

Vergleichende Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen

Herausgeber

Philippe Stolz, Rolf Frischknecht

Autoren des Berichts 2011

Matthias Stucki, Sybille Büsser, René Itten, Rolf Frischknecht
ESU-services Ltd.

Holger Wallbaum
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich

Im Auftrag von
**European Association of Geosynthetic product Manufacturers
(EAGM)**

Uster, 31 March 2020

Impressum

Titel	Vergleichende Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen
Herausgeber	Philippe Stolz, Rolf Frischknecht treeze Ltd., fair life cycle thinking Kanzleistr. 4, CH-8610 Uster www.treeze.ch Telefon +41 44 940 61 91, Fax +41 44 940 61 94 info@treeze.ch
Autoren von 2011	Matthias Stucki, Sybille Büsser, René Itten, Rolf Frischknecht ESU-services Ltd. Holger Wallbaum Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich
Auftraggeber	European Association of Geosynthetic product Manufacturers (EAGM)
Lenkungsausschuss	Henning Ehrenberg (Vorsitz), Dave Williams, David Cashman, Harry Groenendaal, Heiko Pintz, Heinz Homölle, Karl Wohlfahrt, Kjell De Rudder, Klaus Oberreiter, Nicolas Laidié, Massimo Antoniotti
Copyright	Die EAGM ist Eigentümer der in dieser Studie verwendeten Sachbilanzdaten der Herstellung von Geokunststoffen. Hintergrundinformationen sind zwischen dem Geosynthetikerhersteller und treeze streng vertraulich.
Haftungserklärung	Die hierin enthaltenen Informationen wurden zusammengestellt oder stammen aus Quellen, die als zuverlässig gelten. Dennoch übernehmen die Autoren oder ihre Organisationen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die sich aus deren Verwendung ergeben. Die Verwendung der angegebenen Informationen liegt ausschließlich in Ihrer eigenen Verantwortung.
Version	607_LCA_Geosynthetic_Conventional_Materials-v1.0, 23/04/2019 16:40:00

Executive Summary 2019

“Vergleichende Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen”

Stolz P, Frischknecht R, (Hrsg.) (2019) Vergleichende Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen. Zweite Auflage. treeze Ltd. Uster. Beauftragt von der European Association of Geosynthetic product Manufacturers (EAGM).

Erstauflage: Stucki M, Büsser S, Itten R, Frischknecht R. und Wallbaum H. (2011) Vergleichende Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen. ESU-services Ltd. Uster, ETH Zürich, Schweiz. Beauftragt von der European Association of Geosynthetic product Manufacturers (EAGM).

Definition von Ziel und Umfang

Geokunststoffe werden in vielen verschiedenen Anwendungen im Bauwesen eingesetzt. In den meisten Fällen ersetzt der Einsatz von Geokunststoffen die Verwendung anderer Baustoffe. Im Jahr 2010 beauftragte die European Association of Geosynthetic product Manufacturers (EAGM) die ETH Zürich und ESU-services Ltd. mit der Quantifizierung der Umweltauswirkungen häufig verwendeter Baustoffe (wie Beton, Zement, Kalk oder Kies) im Vergleich zu Geokunststoffen. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von vergleichenden Ökobilanzen durchgeführt, die sich auf verschiedene Anwendungsfälle konzentrierten, nämlich Filtern, Tragschichtstabilisierung, Deponiebau und Hangsicherung. Die Umweltauswirkungen von Geokunststoffen wurden mit der Leistung konkurrierender Baustoffe verglichen. Die Spezifikationen der vier Anwendungsfälle wurden von den EAGM-Mitgliedern festgelegt, die den europäischen Markt für Geokunststoffe vertreten. Sie stellen die aktuelle gute Baupraxis dar.

Tab. S. 1: Überblick über die Untersuchungsgegenstände der vier Anwendungsfälle

Beschreibung	Alternativen	Fall
Filterschicht	Kiesfilter	1A
	Geotextilfilter	1B
Straßenunterbau	konventionelle Straße (keine Stabilisierung erforderlich)	2A
	Mit Geokunststoff bewehrter Tragschicht	2B
	Mit Zement/Kalk stabilisiertem Planum	2C
Deponiebau	Dränschicht aus Kies	3A
	Dränschicht aus Geokunststoff	3B
Böschungssicherung:	Stützmauer aus Stahlbeton	4A
	Stützmauer mit Geokunststoff-Bewehrung	4B

Die Studie hält sich an die Normen ISO 14040 und 14044. Eine kritische Prüfung wurde von einem Gremium aus drei unabhängigen Experten durchgeführt. Die Studie bezieht sich auf das Jahr 2009. Die mit Fragebögen erhobenen Daten über Geokunststoffe beziehen sich auf das Jahr 2009 oder in einigen wenigen Ausnahmefällen auf 2008. Die verfügbaren Sachbilanzdaten über den weiteren Materialeinsatz und über den Einsatz von Maschinen sind etwas älter. Alle Daten beziehen sich auf europäische Verhältnisse.

Die Alternativen wurden jeweils so definiert, dass sie als technisch gleichwertig oder zumindest vergleichbar angesehen werden können. Die in den vier Fällen verwendeten Geokunststoffe stellen eine Mischung aus verschiedenen Marken dar, die für die jeweilige Anwendung geeignet sind. Die herkömmlichen Systeme stellen die häufigste Konstruktionsart dar.

Die Umweltauswirkungen wurden mit acht Wirkungskategorie-Indikatoren bewertet. Dies sind der kumulierte Energieaufwand (KEA), das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP100), die photochemische Ozonbildung, die Partikelbildung, die Versauerung, die Eutrophierung, die Landnutzung und die Wassernutzung.

Um die Unsicherheit der verwendeten Daten zu beurteilen, wurden Monte-Carlo-Analysen durchgeführt. Die Monte-Carlo-Analysen wurden in einer Weise durchgeführt, die abhängige Unsicherheiten ausschließt. Die Ergebnisse der Analysen zeigen die Auswirkungen der unabhängigen Unsicherheiten der beiden verglichenen Alternativen. Die Lebensdauer und die technische Spezifikation (Schichtdicken usw.) der verschiedenen Konstruktionen wurden nicht in die Unsicherheitsabschätzungen einbezogen. Allerdings wurde die Unsicherheit aufgrund der Variabilität der Kiesdichte und der Anpassung der Schichtdicke (95 % Intervall von +/- 7 % bzw. ca. +/- 3,5 cm für eine 50 cm dicke Kiesschicht) oder der erforderlichen Transportleistungen (95 % Intervall von ca. + 100 %/- 50 %) berücksichtigt.

Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse weiter zu untersuchen. Einerseits wurde im Anwendungsfall 1 die Dicke des Filters unter Berücksichtigung verschiedener technischer Spezifikationen variiert. Andererseits wurden im Anwendungsfall 2 vier Alternativen für Straßenfundamente analysiert. Dazu gehören 2 alternative Tragschichten mit einer Geokunststoff-Bewehrung, und zwei Alternativen für die Stabilisierung der Straße ausschließlich mit Zement oder Branntkalk.

Untersuchungsgegenstand und Sachbilanz

Die funktionellen Einheiten der vier Anwendungsfälle unterscheiden sich deutlich. Deshalb sollten die Ergebnisse der vier Fälle nicht fallübergreifend verglichen werden.

Filterschicht: Die Funktion des ersten Anwendungsfalles ist eine Kombination aus Trennen und Filtern. Ein Geokunststoff kann als Trenn- und/oder Filterschicht zwischen einer gut verdichteten Tragschicht und dem Untergrund eingesetzt werden. Dies ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass die Tragschicht ihre Tragfähigkeit behält. Der Geokunststoff verhindert einerseits das Einsinken des Materials der Tragschicht in den Untergrund und andererseits das Hochpumpen von Feinstteilchen aus dem Untergrund in die Tragschicht.

Die funktionelle Einheit ist somit definiert als der Bau und Rückbau eines Filters mit einer Fläche von 1 Quadratmeter mit einer hydraulischen Leitfähigkeit (k-Wert) von 0,1 mm/s oder mehr und einer gleich langen Lebensdauer von 30 Jahren.

Tragschichtstabilisierung: Im zweiten Anwendungsfall, der Verbesserung schlecht tragfähiger Böden, wird eine konventionelle Straße, bei der keine Stabilisierung erforderlich ist (Fall 2A), mit einer mit Geokunststoffen bewehrten Tragschicht (Fall 2B) und mit einer mit Zement/Kalk stabilisierten Straße (Fall 2C) verglichen.

Die Funktion des zweiten Anwendungsfalles ist die Bereitstellung einer Straße der Klasse III auf stabilisiertem Untergrund. Die funktionelle Einheit ist somit definiert als der Bau und Rückbau einer Straßen der Klasse III mit einer Länge von 1 m, einer Breite von 12 m und einer gleich langen Lebensdauer von 30 Jahren.

Deponiebau: Der dritte Anwendungsfall vergleicht die Verwendung eines geosynthetischen Dränsystems (Fall 3B) mit einem Dränsystem aus Kies (Fall 3A) zur Abdeckung einer Abfalldeponie. Ein Geokunststoff auf dem Dränkies wird häufig verwendet, um das Eindringen von Feinteilen des Oberbodens in die Drainage zu verhindern, und ein zweiter Geokunststoff wird unter der Dränschicht als Schutzschicht verwendet, um sicherzustellen, dass die Dichtungsbahn durch den Dränkies nicht beschädigt wird. Daher werden in der Praxis bei beiden Lösungen Geokunststoffe verwendet - auf und unter der Dränschicht. Alle anderen Schichten in einer Deponie ändern sich weder in der Dicke noch in den Materialanforderungen.

Die Funktion des Anwendungsfalles 3 besteht darin, eine Dränschicht in der Abdeckschicht einer Deponie für gefährliche/nicht gefährliche Abfälle zu bilden. Der Zweck dieser Dränschicht ist die Ableitung eindringenden Regenwassers von der Oberfläche. Die funktionelle Einheit ist definiert als der Bau und Rückbau einer 1 m² großen Dränschicht mit einer hydraulischen Leitfähigkeit (k-Wert) von 1 mm/s oder mehr und einer gleich langen Lebensdauer von 100 Jahren.

Böschungssicherung: In einigen Fällen, insbesondere beim Bau von Verkehrsinfrastruktur, kann es notwendig sein, Böschungen zu stabilisieren. Um dies zu erreichen, können Stützbauwerke erforderlich sein. Die Bemessung dieser Stützmauern gewährleistet, dass sie die Erdböschung stützen können. Mit Stahlbeton gebauten Stützmauern (Fall 4A) werden mit steilen, mit Geokunststoffen bewehrten Erdböschungen (Fall 4B) verglichen.

Die Funktion des vierten Anwendungsfalles besteht darin, eine Hangsicherung mittels einer stabilen Stützmauer zu gewährleisten. Die funktionelle Einheit ist definiert als der Bau und Rückbau von 1 m Böschungssicherung mit einer 3 m hohen Wand, bezogen auf einen Regelquerschnitt. Damit ist die Funktionseinheit unabhängig von der Länge der Wand. Die Lebensdauer beider Konstruktionen beträgt 100 Jahre.

Für alle Anwendungsfälle wurden Daten über die Produktion von Geokunststoffen bei den zahlreichen am Projekt beteiligten Unternehmen gesammelt. Die firmenspezifischen Sachbilanzdaten wurden zur Erstellung durchschnittlicher Sachbilanzdaten von Geokunststoffen verwendet. Die durchschnittlichen LZI wurden pro Fall auf der Grundlage gleichgewichteter Durchschnittswerte der Umweltauswirkungen der von den teilnehmenden Mitgliedsunternehmen hergestellten Produkte ermittelt. Die technischen Spezifikationen der vier Anwendungsfälle (z.B. wie viel Kies und Diesel benötigt wird) wurden von Bausachverständigen überprüft. Die zur Erstellung der Konstruktionen erforderlichen Materialien und Prozesse wurden mit generischen Hintergrunddaten modelliert. Die primäre Quelle für die in dieser Studie verwendeten Hintergrunddaten ist der ecoinvent Datenbestand v2.2 (ecoinvent Centre 2010), die Sachbilanzdaten zu vielen Grundstoffen und Dienstleistungen enthält.

Ergebnisse

Abb. S. 1 bis Abb. S. 5 stellen die Umweltauswirkungen der vier Anwendungsfälle über den gesamten Lebenszyklus dar. Für jeden Indikator werden die Umweltauswirkungen der Alternative mit den höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert. Die Umweltauswirkungen werden in die Bereiche Infrastruktur (Straße, Deponie, Hangsicherung), Rohstoffe (Bitumen, Kies, Geokunststoff, Zement, Branntkalk, Beton, Betonstahl, Holzplatten), Baumaschine (eingesetzt beim Ein- und Rückbau), Transporte (der Rohstoffe zur Baustelle) und Entsorgung (umfasst Transporte von der Baustelle zur Deponie und die Auswirkungen der Entsorgung der verschiedenen Materialien) unterteilt.

Ein Geokunststoff-Filter (Fall 1B) verursacht im Vergleich zu einer konventionellen Kiesfilterschicht (Fall 1A) geringere Auswirkungen im Hinblick auf alle untersuchten Umweltindikatoren. Bei allen Umweltindikatoren verursacht der Geokunststoff-Filter weniger als 25 % der Auswirkungen eines herkömmlichen Kiesfilters. Der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand für den Bau von 1 Quadratmeter Filter mit einer Lebensdauer von 30 Jahren beträgt 131 MJ Öl-Äq im Fall 1A und 19 MJ Öl-Äq im Fall 1B. Die kumulierten Treibhausgasemissionen betragen 7,8 kg CO₂-Äq/m² im Fall 1A und 0,81 kg CO₂-Äq/m² im Fall 1B.

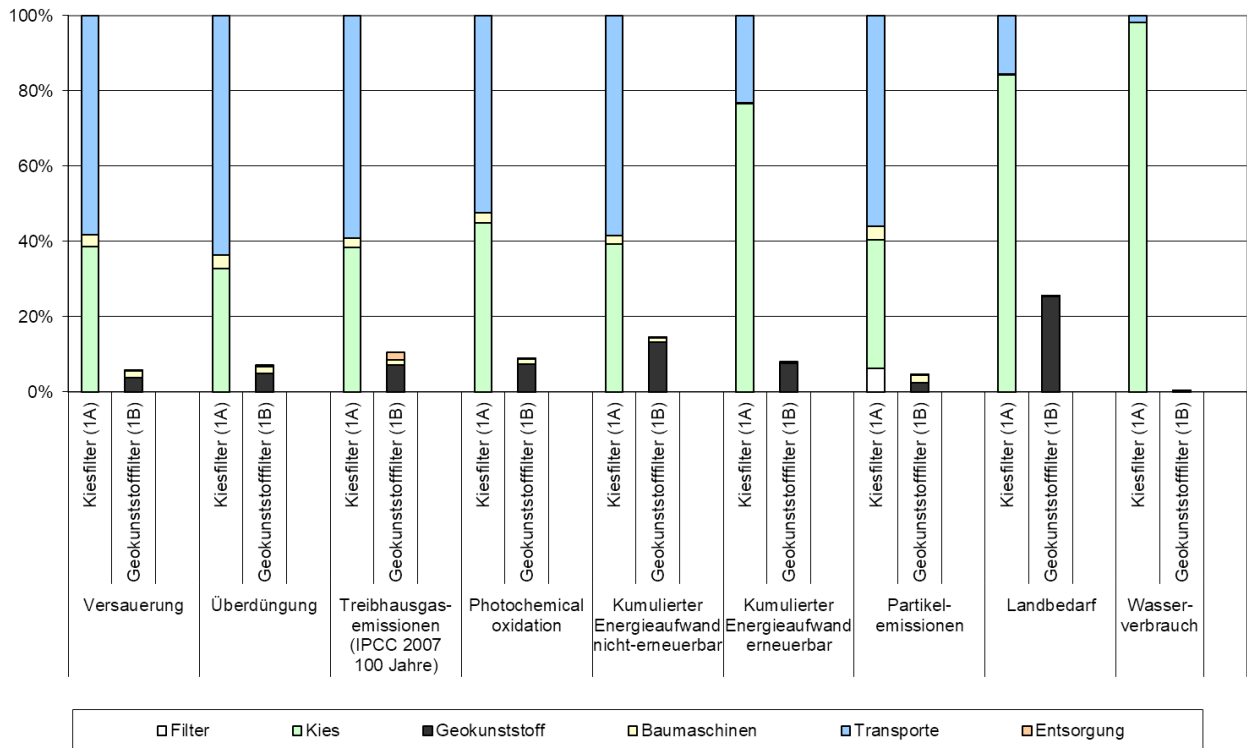


Abb. S. 1: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1m² Filter für die Fälle 1A und 1B. Für jeden Umweltindikator wird der Fall mit höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert.

Eine konventionell gebaute Straße (Fall 2A) verursacht höhere Umweltauswirkungen im Vergleich zu einer mit Geokunststoffen bewehrten Straße (Fall 2B) in Bezug auf alle Umweltindikatoren. Die höheren Umweltauswirkungen von Fall 2A werden durch die Emissionen und den Ressourcenverbrauch verursacht, die mit der Produktion und dem Transport der zusätzlich benötigten Kiesmenge verbunden sind. Der Straßenbau mit einem zement-/kalkstabilisiertem Fundament (Fall 2C) verursacht höhere Treibhausgasemissionen als in den Fällen 2A und 2B, vor allem wegen der geogenen CO₂-Emissionen aus der Kalzinierung bei der Klinker- und Branntkalkherstellung. Hinsichtlich der Landnutzung sind die Auswirkungen aller drei Alternativen mehr oder weniger gleich, mit einer maximalen Abweichung im Fall 2C, bei dem 2,2 % weniger Land als im Fall 2A benötigt wird. Fall 2C verursacht eine geringere Eutrophierung und geringere Feinstaubemissionen und benötigt im Vergleich zu den Fällen 2A und 2B weniger Wasserressourcen.

Der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand für den Bau und Rückbau von 1 Meter stabilisierter Straße mit einer Breite von 12 Metern und einer Lebensdauer von 30 Jahren beträgt 25.200 MJ Öl-Äq im Fall 2A, 23.900 MJ Öl-Äq im Fall 2B und 24.400 MJ Öl-Äq im Fall 2C. Die kumulierten Treibhausgasemissionen betragen 0,73 t CO₂-Äq/m² im Fall 2A, 0,65 t CO₂-Äq/m² im Fall 2B und 0,95 t CO₂-Äq/m² im Fall 2C. Dementsprechend betragen die kumulierten Treibhausgasemissionen von 1 km stabilisierter Straße 730 t CO₂-Äq im Fall 2A, 650 t CO₂-Äq im Fall 2B und 950 t CO₂-Äq im Fall 2C.

Die Unsicherheitsanalyse bestätigt, dass Fall 2B bei allen Indikatoren geringere Umweltauswirkungen verursacht als Fall 2A. Für den Vergleich von Fall 2B und Fall 2C zeigt die Unsicherheitsanalyse geringere Auswirkungen für die Kategorien KEA erneuerbar, photochemische Ozonbildung und Treibhauspotenzial für den Fall 2B. Hinsichtlich des Indikators Landnutzung verursacht Fall 2B höhere Umweltauswirkungen als Fall 2C. In Bezug auf alle anderen Indikatoren zeigt die Unsicherheitsanalyse keine klare Rangfolge zwischen den Fällen 2B und 2C.

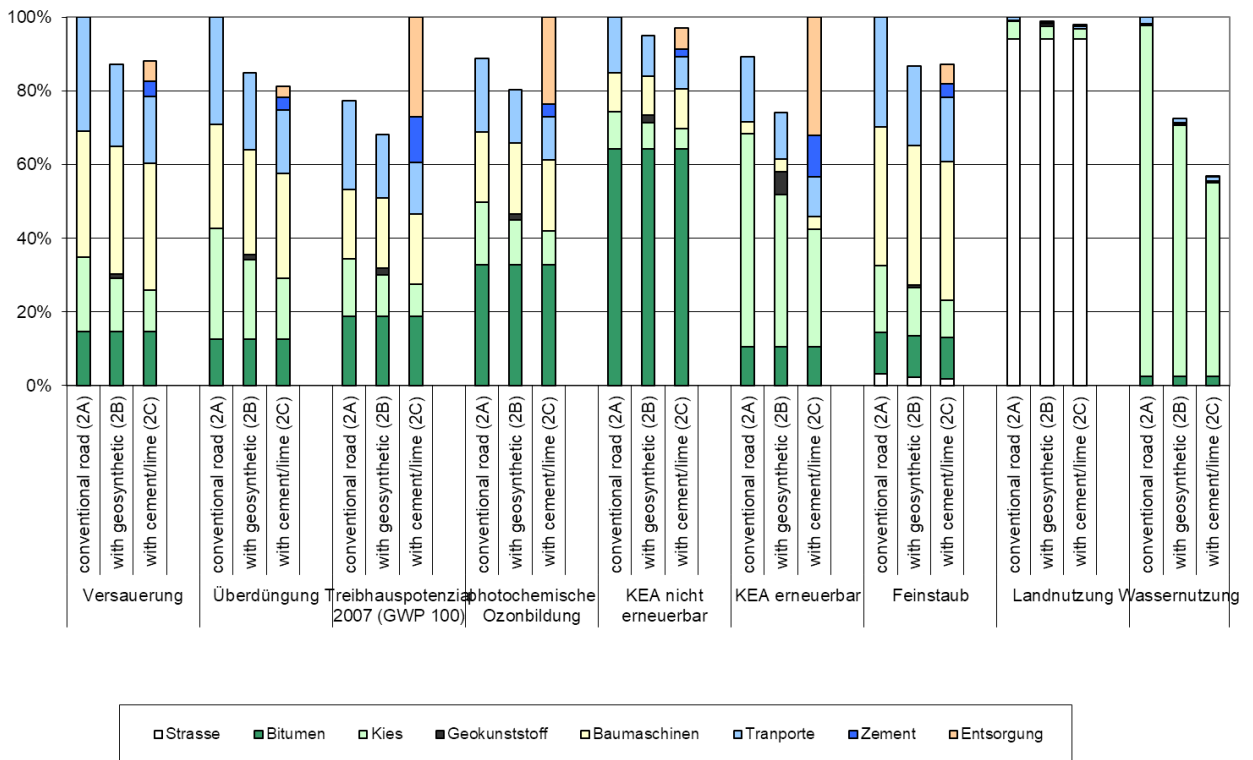


Abb. S. 2: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 Meter Straße mit stabilisiertem Fundament, Fälle 2A, 2B und 2C. Für jeden Umweltindikator wird der Fall mit höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert.

Abb. S. 3 zeigt die Sensitivitätsanalysen für den mit Geokunststoffen bewehrten Straßenbau mit Bodenaustausch (Fall 2BS1) und ohne Geokunststoff-Trennschicht (Fall 2BS2) sowie für den Straßenbau mit stabilisiertem Unterbau nur mit Branntkalk (Fall 2CS1) und nur mit Zement (Fall 2CS2).

Die Verwendung von Branntkalk zur Stabilisierung verursacht die höchsten Umweltauswirkungen im Hinblick auf das Treibhauspotenzial, die photochemische Ozonbildung, den nicht erneuerbaren KEA und erneuerbaren KEA. Die Wahl von Zement zur Stabilisierung führt im Vergleich zu Fall 2B zu höheren Treibhausgasemissionen, zu einem höheren erneuerbaren KEA und zu einem höheren Wasserverbrauch.

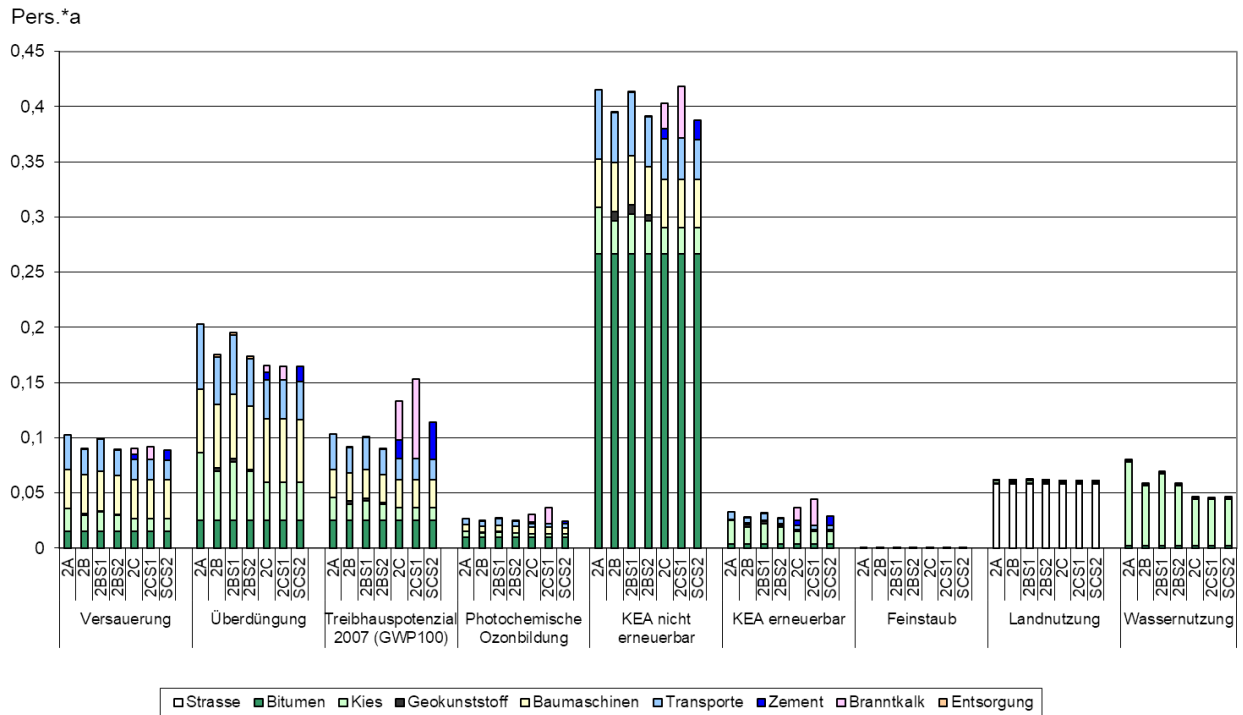


Abb. S. 3: Sensitivitätsanalysen: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 Meter Straße Klasse III, Fälle 2A, 2B und 2C. Fall 2BS1: Bau einer mit Geokunststoff bewehrten Straße der Klasse III mit Bodenaustausch; Fall 2BS2: Bau einer mit Geokunststoff bewehrten Straße ohne Geokunststoff-Trennschicht; Fall 2CS1: Bau einer mit Brantkalk stabilisierten Straße; Fall 2CS2: Bau einer mit Zement stabilisierten Straße. Für jeden Umweltindikator sind die Ergebnisse mit den jährlichen weltweiten Auswirkungen pro Kopf normiert.

Eine geosynthetische Dränschicht (Fall 3B) verursacht in allen betrachteten Wirkungskategorien geringere Umweltauswirkungen als eine Dränschicht aus Kies (Fall 3A), mit Ausnahme der Landnutzung, die in beiden Fällen etwa gleich groß ist. Der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand für den Bau und Rückbau von 1 Quadratmeter Dränschicht beträgt 194 MJ Öl-Äq im Fall 3A und 86 MJ Öl-Äq im Fall 3B. Die kumulierten Treibhausgasemissionen betragen 10,9 kg CO₂-Äq/m² im Fall 3A und 3,6 kg CO₂-Äq/m² im Fall 3B. Dementsprechend betragen die kumulierten Treibhausgasemissionen der Dränschicht einer Deponie mit einer Fläche von 30.000 m² 330 t CO₂-Äq im Fall 3A und 110 t CO₂-Äq im Fall 3B.

Die Monte-Carlo-Simulation zeigt mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99 %, dass die geosynthetische Dränschicht bei allen untersuchten Indikatoren mit Ausnahme der Landnutzung geringere Umweltauswirkungen hat als die mineralische Dränschicht. Die Wahrscheinlichkeit, dass die geosynthetische Dränschicht geringere Umweltauswirkungen durch die Landnutzung hat als die mineralische Dränschicht, liegt bei 62 %.

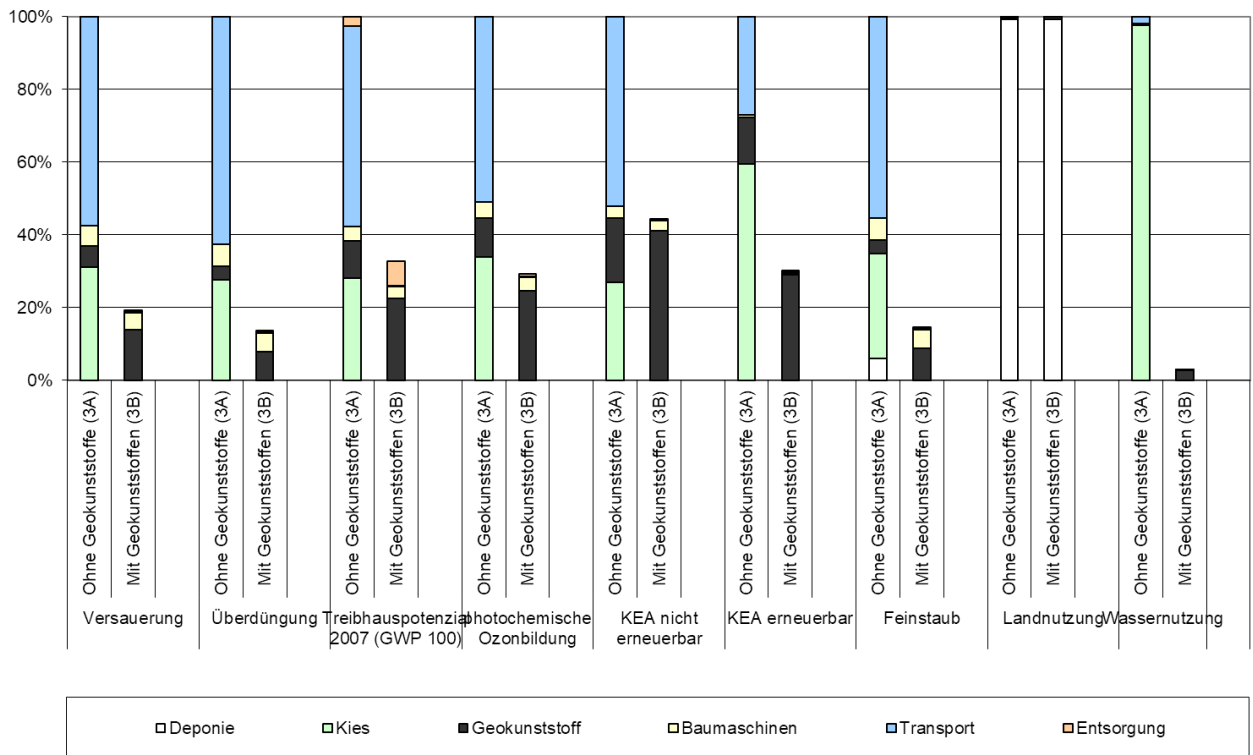


Abb. S. 4: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 m² mineralischer Dränschicht (Fall 3A) und einer geosynthetischen Dränschicht (Fall 3B). Für jeden Indikator wird der Fall mit höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert.

Eine mit Geokunststoff bewehrte Stützmauer (Fall 4B) verursacht in allen betrachteten Wirkungskategorien geringere Umweltauswirkungen als eine Stützmauer aus Stahlbeton (Fall 4A). Der nicht erneuerbare kumulative Energiebedarf für den Bau und Rückbau von 1 Meter Böschungssicherung mit einer Höhe von 3 m beträgt 12,700 MJ-Äq im Fall 4A und 3,100 MJ-Äq im Fall 4B. Die kumulierten Treibhausgasemissionen betragen 1.3 t CO₂-Äq/m im Fall 4A und 0.2 t CO₂-Äq/m im Fall 4B. Dementsprechend betragen die kumulierten Treibhausgasemissionen bei 300 m Stützmauer 400 t CO₂-eq im Fall 4A und 70 t CO₂-eq im Fall 4B. Die Monte-Carlo-Simulation zeigt bei allen Indikatoren eine Wahrscheinlichkeit von 100 %, dass die Umweltauswirkungen der herkömmlichen Böschungssicherung im Vergleich zu den Umweltauswirkungen der Sicherung mit Geokunststoffen höher sind.

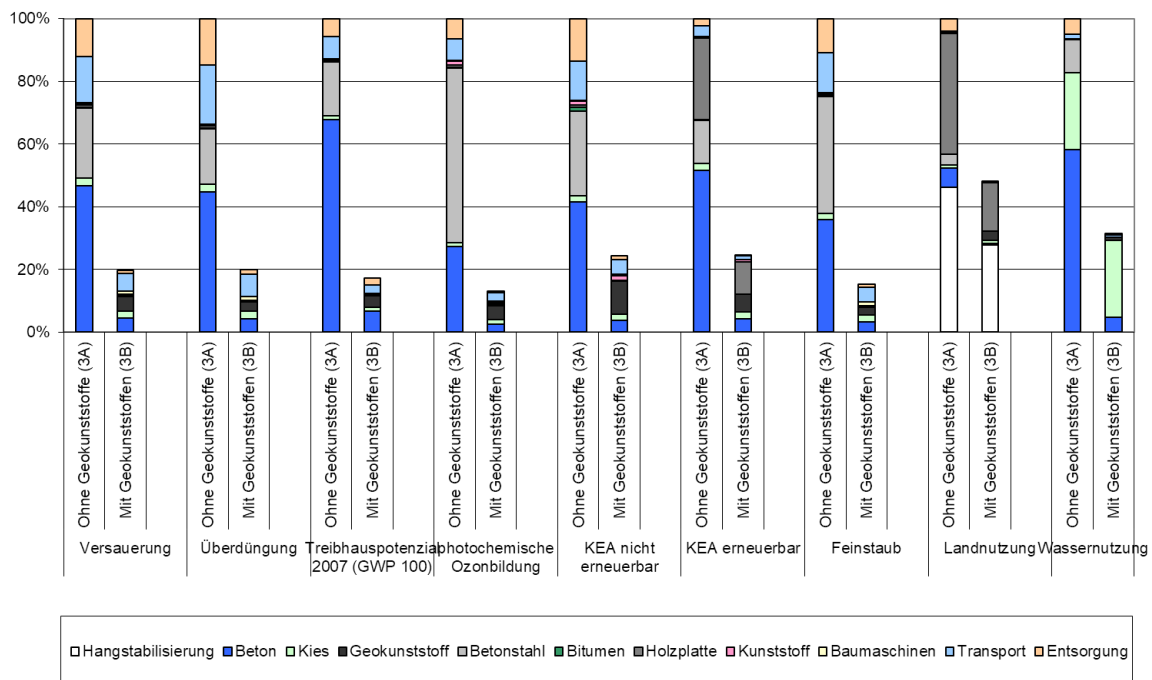


Abb. S. 5: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 Meter Böschungssicherung, Fälle 4A und 4B. Für jeden Umweltindikator wird der Fall mit höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert.

Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Transports der Materialien mit einem Euro5-Lastwagen anstelle eines durchschnittlichen Flotten-Lkw zeigt geringere Umweltauswirkungen in Bezug auf jene Indikatoren und Fälle, in denen der Transport der Materialien einen wichtigen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dies gilt für die konventionelle Kiesfilterschicht im Fall 1, für die mit Geokunststoff bewehrte Schicht im Fall 2B (siehe Abb. S. 3), für die konventionelle Dränschicht im Fall 3A und für beide Arten der Böschungssicherung. Die Reihenfolge der Umweltauswirkungen der verglichenen Fälle ändert sich in keinem der vier Fälle.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ein **geosynthetischer Filter** hat geringere Umweltauswirkungen als eine konventionelle Alternative (Kies). Der Unterschied ist bei allen Indikatoren beträchtlich (mehr als 85 %) und belastbar. Der Unterschied in den Umweltauswirkungen entsteht vor allem deshalb, weil der Geokunststoff den Kies ersetzt, der beim Abbau und Transport zum Einsatzort wesentlich höhere Umweltbelastungen verursacht. Der Ersatz einer Schicht von mindestens 8 cm Kies durch einen geosynthetischen Filter, führt bei allen Indikatoren zu gleichen oder geringeren Umweltauswirkungen.

Beim Vergleich des Einsatzes von **Geokunststoffen im Straßenbau** zur Bewehrung des Unterbaus (Fall 2B) mit der herkömmlichen Bauweise (Fall 2A) wird die Umweltbelastung bei allen Indikatoren durch den Einsatz von Geokunststoffen reduziert. Beim Vergleich der Variante mit Geokunststoffen (Fall 2B) und der Variante mit Zement-/Kalk-Stabilisierung (Fall 2C) ist eine Kompensation zwischen den Fällen 2B und 2C zu beobachten. Einerseits verursacht die Stabilisierung durch Zement oder Kalk höhere Treibhausgasemissionen, vor allem wegen der geogenen CO₂-Emissionen aus dem Produktionsprozess von Zement und Branntkalk. Andererseits zeigt die Stabilisierung mit Geokunststoffen höhere Ergebnisse bei den Umweltindikatoren Eutrophierung, Wasserverbrauch und Feinstaub aufgrund der Emissionen und des Ressourcenverbrauchs im Zusammenhang mit der Produktion und dem Transport der zusätzlich benötigten Menge an Kies. Die ausschließliche Verwendung von Branntkalk zur Stabilisierung des Straßenunterbaus (Fall 2CS1) verursacht höhere Umweltbelastungen als die Verwendung von Zement (Fall 2CS2). Der Ersatz einer Kiesschicht mit einer Dicke von mindestens 25 cm in einer konventionell gebauten Straße durch Geokunststoffe in der Tragschicht führt bei allen Indikatoren zu gleich hohen oder geringeren Umweltauswirkungen.

Die **Unsicherheitsanalyse** zeigt, dass die Ergebnisse für alle Umweltindikatoren beim Vergleich der Fälle 2A und 2B belastbar sind, und dass beim Vergleich der Fälle 2B und 2C die Ergebnisse für die Indikatoren photochemische Ozonbildung, Treibhauspotenzial, Landnutzung und KEA erneuerbar stabil sind. Bei den anderen Indikatoren ist der Unterschied zwischen den Fällen 2B und 2C wesentlich weniger eindeutig.

Die Hauptverursacher für den Unterschied zwischen der geosynthetischen **Dränschicht in einer Deponie** und der konventionellen Kiesdränschicht sind die Gewinnung und der Transport des bei der herkömmlichen Bauweise verwendeten Kieses. Bei allen Umweltindikatoren mit Ausnahme der Landnutzung sind die Auswirkungen der konventionellen Dränschicht mehr als doppelt so hoch wie die Auswirkungen der geosynthetischen Dränschicht. Die Monte-Carlo-Simulationen zeigen, dass die Unterschiede in Bezug auf alle Umweltindikatoren mit Ausnahme der Landnutzung als belastbar und signifikant angesehen werden können. In Bezug auf die letztere können die beiden Alternativen als gleichwertig betrachtet werden.

Im Vergleich zur konventionellen Böschungssicherung ersetzt die **mit Geokunststoff bewehrte Stützmauer** die Verwendung von Beton und Stahlbewehrung, was zu einer um zwischen 52 % und 87 % geringeren Umweltbelastung führt. Die Unsicherheitsanalyse zeigt die Zuverlässigkeit der Feststellung, dass die Verwendung von Geokunststoffen geringere Umweltauswirkungen verursacht als eine konventionelle Böschungssicherung.

Die Hauptverursacher der Umweltauswirkungen der Herstellung und Entsorgung von Geokunststoffen sind die eingesetzten Rohstoffe (Kunststoffe) und der Stromverbrauch. Die Anteile an den gesamten Umweltauswirkungen der vier Fälle sind jedoch mit Ausnahme des Anwendungsfalls 4 gering, bei welchem Geokunststoffe bei einigen Umweltindikatoren einen wichtigen Beitrag leisten können. Die Variation der Umweltauswirkungen der Geokunststoffherstellung hat keinen Einfluss auf die Gesamtergebnisse, wie die Monte-Carlo-Simulationen zeigen. Die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse sind daher für die Produkte jeden Herstellers gültig.

In allen hier betrachteten Fällen können Geokunststoffe zu Bauweisen mit deutlich geringeren Auswirkungen auf den Klimawandel beitragen. Die Verwendung von Geokunststoffen kann auch zu geringeren Umweltauswirkungen wie Versauerung und Eutrophierung sowie zu einem geringeren kumulierten Energieaufwand führen, mit Ausnahme des Falles der Tragschichtstabilisierung (Fall 2), bei dem diese Umweltauswirkungen im Vergleich zu konventionellen Lösungen größer sind.

Es wird empfohlen, für jeden der vier Fälle vereinfachte parametrisierte Modelle zu erstellen, die eine individuelle Bewertung von Alternativen einer bestimmten Bauweise ermöglichen. Dies gilt insbesondere für den Anwendungsfall 4, bei dem konkrete Situationen sehr spezifische technische Lösungen erfordern können. Mit Eingabe der wichtigsten bestimmenden Faktoren wie die benötigte Menge an Kies, Zement, Beton oder Geokunststoffen können mit diesen parametrisierten Modellen die Umweltauswirkungen der in Frage kommenden alternativen Bauweisen berechnet werden.

Bewertung der Aktualität der 2011 veröffentlichten vergleichenden Ökobilanz

Die Aktualität der vergleichenden Ökobilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen wurde 2018 beurteilt, um eine Entscheidungsgrundlage dafür zu schaffen, ob die Studie ganz oder teilweise aktualisiert werden muss. Die EAGM beauftragte die treeze Ltd. mit der Beantwortung der folgenden Fragen:

1. Sind die Designkriterien und die Konstruktionsanforderungen der vier Fälle noch gültig?
2. Sind die Herstellungsdaten für geosynthetische Materialien noch angemessen?
3. Gibt es wesentliche Änderungen aufgrund einer Aktualisierung der zugrunde liegenden Sachbilanz-Daten?

Die Beurteilung der Aktualität umfasst EAGM-Mitglieder, die den europäischen Markt für Geokunststoffe beliefern.

Die **Gültigkeit der vier Fälle** (Frage 1) wurde von Henning Ehrenberg im Auftrag der EAGM analysiert. Die Bemessungskriterien und Konstruktionsanforderungen für Filterschichten, Tragschichtstabilisierung, Deponie-Dränschichten und Böschungssicherung mit Geokunststoffen und konventionellen Baustoffen sind seit der vergleichenden Ökobilanz im Jahr 2011 unverändert geblieben. Die vier Fälle sind daher nach wie vor angemessen, und die Stücklisten und der Konstruktionsaufwand müssen nicht aktualisiert werden.

Die **Angemessenheit der Daten für die Herstellung von Geokunststoffen** (Frage 2) wurde durch eine Umfrage unter den EAGM-Mitgliedern geprüft. Die Hersteller wurden nach möglichen Änderungen im Produktportfolio, im Produktdesign, in den Produktionsprozessen und in den Produktionsanlagen befragt. Die Erhebung von neuen Daten über die Herstellung von Geokunststoffen (z.B. Rohstoffeinsatz, Energiebedarf, Schadstoffemissionen) war nicht Teil dieser Umfrage. 21 Unternehmen waren zum Zeitpunkt der Durchführung der Umfrage Mitglieder der EAGM. Zwischen 2011 und 2018 traten vier Hersteller dem EAGM neu bei, während vier ehemalige Mitglieder austraten. 14 Hersteller von Geokunststoffen nahmen an der Umfrage teil, darunter zwei Unternehmen, die sich seit 2011 der EAGM angeschlossen haben.

Die Rücklaufquote war in Bezug auf alle vier Anwendungsfälle ziemlich gut oder gut. In jedem Anwendungsfall gab es einige wenige Hersteller, die im Jahr 2011 keine Daten für die vergleichende Ökobilanz zur Verfügung stellten. Die Unternehmen, die der EAGM seit 2011 beigetreten sind, stellen Geokunststoffe für alle betrachteten Fälle her.

Die meisten Hersteller, die 2011 Daten zur Verfügung gestellt hatten, bestätigten, dass sie weiterhin Geokunststoffe für die jeweiligen Fälle produzieren; nur wenige Unternehmen erklärten die Produktion eingestellt zu haben. Nur sehr wenige EAGM-Mitglieder berichteten, dass sie neue Produktionsanlagen in Betrieb genommen haben oder neu energieeffizientere Brenner verwenden. Das Produktdesign und der Produktionsprozess sind nach Angaben aller antwortenden Hersteller unverändert.

Die für die vier Anwendungsfälle erhobenen Daten der 2011 durchgeführten vergleichenden Ökobilanz repräsentieren insgesamt mehr als 20 Produktionsstätten. Die wenigen zusätzlichen Produktionsanlagen zur Herstellung von Geokunststoffen und die Optimierung des Produktionsprozesses eines Herstellers würden nur geringfügige Veränderungen der Umweltauswirkungen der Geokunststoffproduktion bewirken. Die

Herstellungsdaten werden daher weiterhin als angemessen betrachtet.

Die **Änderungen aufgrund einer Aktualisierung der zugrunde liegenden Sachbilanz-Daten** (Frage 3) wurden am Beispiel von Fall 2 (Tragschichtstabilisierung) beurteilt. Für diese Analysen wurden die KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016) verwendet. Es handelt sich hier um eine umfassend aktualisierte Version des ecoinvent Datenbestands v2.2 (ecoinvent Centre 2010), der in der 2011 durchgeführten vergleichenden Ökobilanz verwendet wurde.

In den KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 sind aktualisierte Sachbilanzdaten der Lkw-Gütertransporte und des Betriebs von Baumaschinen (Stolz et al. 2016) eingebettet. Die im Vordergrund stehenden Sachbilanzdaten der Konstruktion von Tragschichtstabilisierungen mit und ohne Geokunststoffe hatten sich nicht verändert und die Umweltauswirkungen waren dieselben wie in der Studie von 2011. Die Umweltauswirkungen einer konventionellen Straße (Fall 2A), einer mit Geokunststoffen bewehrten Straße (Fall 2B) und einer mit Zement-/Kalk stabilisierten Straße (Fall 2C) sind in der Tabelle S.2 dargestellt, einmal ermittelt mit dem ecoinvent Datenbestand v2.2 und einem mit den KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016.

Tab. S. 2: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 Meter Straße mit stabilisiertem Fundament, Fälle 2A, 2B und 2C. Die Ergebnisse der Studie von 2011, die auf dem ecoinvent Datenbestand v2.2 basieren, werden mit den Ergebnissen verglichen, die auf den aktualisierten Hintergrunddaten der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 basieren. Die Sachbilanzdaten im Vordergrund wurden nicht verändert.

Wirkungskategorie	Einheit	Ecoinvent Datenbestand v2.2			KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016		
		konventionelle Straße (2A)	mit Geokunststoff (2B)	mit Zement/Kalk (2C)	konventionelle Straße (2A)	mit Geokunststoff (2B)	mit Zement/Kalk (2C)
Versauerung	kg SO ₂ -Äq	3,99	3,48	3,52	3,39	3,09	3,30
Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq	1,12	0,962	0,907	0,767	0,675	0,653
Treibhauspotenzial 2007 (GWP 100)	kg	734	651	949	704	625	921
Photochemische Ozonbildung	kg C ₂ H ₄	0,163	0,147	0,183	0,195	0,179	0,218
KEA nicht erneuerbar	MJ Öl-Äq	25.156	23.897	24.424	24.927	23.739	24.292
KEA erneuerbar	MJ Öl-Äq	234	195	262	279	234	307
Feinstaub	kg PM ₁₀ -Äq	1,94	1,68	1,69	1,21	1,06	1,13
Landnutzung	m ² a	383	379	374	383	380	375
Wasserverbrauch	m ³	50,2	36,5	29,0	50,1	36,4	28,9

Die Verwendung der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 führt zu höheren Umweltauswirkungen bei der photochemischen Ozonbildung und beim KEA erneuerbar für jede Alternative von Fall 2. Andererseits sind die Umweltauswirkungen in den Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und Feinstaub bei Verwendung der KBOB LZI Ökobilanzdaten DQRv2:2016 im Vergleich zur Verwendung des ecoinvent Datenbestands v2.2 geringer. Die Änderung aufgrund einer Aktualisierung der zugrunde liegenden Sachbilanzdaten ist für die Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, KEA nicht erneuerbar, Landnutzung und Wasserverbrauch unbedeutend (< 5 %).

Die Größenordnung der Veränderungen ist für die Fälle 2A, 2B und 2C ähnlich. Daher ändert sich die Reihenfolge der Alternativen bei keinem der betrachteten Umweltindikatoren. Die relative Größenordnung der Umweltauswirkungen der drei Alternativen kann sich jedoch bei einigen Indikatoren ändern. Zum Beispiel wird der Unterschied zwischen der mit Geokunststoffen bewehrten Straße (Fall 2B) und der mit Zement / Kalk stabilisierten Straße (Fall 2C) in der Belastungskategorie Feinstaub grösser.

Die Beiträge der wichtigsten Materialien und Verfahren zu den Umweltauswirkungen der drei Alternativen von Straßen mit stabilisiertem Untergrund auf Basis der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 sind in Abb. S. 6 dargestellt (siehe Abb. S. 2 für die Ergebnisse mit dem ecoinvent Datenbestand v2.2). Die Verwendung von aktualisierten Hintergrunddaten führt zu einem höheren Beitrag von Bitumen für die meisten Wirkungskategorie-Indikatoren, was auf eine andere Rohölmischung zurückzuführen ist, da die Raffinerien höhere Anteile an russischem, kasachischem und aserbaidjanischem Rohöl verwenden. Die aktualisierten Sachbilanzdaten der LKW-Gütertransporte und des Betriebs von Baumaschinen führen zu geringeren Beiträgen dieser Prozesse zu den Umweltindikatoren Versauerung, Eutrophierung und Feinstaub. Dies ist vor allem auf geringere NO_x-Emissionen von Lastwagen und Baumaschinen mit

strengeren Emissionsvorschriften zurückzuführen. Der Beitrag des Geokunststoffs im Fall 2B bleibt für alle analysierten Umweltindikatoren gering.

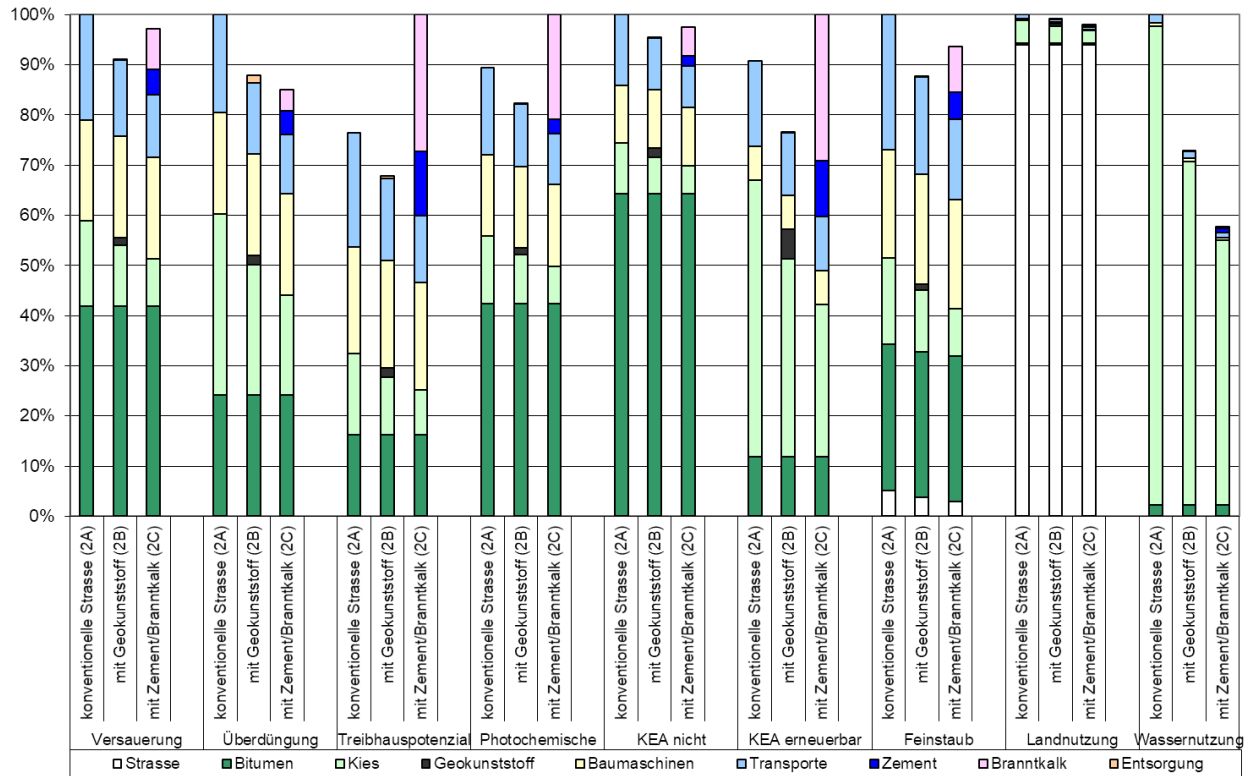


Abb. S. 6: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 Meter Straße mit stabilisiertem Fundament, Fälle 2A, 2B und 2C, berechnet anhand der aktualisierten Hintergrunddaten der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016. Für jeden Umweltindikator wird der Fall mit höheren Umweltauswirkungen auf 100 % skaliert.

Die Sensitivitätsanalysen für die Alternativen 2BS1, 2BS2, 2CS1 und 2CS2 (siehe Abb. S. 6 oben) wurden ebenfalls mit den aktualisierten Hintergrunddaten der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 durchgeführt (Abb. S. 7). Bei den meisten Umweltindikatoren führt die Aktualisierung der zugrunde liegenden Sachbilanzdaten zu Änderungen des relativen Ausmaßes der Auswirkungen und der wichtigsten Beiträge. Die Aktualisierung beeinflusst die Reihenfolge der Alternativen aber nicht. Bei den Umweltindikatoren Versauerung und Feinstaub ändert sich jedoch die Reihenfolge. Der Fall 2CS1 (mit Brantnkalk stabilisierte Straße) verursacht die höchsten Versauerungswirkungen und die zweithöchsten Feinstaubbelastungen bei Verwendung der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016. Die Umweltauswirkungen Versauerung und Feinstaub des Falles 2CS2 (mit Zement stabilisierte Straße) sind höher als diejenigen des Falles 2B.

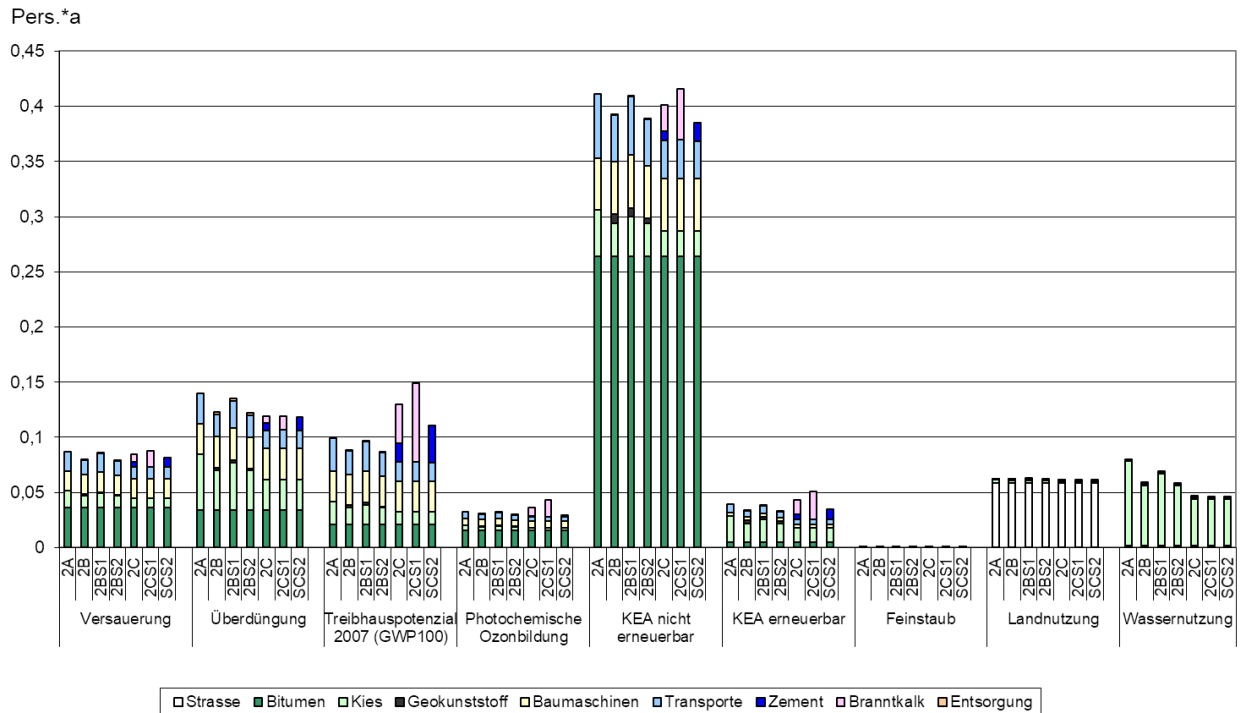


Abb. S. 7: Umweltauswirkungen des Lebenszyklus von 1 m Straße der Klasse III, Fälle 2A, 2B und 2C und für die Sensitivitätsanalysen (Fälle 2BS1, 2BS2, 2CS1 und 2CS2), berechnet anhand der aktualisierten Hintergrunddaten der KBOB LCI-Daten DQRv2:2016. Für jeden Indikator werden die Ergebnisse mit den jährlichen weltweiten Auswirkungen pro Kopf normalisiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verwendung der aktualisierten Hintergrunddaten der KBOB Ökobilanzdaten DQRv2:2016 hauptsächlich das absolute Ausmaß der Umweltauswirkungen beeinflusst, aber keinen Einfluss auf die Reihenfolge der Alternativen 2A, 2B und 2C hat. Die Beiträge der wichtigsten Materialien und Verfahren zu den gesamten Umweltauswirkungen verändern sich, wobei der Anteil der Herstellung von Geokunststoffen gering bleibt. Es wird erwartet, dass die Auswirkungen neuer Hersteller oder neuer Produktionsanlagen auf die Gesamtergebnisse unbedeutend sind, da die Umweltauswirkungen der Geokunststoffherstellung zum Teil durch die Lieferung von Rohstoffen verursacht werden. Die Hintergrunddaten haben daher das größte Potenzial, die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz von Geokunststoffen gegenüber konventionellen Baustoffen zu verändern.

Der Bericht und seine wichtigsten Schlussfolgerungen der 2011 durchgeführten Studie sind nach wie vor gültig.

Abkürzungen

KEA	Kumulierter Energieaufwand
EAGM	European Association of Geosynthetic product Manufacturers
FSS	Frost-Sensitive Soil (Frostempfindlicher) Boden
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes (Federal Coordination Unit for Construction and Property)
IEA	International Energy Agency (Internationale Energie-Agentur)
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCI	Life Cycle Inventory (Sachbilanz)
NMVOG	Non-methane volatile organic compounds (Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
PE	Polyethylene (Polyethylen)
PET	Polyethylene terephthalate (Polyethylenterephthalat)
PP	Polypropylen