betonmengen durch Flüssigboden zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 65 %. Beim Kiessand zeigt sich hingegen eine Zunahme von 17 %, da Flüssigboden einen höheren Emissionsfaktor als Kiessand aufweist (siehe Abbildung 0-31). Insgesamt ergibt sich daraus eine Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen um 60 %, was vermiedenen Emissionen von 37’767 t CO_2-eq pro Jahr entspricht.

Wird zusätzlich die reduzierte Grabenbreite berücksichtigt, sinken die Emissionen aus dem substituierten Beton weiter (-71 %) und die zuvor beobachtete Zunahme beim Kiessand wird jetzt zu einer Reduktion von 7%. Die reduzierte Grabenbreite wirkt somit kompensierend und verhindert, dass die Substitution von Kiessand durch Flüssigboden zu einer relevanten Mehrbelastung führt. Insgesamt ergibt sich dadurch eine Gesamtreduktion der Treibhausgasemissionen von 67 %, was vermiedenen Emissionen von 42'131 t CO_2-eq pro Jahr entspricht.

Die grössten absoluten Reduktionspotenziale liegen im Abwasser- und Stromnetz, da dort die höchsten Hüllbetonmengen ersetzt werden können.

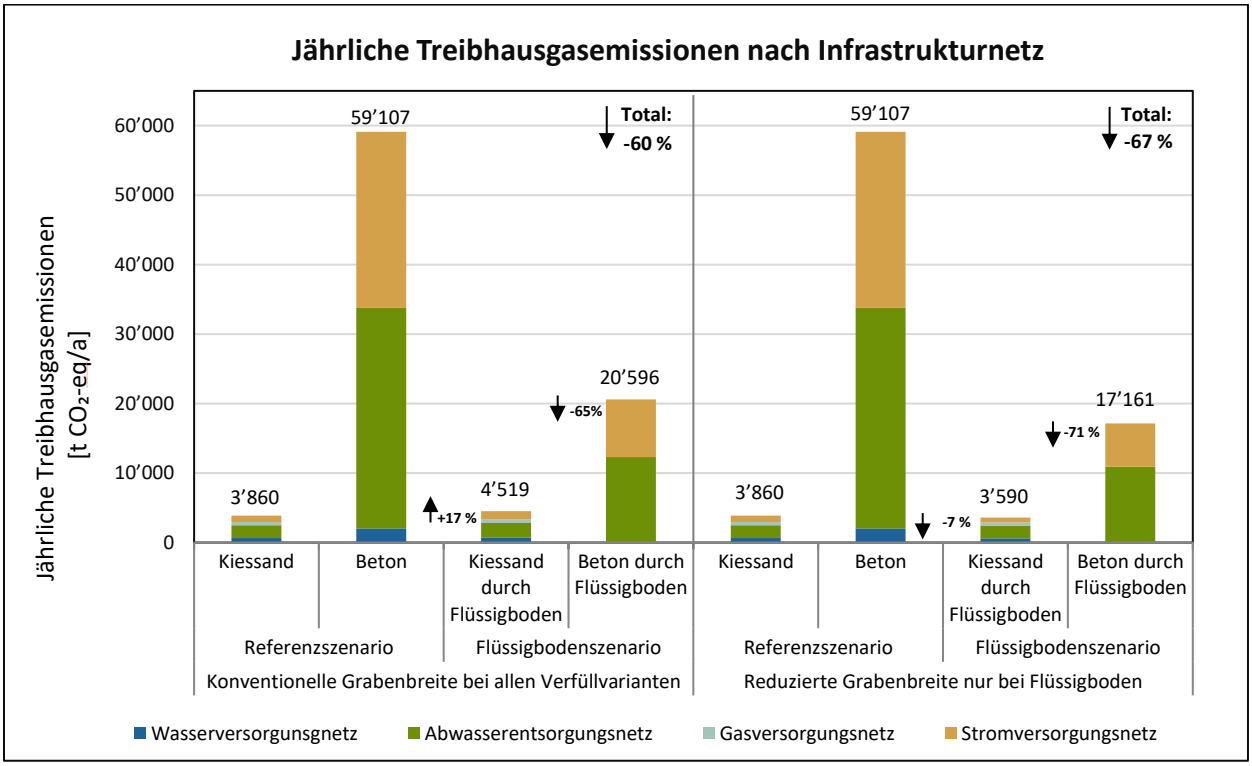


Abbildung 0-32: Jährliche Treibhausgasemissionen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller Grabenbreite bei allen Verfüllvarianten und reduzierter Grabenbreite nur bei Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 0-33 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen der durch Flüssigboden substituierbaren Materialmengen von Kiessand und Hüllbeton. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde dabei CEM III A verwendet. Der Trend ist grundsätzlich gleich wie bei den Resultaten mit CEM I 42.5 R: Der Ersatz von Hüllbeton durch Flüssigboden führt zu einer deutlichen Reduktion, während sich die Emissionen beim Ersatz von Kiessand durch Flüssigboden im Vergleich zu CEM I klar verringern. Die Gesamtreduktion fällt jedoch kleiner aus, da Hüllbeton mit CEM III A bereits tiefere Emissionen aufweist und damit weniger Reduktionspotenzial durch die Substitution besteht. Insgesamt ergibt sich eine Reduktion von 49 % bei konventioneller Grabenbreite und von 56 % bei reduzierter Grabenbreite nur bei Flüssigboden. Das entspricht vermiedenen Emissionen von 21’300 t CO_2-eq/a bzw. 24’657 t CO_2-eq/a.

Spannend ist zudem, dass der Wechsel von CEM I auf CEM III A die Treibhausgasemissionen von Hüllbeton um 32 % reduziert.

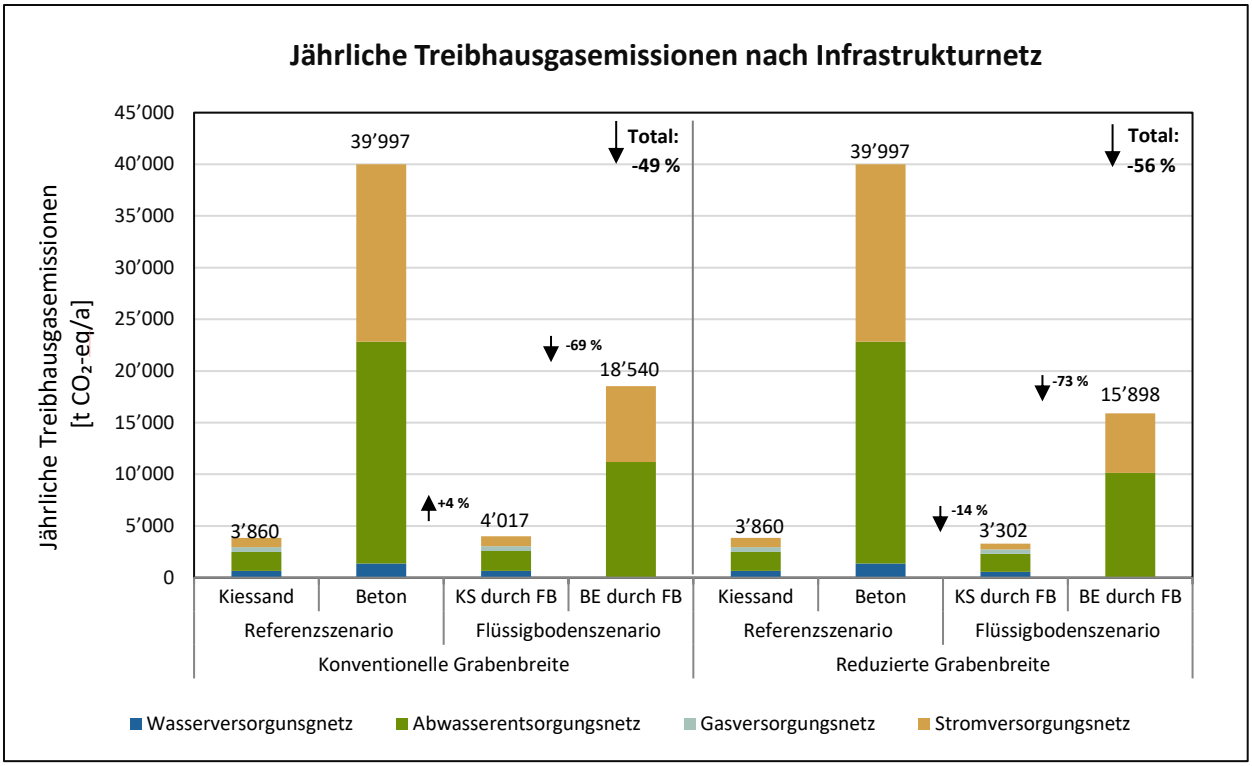


Abbildung 0-33: Jährliche Treibhausgasemissionen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert.

Gesamtpotenzial der Umweltbelastungsreduktion

Abbildung 0-34 zeigt die jährlichen Gesamtumweltbelastungen der mit Flüssigboden substituierbaren Materialmengen von Kiessand und Hüllbeton im Referenz- und im Flüssigbodenszenario. Für die Berechnung wurden beim Flüssigboden und beim Hüllbeton Zement CEM I 42.5 R verwendet.

Bei konventioneller Grabenbreite führt die Substitution der relevanten Betonmengen zu einer Reduktion der Umweltbelastungen um 63 %, beim Kiessand 26 %. Insgesamt ergibt sich daraus eine Reduktion von 57 %, was vermiedenen Umweltbelastungen von 77'780 Mio. UBP/a entspricht. Wird die reduzierte Grabenbreite berücksichtigt, verstärkt sich der Effekt. Die Umweltbelastungen aus Hüllbeton sinken um 68 %, beim Kiessand um 35 %. Insgesamt ergibt sich damit eine Gesamtreduktion von 62 %, was vermiedenen Umweltbelastungen von 85'456 mio. UBP/a entspricht.

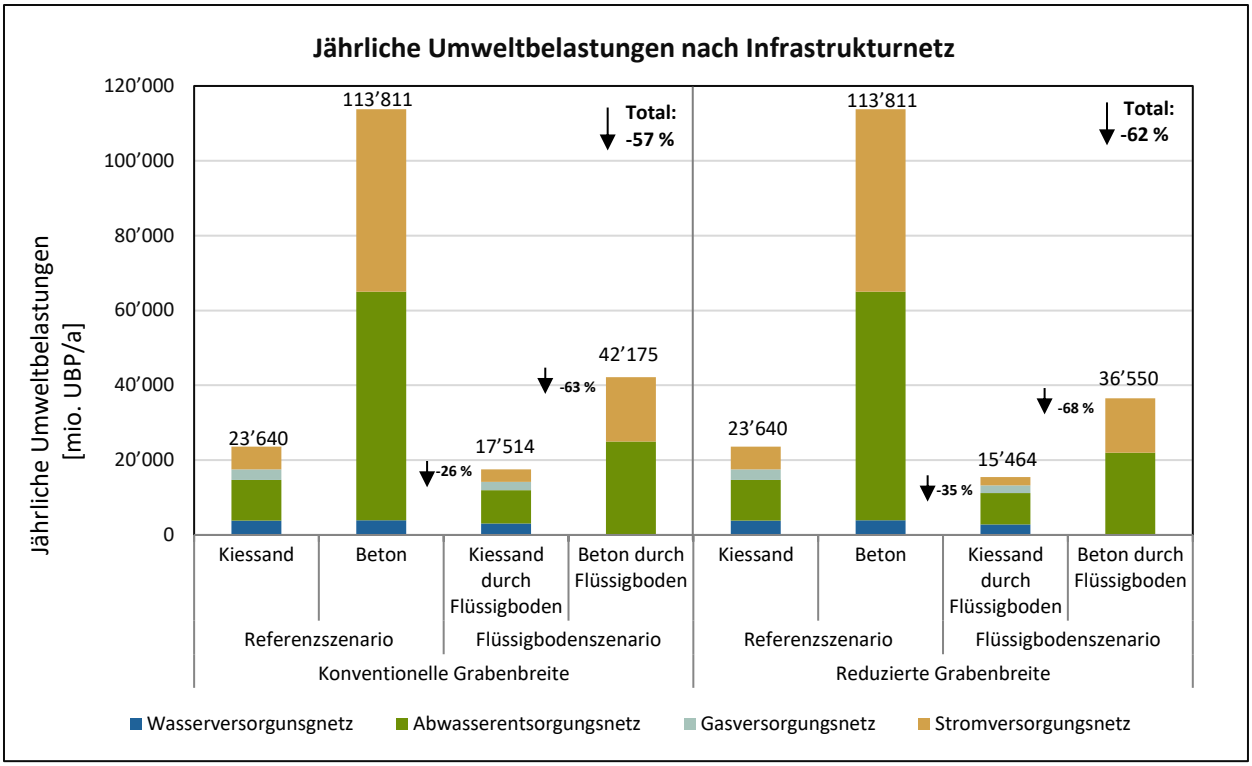


Abbildung 0-34: Jährliche Gesamtumweltbelastungen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 0-35 zeigt die jährlichen Gesamtumweltbelastungen der durch Flüssigboden substituierbaren Materialmengen von Kiessand und Hüllbeton. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde dabei CEM III A verwendet. Der Trend ist grundsätzlich gleich wie bei den Resultaten mit CEM I 42.5 R.

Bei konventioneller Grabenbreite führt die Substitution der relevanten Betonmengen zu einer Reduktion der Umweltbelastungen um 65 %, beim Kiessand 28 %. Insgesamt ergibt sich daraus eine Reduktion von 52 %, was vermiedenen Umweltbelastungen von 60'576 Mio. UBP/a entspricht. Wird die reduzierte Grabenbreite berücksichtigt, verstärkt sich der Effekt. Die Umweltbelastungen aus Hüllbeton sinken um 71 %, beim Kiessand um 36 %. Insgesamt ergibt sich damit eine Gesamtreduktion von 59 %, was vermiedenen Umweltbelastungen von 69'162 mio. UBP/a entspricht.

Der Wechsel von CEM I auf CEM III A im Hüllbeton führt zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 17 %.

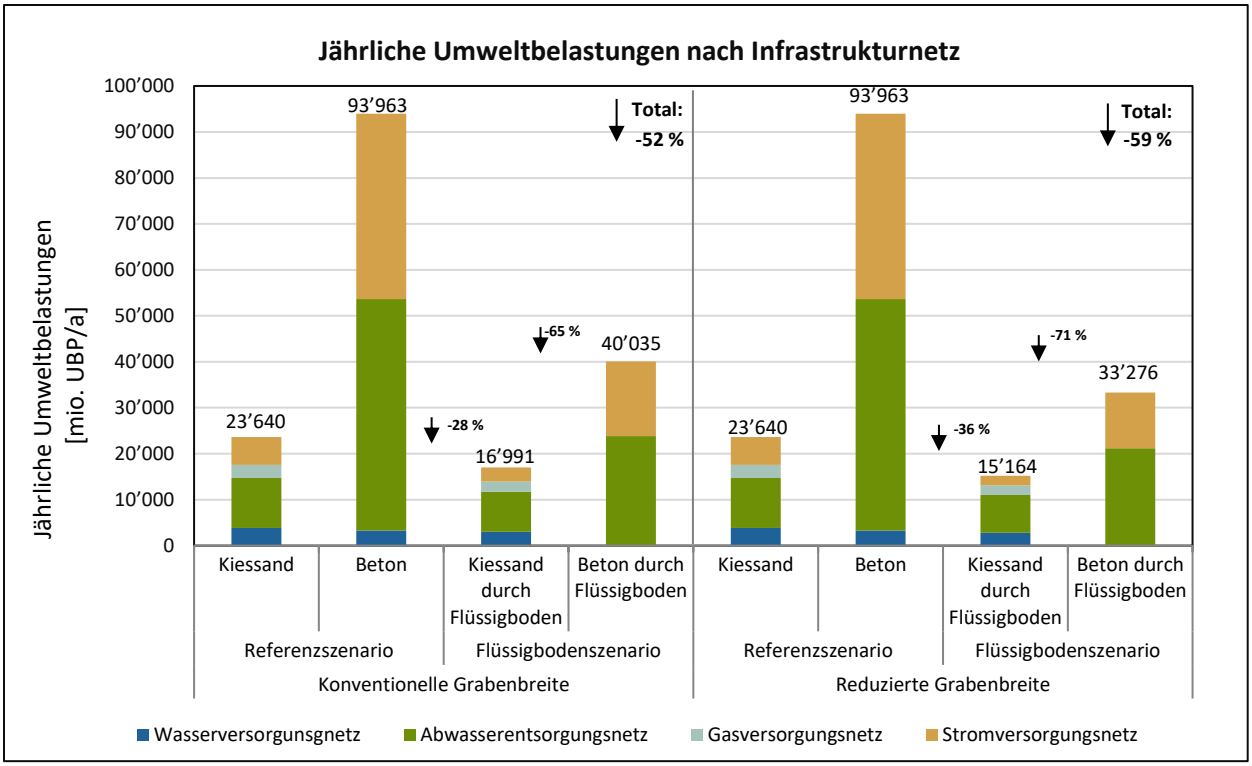


Abbildung 0-35: Jährliche Gesamtumweltbelastungen der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert.

Gesamtpotenzial der Energieaufwandsreduktion

Abbildung 0-36 zeigt den kumulierten Energieaufwand der substituierbaren Materialmengen im Referenz- und im Flüssigbodenszenario. Für die Berechnung wurden beim Flüssigboden und beim Beton Zement CEM I 42.5 R verwendet.

Bei konventioneller Grabenbreite reduziert der Einsatz von Flüssigboden den Energieaufwand des substituierten Hüllbetons deutlich um 59 %, beim Kiessand ist es 11 %. Insgesamt ergibt sich eine Reduktion von 52 %, was einem vermiedenen Energieaufwand von 66 GWh Oil-eq./a entspricht. Mit reduzierter Grabenbreite verstärkt sich die Wirkung. Der Energieaufwand des ersetzten Hüllbetons sinkt um 67 %, beim Kiessand um 24 %. Daraus resultiert eine Gesamtreduktion von -61 %. was einem vermiedenen Energieaufwand von 77 GWh Oil-eq./a entspricht

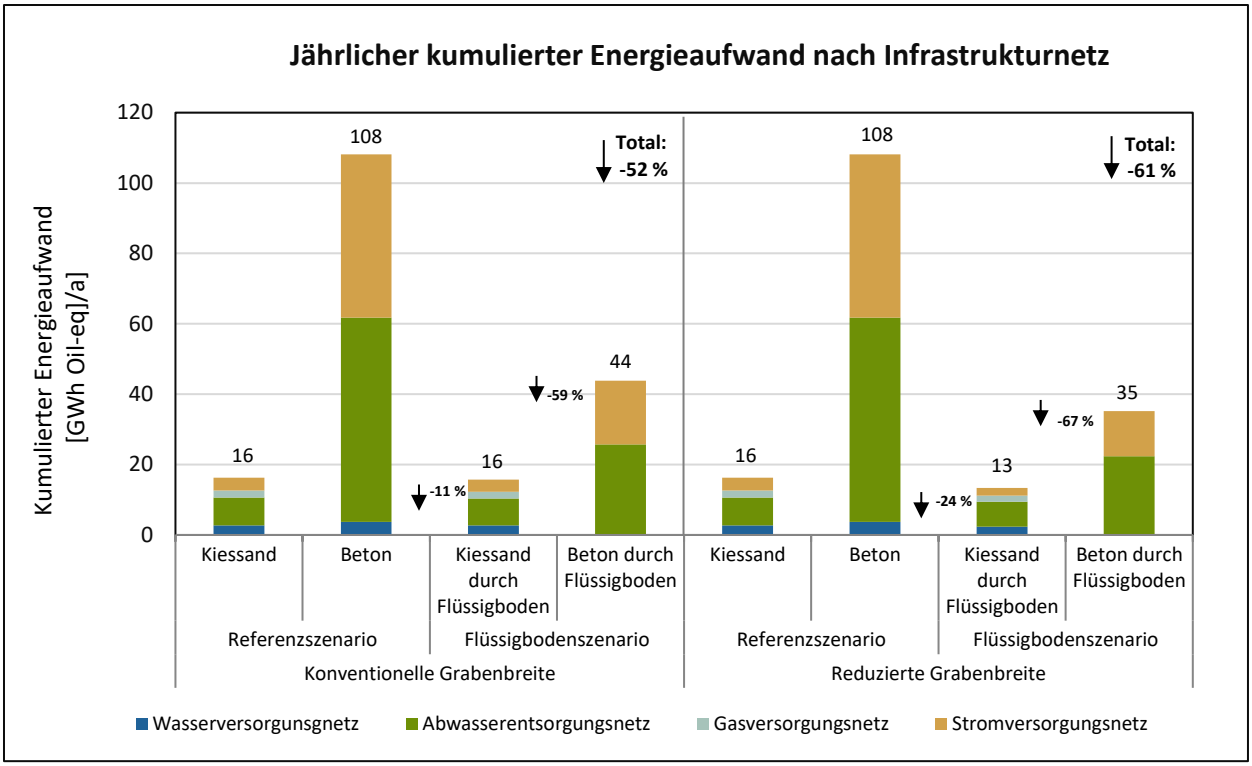


Abbildung 0-36: Jährlicher kumulierter Energieaufwand der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM I 42.5 R modelliert.

Abbildung 0-37 zeigt den jährlichen kumulierten Energieaufwand der durch Flüssigboden substituierbaren Materialmengen von Kiessand und Hüllbeton. Für Flüssigboden und Hüllbeton wurde dabei CEM III A verwendet.

Der Trend ist gleich wie bei den Resultaten mit CEM I 42.5 R. Da für die Herstellung von CEM I 42.5 R und CEM III A ungefähr gleich viel Energie benötigt wird, unterscheiden sich die Ergebnisse nur geringfügig. Entsprechend ergibt sich auch hier eine Gesamtreduktion des kumulierten Energieaufwands von 52 % bei konventioneller Grabenbreite bzw. 61 % bei reduzierter Grabenbreite.

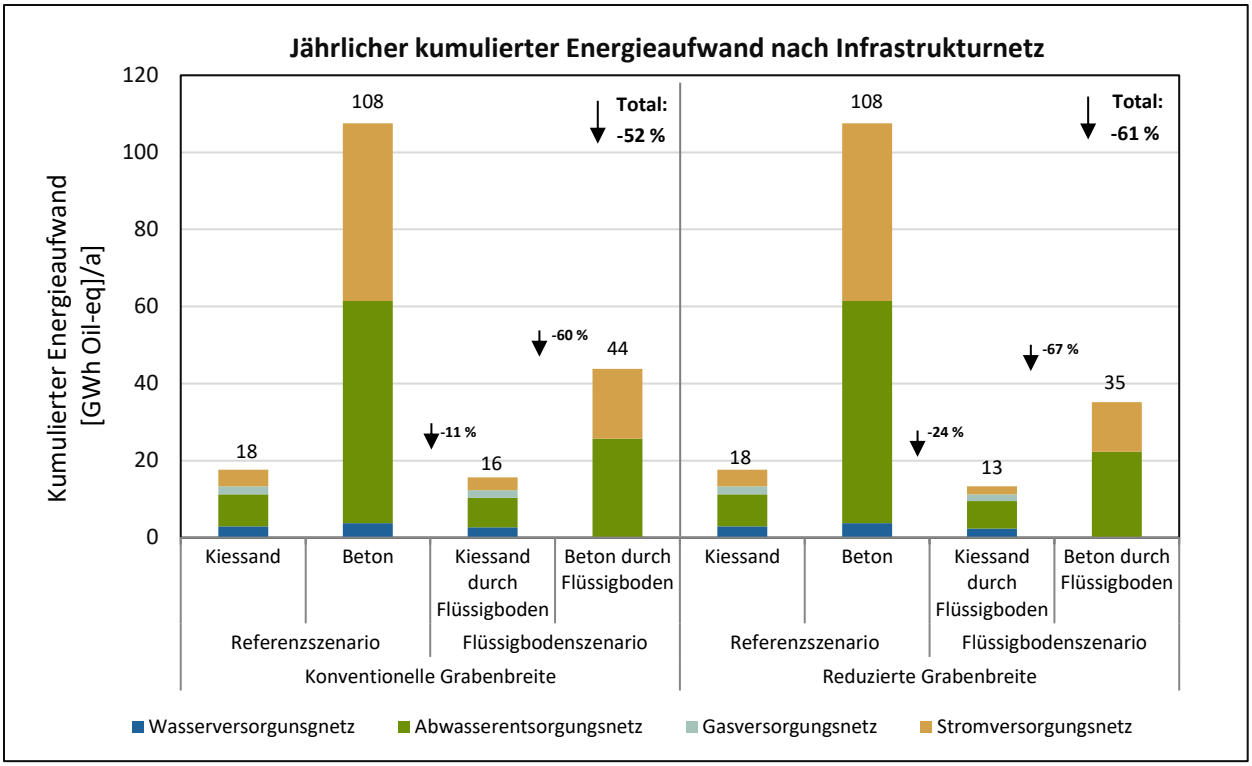


Abbildung 0-37: Jährlicher kumulierter Energieaufwand der substituierbaren Materialmengen nach Infrastrukturnetz. Vergleich zwischen konventioneller und reduzierter Grabenbreite ausschliesslich für Flüssigboden. Für Hüllbeton und Flüssigboden wurde CEM III A modelliert.

Interpretation

Die Potenzialabschätzung zeigt, dass Flüssigboden im Schweizer Tiefbau ein erhebliches ökologisches Reduktionspotenzial aufweist. Wie Tabelle 0-15 zusammenfassend zeigt, hängen die Reduktionen jedoch stark davon ab, welches Material ersetzt, welche Grabengeometrie angenommen und welche Zementsorte verwendet wird.

Tabelle 0-15: Prozentuale Reduktionspotenziale der durchschnittlichen Flüssigbodenrezeptur.

		Konventionelle Grabenbreite			Reduzierte Grabenbreite		
		Kiessand	**Hüllbeton**	**Potenzial**	**Kiessand**	**Hüllbeton**	**Potenzial**
Verwendung von CEM I 42.5 R	**GWP**	+ 17 %	- 65 %	- 60 %	- 7 %	- 71 %	- 67 %
	UBP	- 26 %	- 63 %	- 57 %	- 35 %	- 68 %	- 62 %
	KEA	- 11 %	- 59 %	- 52 %	- 24 %	- 67 %	- 61 %
Verwendung von CEM III A	**GWP**	+ 4 %	- 69 %	- 49 %	- 14 %	- 73 %	- 56 %
	UBP	- 28 %	- 65 %	- 52 %	- 36 %	- 71 %	- 59 %
	KEA	- 11 %	- 60 %	- 52 %	- 24 %	- 67 %	- 61 %

Das grösste Potenzial liegt klar beim Ersatz von Hüllbeton durch Flüssigboden. Über alle betrachteten Umweltindikatoren hinweg ergeben sich hier deutliche Reduktionen.

Beim Ersatz von Kiessand durch Flüssigboden sehen die Resultate leicht anders aus. Bei konventioneller Grabenbreite zeigt sich beim Treibhauspotenzial unabhängig von der Zementsorte zunächst sogar eine Zunahme. Bei UBP und KEA ergeben sich hingegen bereits Reduktionen. Wird zusätzlich eine reduzierte Grabenbreite bei Flüssigboden berücksichtigt, verbessert sich die Bilanz von Flüssigboden auch beim Treibhauspotenzial deutlich, sodass jetzt sogar eine Reduktion stattfindet. Das zeigt, dass die reduzierte Grabenbreite ein zentraler Hebel ist, um die Umweltwirkungen von Flüssigboden weiter zu senken und allfällige Mehrbelastungen gegenüber Kiessand zu vermeiden.

Ein weiterer wichtiger Hebel ist die Wahl der Zementsorte. Der Einsatz von CEM III A anstelle von CEM I 42.5 R reduziert die Umweltwirkungen von Hüllbeton und Flüssigboden zusätzlich, besonders beim Treibhauspotenzial. Gleichzeitig wird aber auch das Reduktionspotenzial beim Ersatz von Hüllbeton durch Flüssigboden kleiner, weil bereits das Referenzmaterial tiefere Emissionen aufweist. Beim Kiessand führt der Einsatz von CEM III A im Flüssigboden ebenfalls zu geringeren Umweltwirkungen, wodurch der Flüssigboden insgesamt emissionsärmer wird.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass es mehrere wirksame Hebel zur Reduktion der Umweltwirkungen im Tiefbau gibt: die Substitution von Hüllbeton durch Flüssigboden, die Substitution von Kiessand durch Flüssigboden (sofern die Umweltindikatoren UBP und KEA im Vordergrund stehen), die Reduktion der Grabenbreite bei Flüssigboden sowie die Verwendung klinkerreduzierte Zemente wie CEM III A. Die grössten Potenziale ergeben sich, wenn diese Hebel kombiniert werden.

Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen

Auf Basis der modellierten Substitutionsmengen ergibt sich durch den Einsatz von Flüssigboden mit CEM I 42.5 R bei konventioneller Grabenbreite ein jährliches Reduktionspotenzial von 37'767 t CO_2-eq pro Jahr.

Im Jahr 2023 betrugen die gesamten territorialen Treibhausgasemissionen der Schweiz 40.85 Mio. t CO_2-eq [45]. Das modellierte Potenzial entspricht somit 0.09 % der nationalen Gesamtemissionen. Das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen wird über die gesamte Wertschöpfungskette entfaltet, wobei keine Unterscheidung zwischen den Effekten im Inland und im Ausland gemacht wurde.[17]

Da der Tiefbau durch kontinuierliche Erneuerungs- und Ausbautätigkeiten sowie langfristige Investitionszyklen geprägt ist, kann eine systematische Implementierung von Flüssigboden einen strukturellen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Besonders relevant ist dabei die Substitution von Hüllbeton, da hier direkt zementbasierte Emissionen adressiert werden. Im Kontext des Schweizer Tiefbaus kann Flüssigboden somit einen quantifizierbaren Beitrag zur Emissionsminderung leisten.

[17] Der Treibhausgas-Fussabdruck der Schweiz aus Sicht des Endkonsums (Emissionen in der Schweiz + importbedingte Emissionen – exportbedingte Emissionen) liegt bei ca. 132 Mio. t CO_2-eq [54]. Baustoffe sind aus der gleichen Perspektive für ca. 10 Mio. t CO_2-eq verantwortlich [55].

Anhang E. Technische Nachweise zur Rohrstatik und Einbaubedingungen

Die technischen Nachweise zur Rohrstatik und zu den Einbaubedingungen sind auf den folgenden Seiten aufgeführt. Zunächst folgt die Typenstatik gemäss SIA 190 / SIA 261. Diese zeigt mögliche Verlegeprofile und Überdeckungsbereiche nach SIA. Anschliessend ist ergänzend die Typenstatik nach deutschem Regelwerk gemäss DIN EN 1916, DWA-A 139, DIN V 1201 / DIN V 1202 bzw. ATV-DVWK-A 127 beigefügt. Diese dient als ergänzendes Beispiel für den Nachweis vergleichbarer Stahlbetonrohre unter deutschen Bemessungs- und Einbaubedingungen.

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

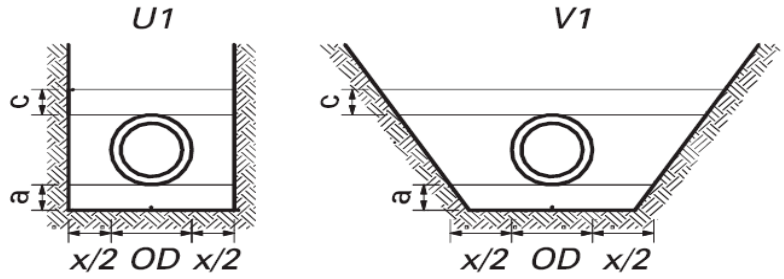
Der Berechnungsausdruck dieser beiden Lastfälle liegt dieser Typenstatik bei. Sollten Sie die Ausdrucke der anderen Lastfälle wünschen, können Sie sich gerne an uns wenden.

Freies INGENIEURBÜRO
Dr.sc.techn. Uwe Rößler
Hertlingstraße 5, 76726 Germersheim
Telefon: 07274 / 700 1972
Mobil: 0173 / 54 117 39
E-mail: info@uweroessler.de
www.uweroessler.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

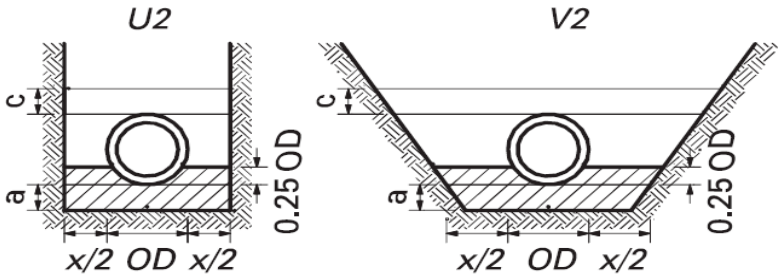
U1 / V1 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 30°)



Baustoff für Bettung a, Leitungszone und Abdeckung c:
ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610, Pkt. 5.2 *

Erdüberdeckung		
min.	**0,60**	**m**
max.	**5,00**	**m**
untere Bettung:		
min a =	**0,19**	**m**
bei hartem Baugrund =	**0,28**	**m**

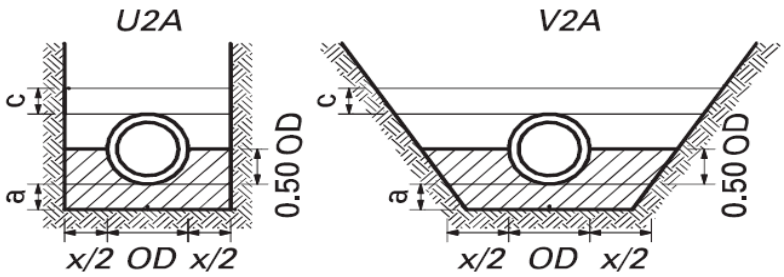
U2 / V2 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 60°)



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

Erdüberdeckung		
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**

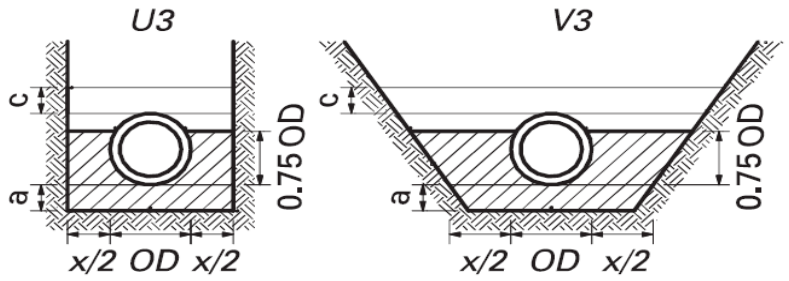
U2A / V2A Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 90°)



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

Erdüberdeckung		
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**

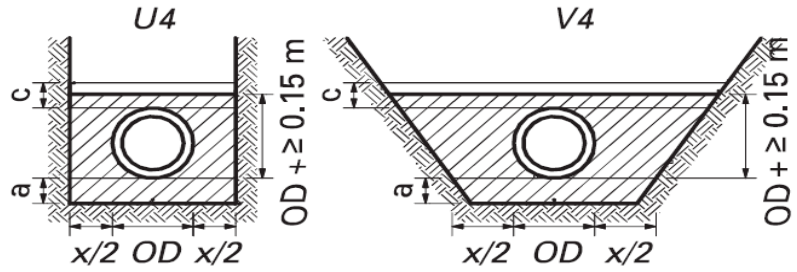
U3 / V3 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 120°)



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

Erdüberdeckung		
min.	**0,50**	**m**
max.	**5,00**	**m**
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)



Baustoffe für Bettung, Leitungszone und Abdeckung (a + OD + ≥ 0,15 m):
unbewehrter Beton min. C 16/20 oder bewehrter Beton min. C 20/25

Erdüberdeckung		
min.	**0,50**	**m**
max.	**5,00**	**m**
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 mm + 1/10 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 mm + 1/5 DN, jedoch mindestens 150 mm betragen.

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

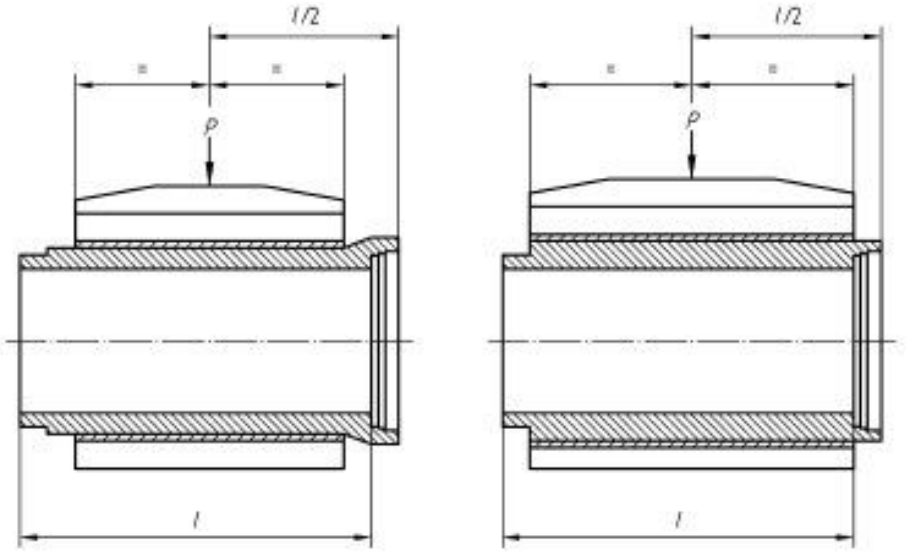


Bild C.1 — Obere und untere Balken für die Scheiteldruckprüfung

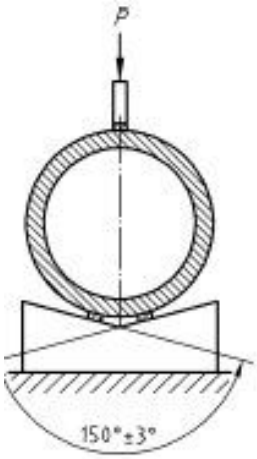


Bild C.2a

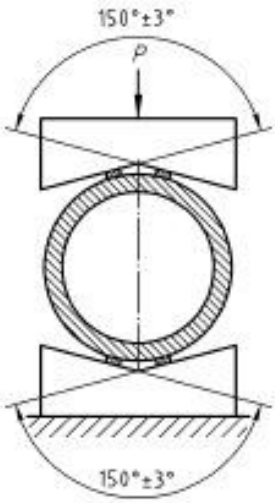


Bild C.2b

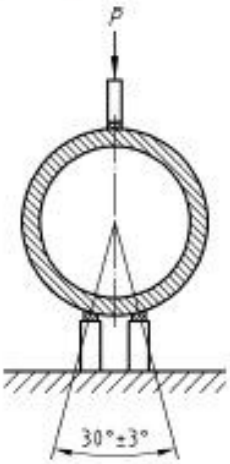


Bild C.2c

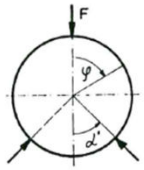
(nicht für Rohre ≤ DN 1200)

Ermittlung der Schnittkräfte nach Handbuch der Rohre:

Lastfall 1A.11: Zweiliniengegendruck, radial

SCHNITTKRAEFTE AM KREISRING

LASTFALL	LINIENBELASTUNG
1A.11	ZWEILINIENGEGENDRUCK, RADIAL



BIEGEMOMENT = M·F·r NORMALKRAFT = N·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 Fn, 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 x 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**	

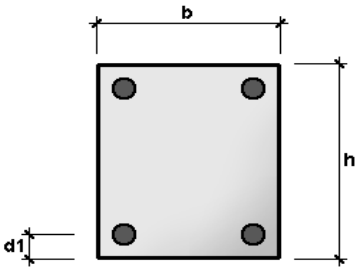
Schnittkräfte Kämpfer

$M_{k\ Kä}$ =	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
d1 = 6,0 cm (Achsabstand Bewehrung)
--> Rissweite wk = 0,30 mm
--> Zwang aus äußeren Lasten (Biegung mit Längskraft)
--> Md = 24,770 kNm, Nd = -1,660 kN (Zugkraft positiv)
--> Stabdurchmesser: Ø8,0 mm

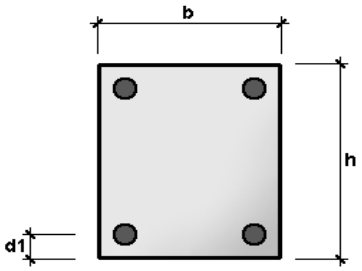
Nachweise:

fct,eff = 3,50 N/mm²
Fs = 273,84 kN
Fcr = 150,50 kN
Ac,eff = 0,0430 m²

min.As = 5,77 cm²/m (abgeschl. Rissbild bei Fs >= Fcr) **(= Ø8,0/8,7 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
d1 = 4,4 cm (Achsabstand Bewehrung)
--> Rissweite wk = 0,30 mm
--> Zwang aus äußeren Lasten (Biegung mit Längskraft)
--> Md = 13,930 kNm, Nd = -75,380 kN (Zugkraft positiv)
--> Stabdurchmesser: Ø8,0 mm

Nachweise:

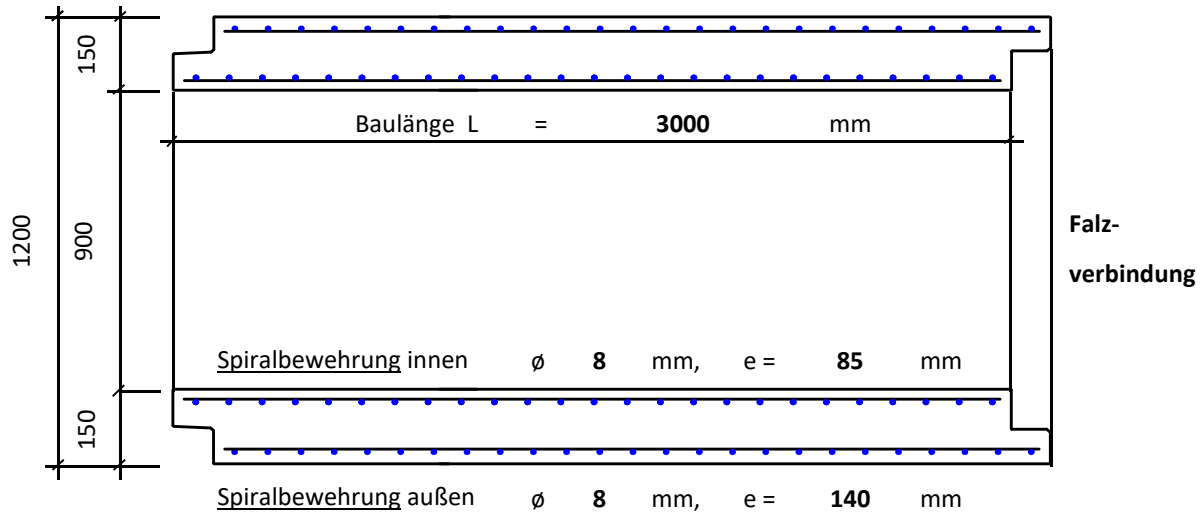
fct,eff = 3,50 N/mm²
Fs = 78,08 kN
Fcr = 178,50 kN
Ac,eff = 0,0510 m²

min.As = 1,97 cm²/m (Einzelrissbild bei Fs < Fcr) **(= Ø8,0/25,5 cm)**

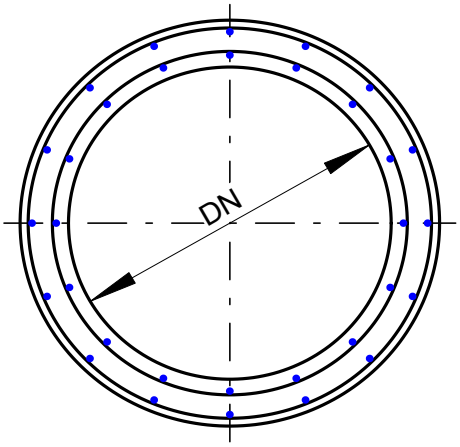
23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-SIA

Bewehrungsskizze Falzmuffenrohr:

Längsschnitt **Robust-Rohr DN** **900**



Querschnitt



DN **900** mm

Längsbewehrung :

innen	**12**	Stk.	ø	**6**	mm
außen	**12**	Stk.	ø	**6**	mm

Baustoff :

Beton:	C 40/50
Stahl:	BST 500 A
Expositionskl.:	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

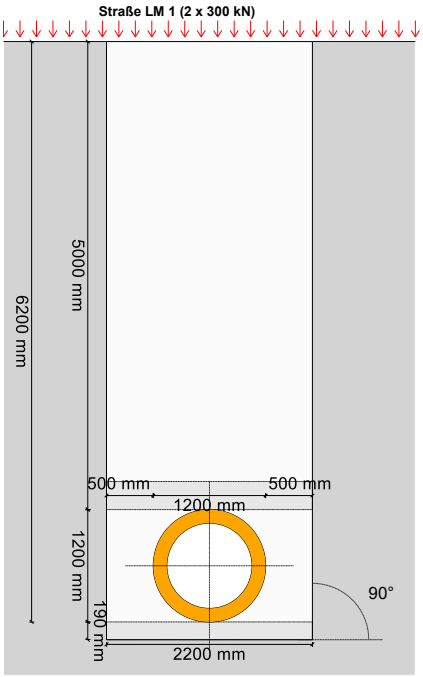
Schnittkräfte nach:	SIA D 0263:2018		
Horiz. Lasten im Spannungsnachweis:	Ansatz der horizontalen Erdlast und Verkehrslast (analog A 161)		
Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H	5,00	m
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Höchster Grundwasserstand:	h_{gw}	0,00	m
Innendruck:	P_I	0,00	bar
Norm der Belastung:	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:	Manuell		
Bezeichnung:	C40/50		
Wichte:	γ	24,0	kN/m³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Die Schwingbreite bei 2·10^6 Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Die Schwingbreite bei 1·10^8 Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Mittlerer Elastizitätsmodul:	E_{cm}	35.220,50	N/mm²
Ringbiegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	4,00	N/mm²
Biegedruckfestigkeit:	σ_{BD}	6,00	N/mm²
Angabe der Grenzspannungen Ringzug:	Ja		
Ringzugfestigkeit:	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	mm²/mm
Profil Axialfläche:		A_{Ax}	150,00	mm²/mm
Trägheitsabstand:		e	75,00	mm
Trägheitsmoment:		I	281.250,00	mm^4/mm
Widerstandsmoment, innen:		W_i	3.750,00	mm³/mm
Widerstandsmoment, außen:		W_e	3.750,00	mm³/mm
Krümmungseinfluß, innen:		α_{ki}	1,10	[-]
Krümmungseinfluß, außen:		α_{ka}	0,90	[-]

1.2.2 Material

Eigengewicht:		γ	24,00	kN/m³
Querkontraktionszahl:		v	0,15	[-]

		kurz	lang	
E-Modul:	E	35.220,50	35.220,50	N/mm²
Zul. Druckfestigkeit:	σ_{bD}	6,00	6,00	N/mm²
Zul. Biegezugfestigkeit:	σ_{bZ}	4,00	4,00	N/mm²
Zul. Zugfestigkeit:	σ_Z	4,00	4,00	N/mm²
Zul. Schubspannung:	τ	2,00	2,00	N/mm²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,2E6}$	n. def.	N/mm²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,1E8}$	n. def.	N/mm²

1.3 Systemsteifigkeit

Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich (Tabelle 1):	E_B	3,00	N/mm²
Horizontaler Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich:	E_{Bh}	1,80	N/mm²
Systemsteifigkeit, Kurzzeit:	SF_K	38,0310	[-]
Systemsteifigkeit, Langzeit:	SF_L	38,0310	[-]

1.4 Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit, Kurzzeit:	$S0_K$	8.556.9,789172	[-]
Rohrsteifigkeit, Langzeit:	$S0_L$	8.556.9,789172	[-]

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 betrift wird der Faktor immer angesetzt.

1.5.1 Erdlasten

Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H	5,00	m
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	11,00	kN/m³
Beiwert Laststeigerung Dammbedingung:	λ_{max}	1,00	[-]
Erdauflast:	p_E	114,22	kN/m²
Teilsicherheit Erdlasten:	TS_{qs1}	1,35	[-]
Ständige Lasten vertikal:	q_{s1}	114,22	kN/m²
Ständige Lasten vertikal, Design:	$q_{s1,d}$	154,19	kN/m²
Ständige Lasten vertikal Sohle - Kämpfer:	$p_{E,K}$	12,00	kN/m²
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Ständige Lasten horizontal:	q_{h1}	57,11	kN/m²
Ständige Lasten horizontal, Design:	$q_{h1,d}$	77,10	kN/m²

1.5.2 Verkehrslasten nach SIA190:2017

Verkehrslast (alpha = 1):	$q_{s,\alpha=1}$	12,21	kN/m²
Beiwert Alpha:	α	0,9	[-]
Verkehrslast vert. (ohne dyn. Beiwert):	q	10,99	kN/m²
Stoßbeiwert:	ψ	1,3	[-]
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert):	q_T	14,28	kN/m²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Design:	$q_{T,d}$	21,42	kN/m²
Abminderungsfaktor dynamische Last, Ermüden:	α_T	0,90	[-]
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden:	$q_{T,Dyn}$	12,85	kN/m²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden, Design:	$q_{T,Dyn,d}$	19,28	kN/m²
Verkehrslasten vertikal:	q_{s2}	16,32	kN/m²
Verkehrslasten vertikal, Ermüden:	$q_{s2,Dyn}$	14,69	kN/m²
Überdeckung über Kämpfer:	h_K	5,60	m
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert):	q_{Th}	7,14	kN/m²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	$q_{T,K}$	12,08	kN/m²
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	$q_{Th,K}$	4,65	kN/m²
Verkehrslasten horizontal:	q_{h2}	5,31	kN/m²
Verkehrslasten horizontal, Ermüden:	$q_{h2,Dyn}$	6,21	kN/m²

1.5.3 Gesamtlast

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	178,68	kN/m²

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/m³
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/m²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr:	p_{UT}	32,64	kN/m²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr Ermüden:	p_{UTDyn}	29,38	kN/m²
Stützdruckbeiwert nach Tabelle 9:	K_{st}	0,30	[-]
Stützdruck Erdlast:	$q_{stütz,E}$	34,27	kN/m²
Stützdruck Verkehr:	$q_{stütz,T}$	4,90	kN/m²

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	$N_{\sum Dyn}$	-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	$N_{\sum K}$	-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	$N_{\sum L}$	-24,423	-62,933	-35,541	kN/m
Normalkraft, Gesamtbelastung	$N_{\sum}$	-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	$M_{\sum Dyn}$	0,731	-0,759	1,099	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}	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	$M_{\sum K}$	0,922	-0,953	1,331	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}	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	$M_{\sum L}$	5,534	-5,821	8,772	kNm/m
Moment, Gesamtbelastung	$M_{\sum}$	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/mm²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:			$\sigma_{bD,L}$	6,00	N/mm²
innen					
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung innen, Gesamtbelastung	$\sigma_{i,\sum}$	1,71	-2,46	2,69	N/mm²
Ausnutzung Spannung	U_σ	42,7	-40,9	67,3	%
außen					
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	

Spannung außen, Gesamtbelastung	$\sigma_{a,\sum}$	-1,73	1,16	-2,70	N/mm²
Ausnutzung Spannung	U_σ	-28,9	28,9	-45,0	%

Der Spannungsnachweis ist erbracht.

1.8 Nachweis Verformungen (IOWA-Formel)

Der Verformungsnachweis entfällt, da SFkurz > 0.1 ist (biegesteifes Rohr).

1.9 Nachweis Tragsicherheit

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	178,68	kN/m²
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	+ qk1	9	kN/m2
	Fahrstreifen 2	Q_{k2}	100	kN	+ qk2	2,5	kN/m2
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	°	**x1 =**	0,300	**m**
2. Schicht	Dicke	0,20	m	Winkel	60	°	**x2 =**	0,115	**m**
3. Schicht	s Rohrwand	0,15	m				**x3 =**	0,075	**m**
							Summe =	0,490	**m**

Fläche in Mitte Rohrwandung =	1,38	x	1,38		=	1,91	m²	
Belastung "Qk1"Fahrstreifen 1 =	150	kN /	1,91	m²	=	**78,7**	**kN/m²**	
Belastung "Qk2"Fahrstreifen 2 =	100	kN /	1,91	m²	=	**52,4**	**kN/m²**	
Belastung "pk1" =					=	**9,0**	**kN/m²**	
Belastung "pk2" =					=	**2,5**	**kN/m²**	
Gesamtbelastung Fahrstreifen 1+2					=	**142,60**	**kN/m²**	

Ermittlung Kämpfer:

							Zuwachs an Breite für Lastverteilungsfläche (nur einseitig)		
1. Schicht	Dicke	0,30	m	Winkel	45	°	**x1 =**	0,300	**m**
2. Schicht	Dicke	0,80	m	Winkel	60	°	**x2 =**	0,462	**m**
3. Schicht	s Rohrwand	0,15	m				**x3 =**	0,075	**m**
							Summe =	0,837	**m**

Fläche in Mitte Rohrwandung =	2,07	x	2,07		=	4,30	m²	
Belastung "Qk1"Fahrstreifen 1 =	150	kN /	4,30	m²	=	**34,9**	**kN/m²**	
Belastung "Qk2"Fahrstreifen 2 =	100	kN /	4,30	m²	=	**23,3**	**kN/m²**	
Belastung "pk1" =					=	**9,0**	**kN/m²**	
Belastung "pk2" =					=	**2,5**	**kN/m²**	
Gesamtbelastung Fahrstreifen 1+2					=	**69,63**	**kN/m²**	

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
Erdruckverhältnis 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/m²
Bodenspannung in Kämpferhöhe, ohne Stoßbeiwert:	p_K	69,63	kN/m²
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

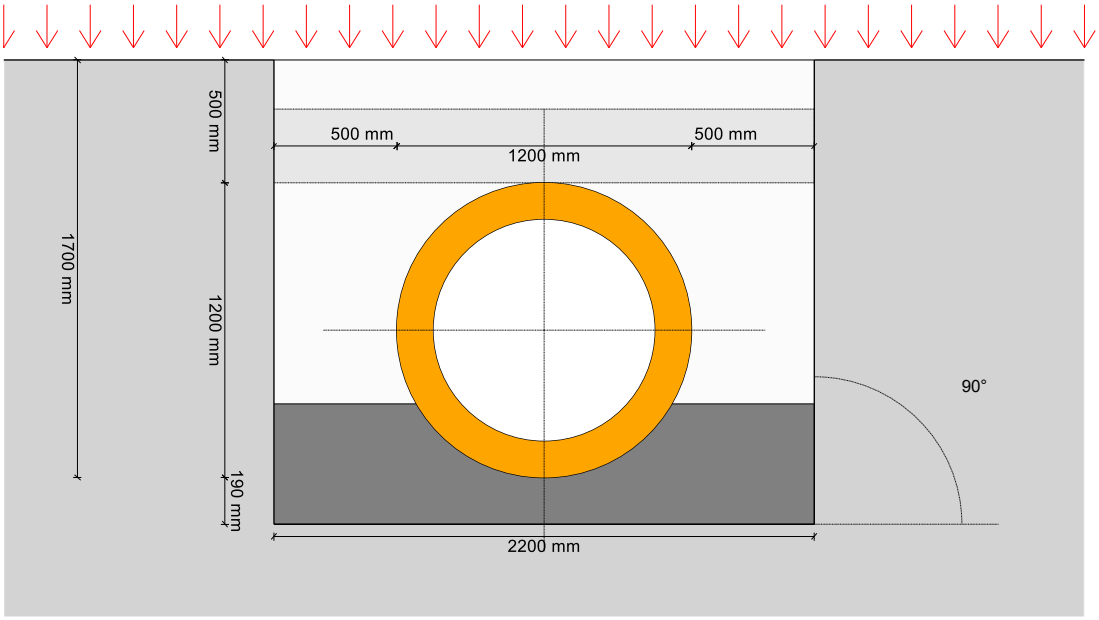
Rohrauswahl:	Vollwand		
Material-Klasse:	Beton		
Vorverformung Typ A:	$\delta_{v,A}$	0,0	%
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	0,0	%
Auswahl der Eingaben:	Da und Di		
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Innendurchmesser:	d_i	900,0	mm
Perforation:	Ohne Perforation		
Scheiteldruckkraft-Bruchlast:	FN	225,00	kN/m

1.1.3.1 Beton

Auswahl Material:	Manuell		

Bezeichnung:	C40/50		
Wichte:	γ	24,0	kN/m³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Die Schwingbreite bei 2·10^6 Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Die Schwingbreite bei 1·10^8 Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Mittlerer Elastizitätsmodul:	E_{cm}	35.220,50	N/mm²
Ringbiegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	4,00	N/mm²
Biegedruckfestigkeit:	σ_{BD}	6,00	N/mm²
Angabe der Grenzspannungen Ringzug:	Ja		
Ringzugfestigkeit:	σ_{RZ}	4,00	N/mm²

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	mm²/mm
Profil Axialfläche:		A_{Ax}	150,00	mm²/mm
Trägheitsabstand:		e	75,00	mm
Trägheitsmoment:		I	281.250,00	mm^4/mm
Widerstandsmoment, innen:		W_i	3.750,00	mm³/mm
Widerstandsmoment, außen:		W_e	3.750,00	mm³/mm
Krümmungseinfluß, innen:		α_{ki}	1,10	[-]
Krümmungseinfluß, außen:		α_{ka}	0,90	[-]

1.2.2 Material

Eigengewicht:		γ	24,00	kN/m³
Querkontraktionszahl:		v	0,15	[-]

		kurz	lang	
E-Modul:	E	35.220,50	35.220,50	N/mm²
Zul. Druckfestigkeit:	σ_{bD}	6,00	6,00	N/mm²
Zul. Biegezugfestigkeit:	σ_{bZ}	4,00	4,00	N/mm²
Zul. Zugfestigkeit:	σ_Z	4,00	4,00	N/mm²
Zul. Schubspannung:	τ	2,00	2,00	N/mm²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,2E6}$	n. def.	N/mm²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,1E8}$	n. def.	N/mm²

1.3 Systemsteifigkeit

Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich (Tabelle 1):	E_B	3,00	N/mm²
Horizontaler Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich:	E_{Bh}	1,80	N/mm²
Systemsteifigkeit, Kurzzeit:	SF_K	38,0310	[-]
Systemsteifigkeit, Langzeit:	SF_L	38,0310	[-]

1.4 Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit, Kurzzeit:	$S0_K$	8.556.9,789172	[-]
Rohrsteifigkeit, Langzeit:	$S0_L$	8.556.9,789172	[-]

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 betrift wird der Faktor immer angesetzt.

1.5.1 Erdlasten

Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H	0,50	m
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	11,00	kN/m³
Beiwert Laststeigerung Dammbedingung:	λ_{max}	1,00	[-]
Erdauflast:	p_E	11,42	kN/m²
Teilsicherheit Erdlasten:	TS_{qs1}	1,35	[-]
Ständige Lasten vertikal:	q_{s1}	11,42	kN/m²
Ständige Lasten vertikal, Design:	$q_{s1,d}$	15,42	kN/m²
Ständige Lasten vertikal Sohle - Kämpfer:	$p_{E,K}$	12,00	kN/m²
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Ständige Lasten horizontal:	q_{h1}	5,71	kN/m²
Ständige Lasten horizontal, Design:	$q_{h1,d}$	7,71	kN/m²

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, Ermüden	$q_{T,K}T_{,Dyn}$	62,67	1,50	94,00	kN/m²
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/m²

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/m³
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/m²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr:	p_{UT}	188,18	kN/m²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr Ermüden:	p_{UTDyn}	169,36	kN/m²
Stützdruckbeiwert nach Tabelle 9:	K_{st}	0,30	[-]

Stützdruck Erdlast:	$q_{stütz,E}$	3,43	kN/m²
Stützdruck Verkehr:	$q_{stütz,T}$	48,89	kN/m²

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	$N_{\sum Dyn}$	-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	$N_{\sum K}$	-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	$N_{\sum L}$	-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/mm²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$\sigma_{bD,L}$	6,00	N/mm²

innen

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung innen, Gesamtbelastung	$\sigma_{i,\sum}$	2,71	-3,55	2,88	N/mm²
Ausnutzung Spannung	U_σ	67,9	-59,2	71,9	%

außen

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung außen, Gesamtbelastung	$\sigma_{a,\sum}$	-2,50	1,78	-2,72	N/mm²
Ausnutzung Spannung	U_σ	-41,7	44,6	-45,4	%

Der Spannungsnachweis ist erbracht.

1.8 Nachweis Verformungen (IOWA-Formel)

Der Verformungsnachweis entfällt, da SFkurz > 0.1 ist (biegesteifes Rohr).

1.9 Nachweis Tragsicherheit

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	259,88	kN/m²
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:

2α = 120° mit Verkehrsbelastung LM1 mit
0,30 m bis 7,00 m Erdauflast über Rohrscheitel

2α = 90° mit Verkehrsbelastung LM1 mit
0,50 m bis 6,00 m Erdauflast über Rohrscheitel

Bettung:
gem. DIN EN 1610
bzw. DWA-A 139

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

Unter Dammbedingung bzw. in weitem, geböschtem oder senkrecht verbautem Graben; lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung; Material siehe 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** Mobil: **+49 173 / 54 117 39**
http://www.uweroessler.de 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 Abwässerkanälen 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

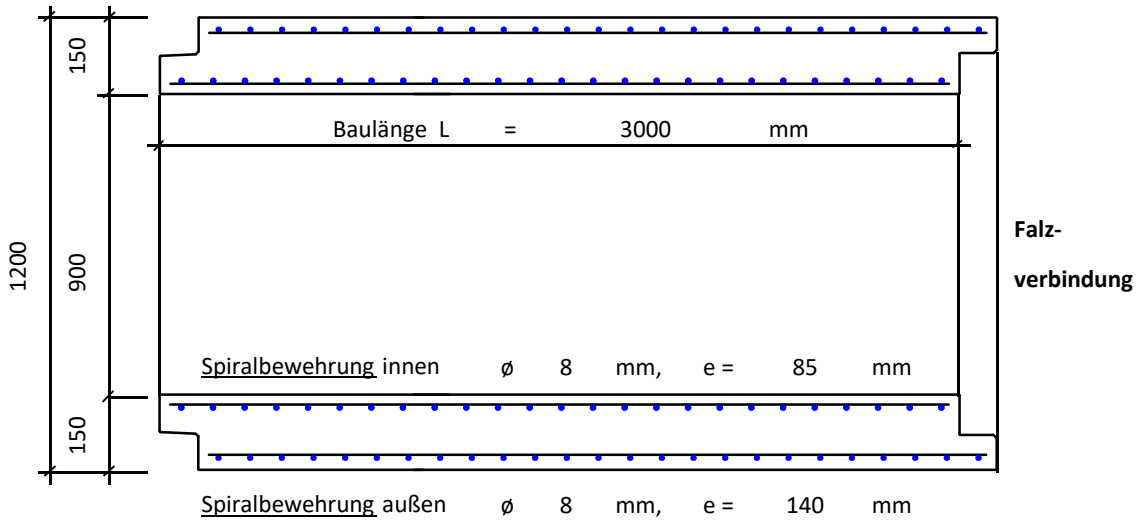
0,25 % der Längsquerschnittsfläche des Betonquerschnittes (für gerippten Stahl)

entspricht: **3,75 cm²/m** **<** vorhanden gesamt: **9,50 cm²/m**

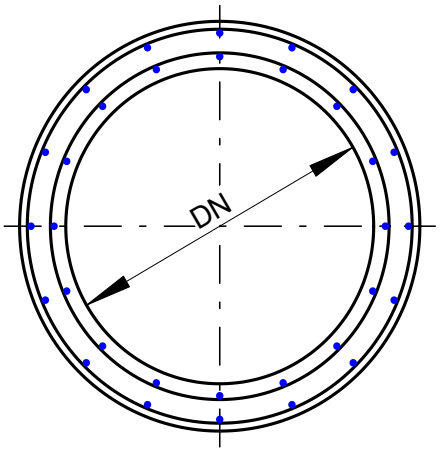
23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Bewehrungsskizze Falzmuffenrohr:

Längsschnitt **Robust-Rohr DN 900**



Querschnitt DN **900** mm



Längsbewehrung :
innen **12** Stk. ø **6** mm,
außen **12** Stk. ø **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/m²	(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/m²	(entsprich 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 2α = 120° 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 2·10^6 Zyklen ΔσRsk = 74 N/mm²)

Lastfall 2:
max. Erdüberdeckung von 7 m, Auflagerwinkel 2α = 120° in Sand/Sand-Kies, A1/B1/G3-Damm

Lastfall 3:
min. Erdüberdeckung von 0,5 m, Auflagerwinkel 2α = 90° 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 2·10^6 Zyklen ΔσRsk = 74 N/mm²)

Lastfall 4:
max. Erdüberdeckung von 6 m, Auflagerwinkel 2α = 90° 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**	(cm²/m)
	max. Rohrvergleichsspannung		**2,48**	**1,78**	**2,65**	(N/mm²)
	erf. Bewehrung aufgrund Ermüdungsnachweis		**5,34**	**2,14**	**5,50**	(cm²/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**	(cm²/m)
	max. Rohrvergleichsspannung		**4,24**	**3,01**	**4,52**	(N/mm²)
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**	(cm²/m)
	max. Rohrvergleichsspannung		**2,52**	**1,83**	**2,92**	(N/mm²)
	erf. Bewehrung aufgrund Ermüdungsnachweis		**4,78**	**2,08**	**5,24**	(cm²/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**	(cm²/m)
	max. Rohrvergleichsspannung		**3,80**	**2,74**	**4,47**	(N/mm²)

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 2·10^6 Zyklen ΔσRsk = 74 N/mm²) 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 Unterrammung 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

U. Rößler

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 · 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/m³
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m²
Innendruck, langzeitig:	$P_{I,L}$	0,00	bar
Wasserfüllung (z.B. Staukanal):		Ja	
Wichte Füllmedium:	γ_F	10,0	kN/m³
Verkehrslast:		Straße LM 1 - Fahrstreifenbreite: 3 m	
Rohrlänge:	L_R	3,0	m
Anpassungsfaktor αQi 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

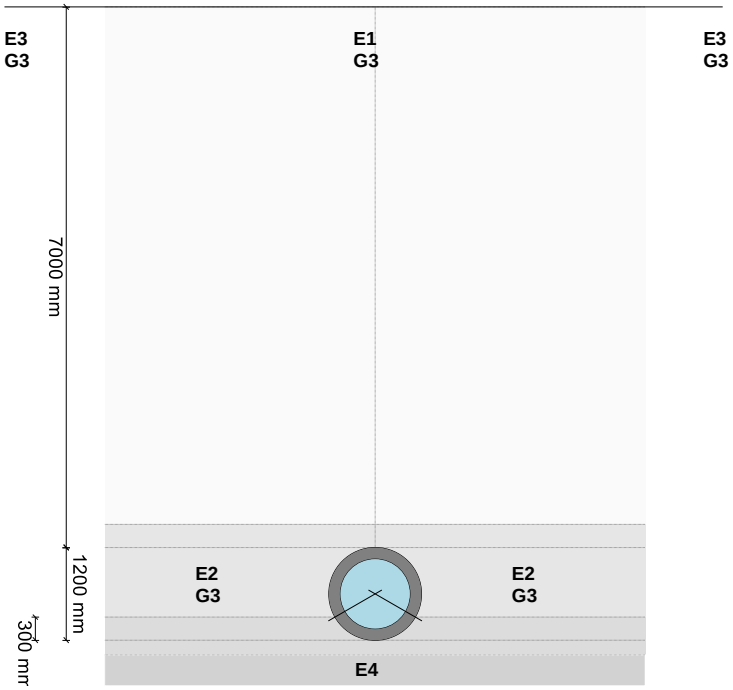
Einbauweise:	Damm
Bodenverhalten:	E1 = E20 = E3
Einbettungsbedingung:	B1
Auflagerart:	Lose
Auflagerwinkel:	120°
Relative Ausladung automatisch ermitteln:	Ja
Untere Sockelhöhe vorgeben:	Nein

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:	$Ø_{rad,i}$	8	mm
Abstand Ringbewehrung innen:	e_i	85	mm
Durchmesser Ringbewehrung außen:	$Ø_{rad,e}$	8	mm
Abstand Ringbewehrung außen:	e_e	140	mm
Durchmesser Längsbewehrung innen:	$Ø_{ax,i}$	6	mm
Anzahl der Längsstäbe innen:	$n_{ax,i}$	12	[-]
Durchmesser Längsbewehrung außen:	$Ø_{ax,e}$	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

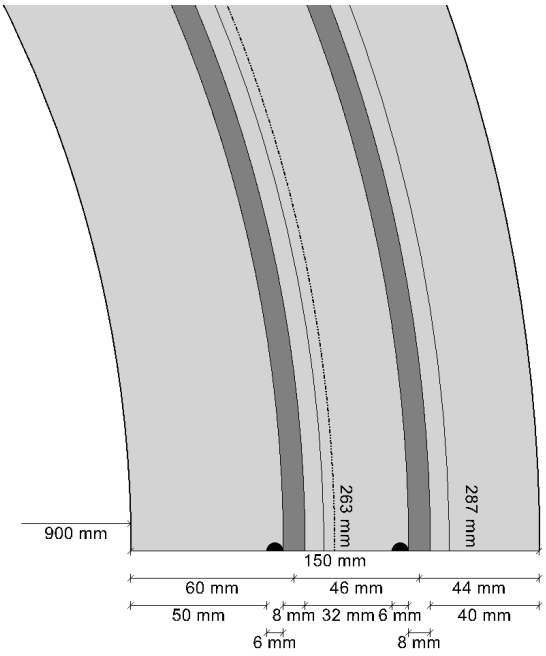
1.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

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	mm²/mm
Trägheitsabstand:	e	75,00	mm
Trägheitsmoment:	I	281.250,00	mm^4/mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	3.750,00	mm³/mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	3.750,00	mm³/mm
Flächenverhältnis:	κ_Q	1,2	[-]

1.2.1.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	γ_R	25,0	kN/m³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	$f_{ck,cyl}$	40,0	N/mm²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	$f_{ck,cube}$	50,0	N/mm²
Druckfestigkeit:	f_{cm}	48,0	N/mm²
Mittlere Zugfestigkeit:	f_{ctm}	3,5	N/mm²
Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E_{cm}	35.220	N/mm²

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	cm²/m
Ideelles Trägheitsmoment	I_{id}	288.414,4	288.414,4	288.414,4	mm^4/mm
Ideelles Widerstandsmoment, außen	$W_{id,a}$	3.856,14	3.856,14	3.856,14	mm³/mm
Ideelles Widerstandsmoment, innen	$W_{id,i}$	3.834,97	3.834,97	3.834,97	mm³/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/m²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	140,00	kN/m²
Faktor für Abweichung von Diagrammen/Formeln:	$f_{\alpha,Qi}$	1,25	[-]
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	4,82	kN/m²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	p_T	8,00	kN/m²

1.2.2.2 Boden-Verformungsmoduln EB

Verformungsmodul:	E_{20}	3,00	N/mm²
Spannungsexponent:	z	0,60	[-]
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	3,67	N/mm²
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/mm²
E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	3,67	N/mm²
E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	3,67	N/mm²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	36,71	N/mm²

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/mm²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	2,937	N/mm²

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/mm²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	6,0	N/mm²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ_{RBD}	40,0	N/mm²
Rohrsteifigkeit:	S_R	68.456	kN/m²

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

Erdruckbeiwert (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 λR und λB

Maximaler Konzentrationsfaktor:	max λ	1,852	[-]

Für Rohre großer Steifigkeit (VRB > 1) ist die Berechnung mit λR = max λ 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/m²
Seitendruck:	q_h	56,12	kN/m²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung):	q^*_{hw}	0,00	kN/m²

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	cm²/m
Mindest-Ringbewehrung innen DIN EN 1916:	min. $a_{s,i}$	1,88	cm²/m
Vorhandene Ringbewehrung außen:	vorh. $a_{sring,e}$	3,59	cm²/m
Mindest-Ringbewehrung außen DIN EN 1916:	min. $a_{s,e}$	1,88	cm²/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	5,91	3,59	5,91	cm²/m
Mindestbewehrung	min. a_s	1,88	1,88	1,88	cm²/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. $a_{sring,i}$	5,91	cm²/m
Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6):	$a_{s,e,60\%i}$	3,55	cm²/m
Vorhandene Ringbewehrung außen:	vorh. $a_{sring,e}$	3,59	cm²/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:	$e_{L,max}$	450	mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,i}$	263	mm
Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb:	vorh $a_{S,L,i}$	1,07	cm²/m
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,e}$	287	mm
Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb:	vorh $a_{S,L,e}$	0,98	cm²/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).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Erf. Betondeckung außen	erf. $c_{nom,e}$	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{nom,e}$	40,0	40,0	40,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Erf. Betondeckung innen	erf. $c_{nom,i}$	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung innen	$c_{nom,i}$	50,0	50,0	50,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

1.2.4 Schnittkräfte , Langzeit

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	525,00	525,00	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

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	525,00	525,00	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 WasserdruckIInnendruck	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/m²
Abminderungsfaktor αV nach Tabelle 14 für Verkehrslasten:	α_V	0,60	[-]
Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung:	dyn p_V	4,800	kN/m²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,500	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne Stoßbeiwert):	p_K	1,85	kN/m²
Erdruckbeiwert (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/m²
Horizontale Bodenspannung aufgrund Verkehr:	dyn q_{Vh}	0,278	kN/m²

Es wird in Anlehnung an DWA-A 161, 2. Auflage, auch ein Teil der mit αV reduzierten, horizontalen Belastung aus Verkehr (ohne Stoßbeiwert) angesetzt.
Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes dyn pVh* wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung aufgrund dynamischer Last	dyn M_{qv}	0,345	-0,351	0,364	kNm/m
	m_{qh}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
Moment aufgrund horizontaler Bodenspannung 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
	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
Normalkraft aufgrund vertikaler Bodenspannung aufgrund dynamischer Last	dyn N_{qv}	0,068	-2,520	-0,068	kN/m
	n_{qh}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
Normalkraft aufgrund horizontaler Bodenspannung 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/mm²
Bemessungswert Beton:			f_{cd}	22,67	N/mm²
Nennstreckgrenze:			f_{yk}	500	N/mm²
Bemessungswert Betonstahl:			f_{yd}	434,78	N/mm²
		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/mm²
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	5,91	3,59	5,91	cm²/m
Erforderliche Bewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc}$	5,23	2,02	5,58	cm²/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	mm³/mm
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	4,1201	4,2001	4,4497	N/mm²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	-0,1431	-0,8593	-0,1821	N/mm²
Maßgebliche Biegezugspannung	σ_{bz}	3,9770	3,3407	4,2676	N/mm²
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/mm²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	3,5	N/mm²
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			max σ_{VR}	6,00	N/mm²
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	U σ_{VR}	70,6	50,1	75,3	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

Alle Nachweise für die Bemessung des Stahlbetons wurden erbracht.