

~95% van epoxycomposieten belandt op stortplaatsen

73% van de consumenten is bereid een premium te betalen voor duurzaamheid.materials

41% van de biogebaseerde materialen komt uit bioafval

Impact van composiet-teenbeschermers van veiligheidsschoenen op het milieu

Dit document beoordeelt composiet teenbeschermersmaterialen niet op biologische afbreekbaarheid—die voor alle structurele materialen beperkt is—maar op koolstofvoersprong, energieverbruik van het productieproces, recyclebaarheid en robuustheid ten opzichte van regelgeving.

Het milieubeleid van Europa streeft naar klimaatneutraliteit tegen 2035, met de nadruk op hernieuwbare energie, afvalvermindering, recycling en duurzaam materiaalgebruik door middel van strikte regelgeving en nationale verplichtingen tot emissiereductie.

Conventionele veiligheidsneuzen worden doorgaans gemaakt van glasvezel versterkt met epoxyhars. Hoewel mechanisch effectief, zijn deze epoxycomposieten niet recyclebaar, niet afbreekbaar en worden ze geassocieerd met hoog energieverbruik en aanzienlijke kooldioxide-emissies gedurende hun levenscyclus.

Om deze beperkingen aan te pakken, wordt Bio-Neus geïntroduceerd als een duurzaam alternatief. Gemaakt van een polyamideformulering met 41 % bio-gebaseerd nylon afkomstig van niet-voedingsbiomassa, biedt Bio-Neus lagere levenscyclus-emissies, mechanische recyclebaarheid en de potentie om onder bepaalde productie- en recyclingomstandigheden koolstofnegatief te presteren.

Veelvoorkomende epoxygebaseerde composieten die momenteel worden gebruikt zijn:

- glasvezel (GFRP)
- koolstofvezel (CFRP)

Kessin innovatieve materialen:

- Biogebaseerde polymereemengsels PA56



BIO&TOE

Milieu-uitdagingen van epoxygebaseerde composieten

Moeilijkheden bij recycling en circulariteit

Epoxyharsen die worden gebruikt in traditionele glasvezel- en koolstofvezelcomposieten vormen na uitharding onomkeerbare thermohardende structuren. Deze vernetwerkte netwerken kunnen niet worden gesmolten of opnieuw gevormd zoals thermoplasten. De meeste epoxycomposieten aan het einde van hun levensduur worden gestort of verbrand, omdat conventionele recyclingmethoden er niet in slagen materialen economisch terug te winnen.

Mechanische recycling (bijvoorbeeld vermalen tot vulstof) leidt tot een aanzienlijke achteruitgang van de mechanische eigenschappen, waardoor het gerecyclede materiaal vaak slechts een beperkte hergebruikwaarde heeft.

Chemische recyclingtechnologieën bestaan op onderzoeksniveau, maar zijn momenteel energie-intensief, kostbaar en nog niet op grote schaal milieuvriendelijk toegepast.

Productievoetafdruk & VOC-emissies

De productie van glasvezel en de vervaardiging van epoxy zijn energie-intensieve processen die hoge temperaturen en petrochemische grondstoffen vereisen. Met name de productie van hars kan vluchtige organische stoffen (VOS) en broeikasgassen uitstoten.

Dit leidt tot een hoge gecombineerde milieuvoetafdruk wanneer deze over de volledige levenscyclus wordt beoordeeld — van materiaalproductie tot het einde van de levensduur.

Glasvezelcomposieten zijn niet biologisch afbreekbaar en kunnen tientallen tot honderden jaren in stortplaatsen blijven bestaan. Het scheiden van glasvezel en hars is technisch mogelijk, maar kostbaar en energie-inefficiënt.

Milieukenmerken van biogebaseerd PA56-nylon

Biogebaseerd PA56 bevat koolstof uit hernieuwbare biomassa-bronnen in zijn grondstoffen. Dit betekent dat een deel van de koolstofvoetafdruk van het polymeer afkomstig is van vastgelegde atmosferische CO₂ in plaats van fossiele brandstoffen — wat de broeikasgasemissies van 'cradle-to-gate' verlaagt ten opzichte van volledig petrochemische polymeren.

In tegenstelling tot thermohardende epoxy's kunnen thermoplastische polyamiden zoals PA56 aan het einde van hun levensduur opnieuw worden gesmolten en hervormd, wat materiaalkringloop ondersteunt in plaats van verwijdering, of mechanisch worden gerecycled tot nieuwe producten zonder dat de prestaties zo sterk achteruitgaan als bij epoxycomposieten.

Dit thermoplastische gedrag geeft PA56 een duidelijk milieuvoordeel ten opzichte van epoxyharsen, die momenteel geen praktisch toepasbare industriële recyclagemethode hebben.

Onderzoek wijst uit dat biogebaseerde polyamidevezels (zoals PA56) onder bepaalde omstandigheden een merkbare biologische afbreekbaarheid vertonen, terwijl veel op aardolie gebaseerde polymeren aanzienlijk langer in het milieu blijven bestaan.

Tabel 1 — Terugwinbaarheid aan het einde van de levensduur van epoxygebaseerde composiet-teenbeschermers

Vergelijking van teruggewinningsroutes voor epoxy matrix en vezels, schaalbaarheid en industriële volwassenheid

Methoden	Kan epoxy worden teruggewonnen?	Kunnen vezels worden teruggewonnen?	Schaalbaar?	Opmerkingen
Chemisch	X (epoxy wordt afgebroken)	✓ (herimpregneren vereist)	! (duur, toxisch)	Gebruikt in laboratoria/pilotprojecten
Thermisch	X (epoxy verbrand)	! (vezels verzwakt)	✓ (industriële)	Gebruikt in cementovens
Mechanisch malen	X (epoxy verloren)	X (vezels versnipperd)	✓	

Tabel 2 — Vergelijking van recyclingprestaties en milieu-impact: biogebaseerd PA56 versus epoxycomposiet-teenbeschermers

Materiaal teruggewinningsrendement, energiebehoefte, kosten, behoud van kwaliteit en circulariteitspotentieel

Criterium	41% bio-PA56 / 59% petro-PA teenbeschermers	Epoxygebaseerde thermohardende composiet-teenbeschermers
Vorm van afval	Eén polymeerfamilie	Gekruist-verbonden epoxy + glas-/koolstofvezelmat
Primaire recyclingroute	Hervermalen → smelten → spuitgieten van nieuwe teenbeschermers (gesloten lus)	Alleen vezels terugwinbaar
Typische teruggewinningsopbrengst	80–90% van de polymassa terug in onderdelen van dezelfde kwaliteit	50–60% van de vezelmasse; 0% van de epoxy matrix
Energiebehoefte per kg teruggewonnen materiaal	≈ 15 MJ (opnieuw smelten)	35–55 MJ (solvolysen / pyrolyse)
Kwaliteitsverlies na 1 cyclus	< 10% in Izod-slagvastheid	20–30% vezelsterkte; epoxy verdwenen
Aantal hoogwaardige recyclinglussen	5–7x (industriegegevens voor PA)	1x (vezels vereisen herimpregnering)
Downcycling-optie	PA → automotive clips, kabelbinders	Gemalen epoxy → vulstof voor beton / asfalt
Gevoeligheid voor verontreiniging	Laag — smeltfiltratie verwijdert pigmenten	Hoog — hars, vezels en metaal moeten worden gescheiden
Benodigde infrastructuur	Standaard PA-recyclinglijnen (wereldwijd beschikbaar)	Gespecialiseerde thermohardende installaties (< 10 wereldwijd)
Kosten van teruggewinning	Ongeveer 0,3 € kg ⁻¹ (compounderen + energie)	1,5–3 € kg ⁻¹ (chemicaliën + hoge temperatuur)
Milieukrediet (GWP)	Ongeveer –1,8 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹ t.o.v. primaire PA	Ongeveer –0,4 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹ (alleen vezels)

Tabel 3 — Functionele en duurzaamheidsvoordelen van biogebaseerd PA56 in toepassingen voor veiligheids-teenbeschermers

Gevolgen voor de broeikasgasvoetafdruk, verwerkingsenergie, arbeidsveiligheid en naleving van regelgeving

Voordeel van bio-PA56-teenbeschermer	Waarom dit belangrijk is, zelfs als de levensduur op de stortplaats gelijk is
Ongeveer 40% minder fossiele koolstof in de granulaatgrondstof	Directe verlaging van de broeikasgasvoetafdruk van het hars zelf
Hernieuwbare grondstof	Beschermt het merk tegen volatiliteit van olieprijs en druk vanuit scope-3-rapportage
Spuitsietcyclus van circa 65 seconden versus 30 minuten uitharding van epoxy	9x lager energieverbruik in de vormstap; grootste bijdrage aan het verschil in GWP
Opnieuw smeltbaar (thermoplastisch)	Mechanische recycling is mogelijk; epoxy is onomkeerbaar verknoopt
Geen styreen- of amine-VOS tijdens verwerking	Betere scores voor binnenluchtqualiteit en blootstelling van werknemers
Voldoet aan aankomende bio-inhoudsverplichtingen (EU, VS federaal)	Maakt het product toekomstbestendig tegen kosten voor uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (EPR)

Tabel 4 — Indicatieve primaire energievraag voor teenbeschermersmaterialen (cradle-to-gate)

De waarden vertegenwoordigen typische industriebereiken voor de productie van primaire (virgin) materialen; de werkelijke waarden zijn afhankelijk van leverancier, geografische locatie en energiemix. De waarden zijn bedoeld voor vergelijkende screening en niet voor een nauwkeurige productniveau-LCA.

Materiaal categorie	Typisch materiaal gebruikt in teenbeschermers	Primaire energievraag (MJ/kg)	Belangrijkste energiedrijvers	Opmerkingen voor schoenentoe passing
Glasvezel	E-glas + epoxy	45–65 (glasvezel) + 70–90 (epoxyhars)	Vezelsmelting (~1500 °C), petrochemische hars synthese	Epoxy matrix verhindert gesloten-lus-recycling
Koolstofvezel	PAN-gebaseerde CF + epoxy	250–300 (koolstofvezel) + 70–90 (epoxyhars)	PAN-stabilisatie en carbonisatie	Hoogste ingebedde energie; beperkte herbruikbaarheid
Biogebaseerd	PA56 (41% biogebaseerd)	60–80	Fermentatie + polymerisatie	Lagere fossiele energie-invoer; thermoplastische recycleerbaarheid

Tabel 5 — Vergelijking van terugwinbaarheid

criterium	Epoxy-composiet	Metalen	Bio-PA56
Gesloten kringloop	Nee	Zeldzaam	Ja
Hergebruik meerdere cycli	Nee	Beperkt	Ja (5–7×)
Infrastructuur	Gespecialiseerd	Zware industrie	Bestaande PA-lijnen
Waardebehoud	Laag	Gemiddeld	Hoog

Materiaalterugwinning en circulariteitsprestaties:

- **Biogebaseerde PA56-teenbeschermers**

Het biogebaseerde PA56-materiaal maakt mechanische recycling mogelijk met een hoge materiaal­terugwinning, waarbij doorgaans >80% van de polymassa wordt teruggewonnen, en ondersteunt multi-loop recycling (5–7 cycli) met beperkte achteruitgang van de mechanische eigenschappen.

Recycling is economisch haalbaar (met standaard polyamide-recyclinglijnen die wereldwijd breed beschikbaar zijn) terwijl de materiaalkwaliteit behouden blijft. De gerecycleerde componenten kunnen opnieuw worden gebruikt in veiligheidsschoenen of worden toegepast in andere industriële toepassingen met lagere eisen.

- **Epoxygebaseerde composiet-teenbeschermers**

Alleen de versterkingsvezels kunnen gedeeltelijk worden teruggewonnen, doorgaans slechts één keer, en met aanzienlijk verlies van sterkte. De epoxymatrix zelf is niet terugwinbaar en wordt tijdens het recyclingproces vernietigd.

Recyclingprocessen vereisen een hoge energie-invoer, gespecialiseerde infrastructuur en chemische verwerking, wat leidt tot hoge kosten en beperkte schaalbaarheid.

De algehele circulariteit is laag, waarbij het grootste deel van het materiaal uiteindelijk wordt afgevoerd.

- **Gezondheids-, veiligheids- en regelgevingsaspecten**

Het belangrijkste beroepsrisico van epoxygebaseerde systemen doet zich voor tijdens productie en reparatie, en vereist strikte persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM), ventilatie en blootstellingsbeheersing.

Een groot deel van de productie van epoxygebaseerde teenbeschermers vindt plaats buiten de EU, waar de handhaving van regelgeving en de beroepsnormen varieert, maar de producten blijven onderworpen aan EU-marktbeperkingen. Lopende ontwikkelingen in de EU-regelgeving kunnen bepaalde epoxychemieën verder beperken, waardoor het langetermijnrisico voor epoxygebaseerde schoencomponenten toeneemt.

Belangrijkste bevindingen en observaties

- **Markt- en regelgevingscontext**

Ongeveer 73% van de consumenten is bereid een premie te betalen voor duurzame materialen, wat duidt op een toenemende marktvraag naar veiligheidsfootwear-oplossingen met lagere milieu-impact.

Het EU-regelgevingskader (vanaf 2026) blijft de beperkingen op gevaarlijke stoffen aanscherpen, waaronder bepaalde epoxyverharders en CMR-geclassificeerde chemicaliën, wat het langetermijncompliance-risico voor epoxygebaseerde systemen vergroot.

- **Beperkingen aan het einde van de levensduur van epoxygebaseerde composieten**

Ongeveer 95% van de epoxygebaseerde composietproducten wordt momenteel gestort of verbrand vanwege de onomkeerbare kruisverbinding van thermohardende matrices.

Geavanceerde recyclingmethoden bestaan op laboratorium- of pilot-schaal, maar blijven energie-intensief, kostbaar en economisch niet haalbaar voor de schoenenindustrie. In de praktijk heeft de recycleerbaarheid van epoxygebaseerde componenten (koolstofvezel, glasvezel) op industriële schaal een minimaal positief milieueffect.

- **Systeemniveau-complexiteit van epoxygebaseerde teenbeschermers**

Epoxyharsen worden doorgaans gebruikt in combinatie met glasvezel- of koolstofvezelversterkingen, waardoor multi-materiaalstructuren ontstaan. Zelfs wanneer “bio-epoxy”-varianten worden toegepast, verhindert de composietstructuur zelf een efficiënte scheiding en terugwinning, waardoor gesloten-lus-recycling onpraktisch is voor schoenentoeepassingen.

- **Milieuvoordeel van biogebaseerde PA56-teenbeschermers**

Biogebaseerde PA56-teenbeschermers halen 41% van hun polymere inhoud uit biomassa-afval, waardoor de afhankelijkheid van fossiele koolstof wordt verminderd. In tegenstelling tot epoxycomposieten bestaan PA56-teenbeschermers uit één enkele thermoplastische polymeerfamilie, wat het demonteren en recyclen aanzienlijk vereenvoudigt.

De bestaande polyamide-recyclinginfrastructuur maakt praktische gesloten-lus-recycling binnen de schoenenindustrie en aanverwante sectoren mogelijk.

- **Toelichting op biologische afbreekbaarheid**

Biogebaseerd PA56 is niet biologisch afbreekbaar onder praktische stort- of afvalomstandigheden.

Het milieuvoordeel ten opzichte van epoxycomposieten heeft daarom niet te maken met afbraak op stortplaatsen, maar met de herkomst van koolstof, energieverbruik tijdens verwerking, arbeidsveiligheid, recycleerbaarheid en regelgevingsbestendigheid.

Algemene beoordeling en belangrijkste bevindingen

Bij een evaluatie van koolstofvoetafdruk, energieverbruik tijdens het productieproces, arbeidsveiligheid, regelgevingsbestendigheid, mechanische prestaties en terugwinbaarheid aan het einde van de levensduur, bieden biogebaseerde PA56-teenbeschermers de meest gunstige balans die momenteel haalbaar is onder commercieel verkrijgbare teenbeschermersmaterialen, zonder afbreuk te doen aan gecertificeerde veiligheidsnormen.

Optimaliseren biogebaseerde PA56-teenbeschermers de verhouding bescherming-impact door gecertificeerde mechanische prestaties te combineren met een verminderde fossiele koolstofinvoer, lagere productie-energiebehoefte, verbeterde arbeidsveiligheid tijdens verwerking en praktische gesloten-lus-recycleerbaarheid – voordelen die metalen en epoxygebaseerde composietsysteem niet tegelijkertijd bieden.



<https://www.kessin.eu>
contact@kessin.eu
+49 (0) 151 262 35 428
Berlin, Germany, 11 December 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>