

~95% der Epoxidverbundstoffe landen auf Deponien

73% der Verbraucher sind bereit, einen Aufpreis für nachhaltige Materialien zu zahlen

41% der biobasierten Materialien stammen aus Biomasse-Abfällen

Umweltwirkungen von Verbundstoff-Zehenschutzkappen in Sicherheitsschuhen

Dieses Dokument bewertet Verbundstoff-Zehenschutzkappen nicht anhand ihrer biologischen Abbaubarkeit – die bei allen strukturellen Werkstoffen nur eingeschränkt gegeben ist –, sondern anhand von Kohlenstoffherkunft, Prozessenergiebedarf, Recyclingfähigkeit und regulatorischer Beständigkeit.

Die europäische Umweltpolitik strebt Klimaneutralität bis 2035 an und legt dabei den Schwerpunkt auf erneuerbare Energien, Abfallvermeidung, Recycling sowie den Einsatz nachhaltiger Materialien, unterstützt durch strenge Regulierungen und nationale Verpflichtungen zur Emissionsreduktion.

Konventionelle Zehenschutzkappen für Sicherheitsschuhe bestehen in der Regel aus glasfaserverstärktem Epoxidharz. Obwohl sie mechanisch leistungsfähig sind, sind diese epoxybasierenden Verbundstoffe nicht recycelbar, nicht abbaubar und mit hohem Energieaufwand sowie erheblichen Kohlendioxidemissionen über ihren gesamten Lebenszyklus verbunden.

Zur Überwindung dieser Einschränkungen wird Bio-Toe als nachhaltige Alternative eingeführt. Bio-Toe wird aus einer Polyamidformulierung mit 41 % biobasiertem Nylon aus nicht lebensmittelbasierter Biomasse hergestellt und ermöglicht eine geringere CO₂-Bilanz über den Lebenszyklus, mechanische Recyclingfähigkeit sowie das Potenzial für eine CO₂-negative Performance unter definierten Produktions- und Recyclingbedingungen.

Heute gängige epoxybasierte Verbundwerkstoffe umfassen:

- **Glasfaser**
- **Carbonfaser**

Innovative Materialien von Kessin:

- **Biobasierte Polymermischungen auf PA56-Basis**



BIO&TOE

Umweltherausforderungen epoxybasierter Verbundwerkstoffe

Probleme bei Recycling und Kreislaufwirtschaft

Epoxidharze, die in herkömmlichen glas- und carbonfaserverstärkten Verbundwerkstoffen eingesetzt werden, bilden nach dem Aushärten irreversible duroplastische Strukturen. Diese vernetzten Polymernetzwerke können im Gegensatz zu Thermoplasten weder aufgeschmolzen noch umgeformt werden. Der Großteil epoxybasierter Verbundwerkstoffe wird am Ende ihres Lebenszyklus deponiert oder verbrannt, da konventionelle Recyclingverfahren keine wirtschaftliche Rückgewinnung der Materialien ermöglichen.

Mechanisches Recycling (z. B. Zerkleinerung zu Füllstoffen) führt zu einer erheblichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, wodurch das recycelte Material nur einen begrenzten Wiederverwendungswert besitzt.

Chemische Recyclingverfahren befinden sich zwar in der Forschung, sind jedoch derzeit energieintensiv, kostenaufwendig und ökologisch wie industriell noch nicht breit etabliert.

Produktionsfußabdruck und VOC-Emissionen

Die Herstellung von Glasfasern und Epoxidharzen sind energieintensive Prozesse, die hohe Temperaturen und petrochemische Rohstoffe erfordern. Besonders die Harzproduktion kann flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Treibhausgase freisetzen.

Dies führt zu einer hohen kombinierten Umweltbelastung, wenn der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird – von der Materialproduktion bis zum Lebensende.

Glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe sind nicht biologisch abbaubar und können über Jahrzehnte oder Jahrhunderte auf Deponien verbleiben. Eine Trennung der Glasfasern vom Harz ist technisch möglich, aber kostspielig und energieaufwendig.

Umwelteigenschaften von biobasiertem PA56-Nylon

Biobasiertes PA56 enthält Kohlenstoff aus erneuerbaren Biomasserohstoffen in seinem Ausgangsmaterial. Das bedeutet, dass ein Teil des Kohlenstoff-Fußabdrucks des Polymers aus gebundenem atmosphärischem CO₂ stammt und nicht aus fossilen Brennstoffen – was die Treibhausgasemissionen von der Produktion bis zum Werkstor im Vergleich zu vollständig petrochemischen Polymeren reduziert.

Im Gegensatz zu duroplastischen Epoxidharzen können thermoplastische Polyamide wie PA56 am Lebensende erneut geschmolzen und umgeformt werden, wodurch Materialkreisläufe unterstützt werden, anstatt dass die Materialien entsorgt oder mechanisch zu neuen Produkten recycelt werden, ohne die Leistung so stark zu verschlechtern wie bei Epoxidverbundstoffen.

Dieses thermoplastische Verhalten verschafft PA56 einen deutlichen ökologischen Vorteil gegenüber Epoxidharzen, für die es derzeit keine praktikable industrielle Recyclingmethode gibt.

Untersuchungen zeigen, dass biobasierte Polyamidfasern (wie PA56) unter bestimmten Bedingungen eine bemerkenswerte biologische Abbaubarkeit aufweisen, während viele erdölbasierte Polymere in der Umwelt deutlich länger bestehen bleiben.

Table 1 – Tabelle 1 – Wiederverwertbarkeit von Epoxidharz-basierten Verbund-Zehenschutzkappen am Lebensende

Vergleich der Rückgewinnungswege von Epoxidmatrix und Fasern, Skalierbarkeit und industrieller Reifegrad

Methoden	Kann Epoxidharz zurückgewonnen werden?	Können Fasern zurückgewonnen werden?	Skalierbar?	Anmerkungen
Chemisch	X (Epoxid wird abgebaut)	✓ (Neusilierung erforderlich)	! (teuer, giftig)	Wird in Laboren/ Pilotanlagen verwendet
Thermisch	X (Epoxid wird verbrannt)	! (Fasern geschwächt)	✓ (industriell)	Wird in Zementöfen verwendet
Mechanische Mahlen	X (Epoxid geht verloren)	X (Fasern zerschreddert)	✓	

Tabelle 2 – Vergleich der Recyclingleistung und Umweltwirkung: Biobasiertes PA56 vs. Epoxidharz-Verbund-Zehenschutzkappen

Materialrückgewinnungsquote, Energiebedarf, Kosten, Qualitätserhalt und Kreislauffähigkeit

Kriterium	41 % Bio-PA56 / 59 % petrochemisches PA für Zehenkappen	Epoxidbasierte Duroplastverbundkappe
Form des Abfalls	Eine Polymerfamilie	Epoxidbasierte Duroplastverbundkappe
Primärer Recyclingweg	Wieder zerkleinern → aufschmelzen → neue Kappen spritzgießen (Kreislauf)	Vernetztes Epoxid + Glas-/ Kohlenstoffmatte
Typische Rückgewinnungsrate	80–90 % der Polymermasse zurück in gleichwertige Teile	Nur Fasern rückgewinnbar
Energiebedarf pro kg Rückgewonnenem	≈ 15 MJ (Aufschmelzen)	50–60 % der Fasermasse; 0 % der Epoxidmatrix
Qualitätsverlust nach 1 Zyklus	< 10 % in Izod-Schlagzähigkeit	35–55 MJ (Solvolyse / Pyrolyse)
Anzahl hochwertiger Kreisläufe	5–7× (Industriedaten für PA)	1× (Fasern müssen neu beschichtet werden)
Downcycling-Option	PA → Automobilclips, Kabelbinder	Gemahlene Epoxid → Füllstoff für Beton / Asphalt
Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen	Gering – Schmelzefiltration entfernt Pigmente	Hoch – Harz, Fasern, Metall müssen getrennt werden
Benötigte Infrastruktur	Standard-PA-Recyclinganlagen (weltweit vorhanden)	Spezialisierte Duroplastanlagen (< 10 global)
Kosten der Rückgewinnung	Ca. 0,3 € kg ⁻¹ (Compoundieren + Energie)	1,5–3 € kg ⁻¹ (Chemikalien + hohe Hitze)
Umweltgutschrift (GWP)	Ca. –1,8 kg CO ₂ -Äq. kg ⁻¹ (vs. Neu-PA)	Ca. –0,4 kg CO ₂ -Äq. kg ⁻¹ (nur Fasern)

Tabelle 3 – Funktionale und Nachhaltigkeitsvorteile von biobasiertem PA56 in Sicherheits-Zehenschutzhappen

Auswirkungen auf den Treibhausgas-Fußabdruck, den Energiebedarf der Verarbeitung, die Arbeitssicherheit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften

Vorteil der Bio-PA56-Zehenkappe	Warum es wichtig ist, selbst wenn die Deponielebensdauer gleich ist
Rund 40 % weniger fossilen Kohlenstoff im Granulat	Direkte Verringerung des Treibhausgas-Fußabdrucks des Harzes selbst
Erneuerbarer Rohstoff	Schützt die Marke vor Ölpreisschwankungen und Scope-3-Berichtspflichten
Spritzgusszyklus ca. 65 Sekunden vs. 30 Minuten Aushärtezeit bei Epoxid	9x niedrigerer Energiebedarf im Formschnitt; größter Beitrag zur Klimabilanzlücke
Wieder aufschmelzbar (thermoplastisch)	Mechanisches Recycling ist möglich; Epoxid ist irreversibel vernetzt
Keine Styrol-/Amin-VOCs während der Verarbeitung	Bessere Werte für Raumluftqualität und Arbeitsexposition
Erfüllt kommende Bioanteil-Vorgaben (EU, US-Bundesebene)	Macht das Produkt zukunftssicher gegen erweiterte Herstellerverantwortungsgebühren

Tabelle 4 – Indikative Primärenergieanforderung für Zehenschutzhappen-Materialien (Cradle-to-Gate)

Die Werte stellen typische Branchenbereiche für die Herstellung von Neumaterial dar; die tatsächlichen Werte hängen von Lieferant, geografischer Lage und Energiemix ab. Die Angaben dienen eher einem vergleichenden Screening als einer präzisen Produkt-LCA.

Materialkategorie	Typisches Material in Zehenschutzhappen	Primärenergiebedarf (MJ/kg)	Hauptenergietreiber	Hinweise für Schuhanwendung
Glasfaser	E-Glas + Epoxidharz	45–65 (Glasfaser) + 70–90 (Epoxidharz)	Faserschmelzen (~1500 °C), petrochemische Harzsynthese	Epoxidmatrix verhindert Kreislaufrecycling
Kohlenstofffaser	PAN-basierte CF + Epoxidharz	250–300 (Kohlenstofffaser) + 70–90 (Epoxidharz)	PAN-Stabilisierung & Karbonisierung	Höchster grauer Energiegehalt; begrenzte Wiederverwendung
Bio-basiert	PA56 (41% bio-basiert)	60–80	Fermentation + Polymerisation	Geringerer fossiler Energieeintrag; thermoplastische Rezyklierbarkeit

Tabelle 5 – Vergleich der Rückgewinnung

Kriterium	Epoxidharz- Verbundwerkstoff	Metalle	Bio-PA56
Kreislauf-Recycling	Nein	Selten	Ja
Mehrfachnutzung	Nein	Begrenzt	Ja (5–7×)
Infrastruktur	Spezialanlagen	Schwerindustrie	Bestehende PA-Anlagen
Werterhalt	Niedrig	Mittel	Hoch

Materialrückgewinnung und Kreislauffähigkeit

- **Biobasierte PA56-Zehenschutzkappen**

Biobasiertes PA56-Material ermöglicht ein mechanisches Recycling bei hoher Materialrückgewinnung und erreicht typischerweise >80 % der Polymermasse. Es unterstützt ein Multi-Loop-Recycling (5–7 Zyklen) mit nur begrenzter Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften.

Das Recycling ist wirtschaftlich rentabel (unter Verwendung standardisierter Polyamid-Recyclinganlagen, die weltweit weit verbreitet sind) und erhält gleichzeitig einen hohen Materialwert. Die recycelten Komponenten können wieder in Sicherheitsschuhen eingesetzt oder für andere industrielle Anwendungen „down-gecycelt“ werden.

- **Epoxidharz-basierte Verbund-Zehenschutzkappen**

Es können nur die Verstärkungsfasern teilweise zurückgewonnen werden, typischerweise nur einmal und mit erheblichem Festigkeitsverlust. Die Epoxidmatrix selbst ist nicht rückgewinnbar und wird beim Recycling zerstört.

Recyclingprozesse erfordern einen hohen Energieaufwand, spezialisierte Infrastruktur und den Umgang mit Chemikalien, was zu hohen Kosten und begrenzter Skalierbarkeit führt.

Die Gesamtkreislauffähigkeit ist gering, da der Großteil des Materials letztlich entsorgt wird.

- **Gesundheits-, Sicherheits- und regulatorische Aspekte**

Das größte berufsbedingte Risiko bei Epoxidharz-basierten Systemen besteht während der Herstellung und Reparatur, was den Einsatz von strenger persönlicher Schutzausrüstung (PSA), Belüftung und Expositionskontrollen erforderlich macht.

Ein Großteil der Produktion von Epoxid-Zehenschutzkappen erfolgt außerhalb der EU, wo die Durchsetzung von Vorschriften und Arbeitsschutzstandards unterschiedlich ist, die Produkte jedoch weiterhin den EU-Marktbeschränkungen unterliegen. Laufende regulatorische Entwicklungen in der EU könnten bestimmte Epoxidchemien weiter einschränken und damit das langfristige Risiko für Epoxid-basierte Schuhkomponenten erhöhen.

Wesentliche Ergebnisse und Beobachtungen

- **Markt- und regulatorischer Kontext**

Etwa 73 % der Verbraucher sind bereit, einen Aufpreis für nachhaltige Materialien zu zahlen, was auf eine zunehmende Marktnachfrage nach sichereren, umweltfreundlicheren Schuhlösungen hinweist.

Der EU-Regulierungsfahrplan (ab 2026) verschärft weiterhin die Beschränkungen für gefährliche Stoffe, einschließlich bestimmter Epoxidhärter und CMR-eingestufte Chemikalien, wodurch das langfristige Compliance-Risiko für Epoxid-basierte Systeme steigt.

- **Einschränkungen am Lebensende von Epoxidharz-basierten Verbundwerkstoffen**

Etwa 95 % der Epoxidharz-Verbundprodukte werden derzeit auf Deponien entsorgt oder verbrannt, da die Vernetzung der Duroplast-Matrix irreversibel ist.

Fortgeschrittene Recyclingverfahren existieren zwar auf Labor- oder Pilotmaßstab, bleiben jedoch energieintensiv, teuer und wirtschaftlich für die Schuhindustrie nicht praktikabel. In der Praxis hat die Rückgewinnung von Epoxid-basierten Komponenten (Kohlenstofffasern, Glasfasern) auf industrieller Ebene nur minimale positive Umweltauswirkungen.

- **Systembedingte Komplexität von Epoxidharz-Zehenschutzkappen**

Epoxidharze werden typischerweise in Kombination mit Glasfaser- oder Kohlenstofffaserverstärkungen eingesetzt, wodurch mehrschichtige Materialstrukturen entstehen. Selbst wenn „Bio-Epoxid“-Varianten verwendet werden, verhindert die Verbundstruktur selbst eine effiziente Trennung und Rückgewinnung, wodurch ein Closed-Loop-Recycling für Schuhanwendungen unpraktikabel ist.

- **Umweltvorteil von biobasierten PA56-Zehenschutzkappen**

Biobasierte PA56-Zehenschutzkappen bestehen zu 41 % aus Polymeranteilen aus Biomasse-Abfallstoffen, wodurch die Abhängigkeit von fossilem Kohlenstoff verringert wird. Im Gegensatz zu Epoxidverbundstoffen bestehen PA56-Zehenschutzkappen aus einer einzigen Familie thermoplastischer Polymere, was die Demontage- und Recyclingkomplexität erheblich reduziert.

Die bestehende Polyamid-Recyclinginfrastruktur ermöglicht ein praktisches Closed-Loop-Recycling innerhalb der Schuhindustrie und angrenzender Branchen.

- **Erläuterung zur biologischen Abbaubarkeit**

Biobasiertes PA56 ist unter realen Entsorgungsbedingungen nicht biologisch abbaubar.

Der Umweltvorteil gegenüber Epoxidverbundstoffen liegt daher nicht in der Abbaubarkeit auf Deponien, sondern in der Kohlenstoffherkunft, dem Energiebedarf der Verarbeitung, der Arbeitssicherheit, der Rückgewinnbarkeit und der regulatorischen Widerstandsfähigkeit.

Gesamtbewertung und zentrale Erkenntnisse

Bei einer Bewertung hinsichtlich Kohlenstoff-Fußabdruck, Energiebedarf der Verarbeitung, Arbeitssicherheit, regulatorischer Widerstandsfähigkeit, mechanischer Leistung und Rückgewinnung am Lebensende bieten biobasierte PA56-Zehenschutzkappen das derzeit günstigste Gleichgewicht unter kommerziell erhältlichen Zehenschutzmaterialien, ohne die zertifizierte Sicherheitsleistung zu beeinträchtigen.

Optimieren biobasierte PA56-Zehenschutzkappen das Verhältnis von Schutz zu Umweltwirkung, indem sie zertifizierte mechanische Leistung mit reduziertem fossilen Kohlenstoffanteil, geringerem Herstellungsenergiebedarf, verbesserter Arbeitssicherheit während der Verarbeitung und praktikabler Closed-Loop-Recyclingfähigkeit kombinieren – Vorteile, die weder Metall- noch Epoxidharz-Verbundsysteme gleichzeitig bieten.



<https://www.kessin.eu>

contact@kessin.eu

+49 (0) 151 262 35 428

Berlin, Germany, 11 Dezember 2025

Sources:

<https://eureka.patsnap.com/report-how-recyclable-epoxy-composites-are-redefining-material-science>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10889868.2025.2565253?af=R>

<https://www.vertecbiosolvents.com/traditional-vs-bio-based-resin-comparing-the-alternatives>

https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/html/helepubl_eng.htm

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.4c03321>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09240-x>