

Ca. **95%** af epoxykompositter ender på lossepladser.

73% af forbrugerne er villige til at betale en merpris for bæredygtige materialer.

41% af de biobaserede materialer stammer fra bioaffald

Komposit tåhættes påvirkning på miljøet fra sikkerhedssko

Dette dokument evaluerer komposit tåhættematerialer ikke ud fra bionedbrydelighed – som er begrænset for alle konstruktionsmaterialer – men ud fra kulstofoprindelse, procesenergi, genanvendelighed og lovgivningsmæssig robusthed.

Europas miljøpolitik sigter mod klimaneutralitet i 2035 med vægt på vedvarende energi, affaldsreduktion, genanvendelse og bæredygtig materialeanvendelse gennem strenge regler og nationale forpligtelser til reduktion af emissioner.

Konventionelle sikkerhedståhætter er typisk fremstillet af glasfiber forstærket med epoxyharpiks. Selvom de er mekanisk effektive, er disse epoxybaserede kompositter ikke-genanvendelige, ikke-nedbrydelige og forbundet med højt energiforbrug og betydelige kuldioxidemissioner gennem hele deres livscyklus.

For at imødegå disse begrænsninger introduceres **Bio-Toe** som et bæredygtigt alternativ. Fremstillet af en polyamidformulering, der indeholder 41 % biobaseret nylon udvundet af ikke-fødevarer baseret biomasse, tilbyder Bio-Toe lavere livscyklus-kulstofemissioner, mekanisk genanvendelighed og potentialet til at opnå kulstofnegativ ydeevne under definerede produktions- og genanvendelsesbetingelser.

Almindelige epoxybaserede kompositter, der anvendes i dag, omfatter:

- glasfiber
- carbonfiber

Kessin innovative materialer:

- Biobaserede polymerblandinger PA56



BIO-TOE

Miljømæssige udfordringer ved epoxybaserede kompositter

Vanskeligheder ved genanvendelse og cirkularitet

Epoxyharpikser, der anvendes i traditionelle glasfiber- og carbonfiberkompositter, danner irreversible hærdeplaststrukturer, når de først er hærdede. Disse tværbundne netværk kan ikke smeltes eller omformes som termoplaster. De fleste epoxykompositter, der er nået til endt levetid, ender på lossepladser eller bliver forbrændt, fordi konventionelle genanvendelsesmetoder ikke formår at genvinde materialerne på en økonomisk måde.

Mekanisk genanvendelse (f.eks. formaling til fyldmateriale) forringer de mekaniske egenskaber betydeligt, hvilket betyder, at det genanvendte materiale ofte har begrænset genbrugsværdi.

Der findes kemiske genanvendelsesteknologier på forskningsniveau, men de er i øjeblikket energikrævende, dyre og ikke miljømæssigt udbredt.

Produktionsaftryk og VOC-emissioner

Produktionen af glasfiber og fremstilling af epoxy er energikrævende processer, der involverer høj varme og petrokemiske råmaterialer. Især harpiksproduktionen kan afgive flygtige organiske forbindelser (VOC'er) og drivhusgasser.

Dette bidrager til et højt samlet miljøaftryk, når det vurderes over hele livscyklussen — fra materialeproduktion til endt levetid.

Glasfiberkompositter er ikke bionedbrydelige og kan forblive på lossepladser i årtier eller århundreder. Adskillelse af glasfiber fra harpiks er teknisk mulig, men dyr og energiineffektiv.

Miljømæssige egenskaber ved biobaseret PA56-nylon

Biobaseret PA56 indeholder kulstof fra vedvarende biomassekilder i sit råmateriale. Det betyder, at en del af polymerens kulstofaftryk stammer fra bundet atmosfærisk CO₂ frem for fra fossile brændstoffer — hvilket reducerer drivhusgasemissionerne fra vugge til port i forhold til fuldt petrokemiske polymerer.

I modsætning til hærdeplast som epoxy kan termoplastiske polyamider som PA56 smeltes om og omformes ved endt levetid, hvilket understøtter materialecirkularitet frem for bortskaffelse, og de kan mekanisk genanvendes til nye produkter uden at forringe ydeevnen lige så alvorligt som epoxykompositter.

Denne termoplastiske adfærd giver PA56 en tydelig miljømæssig fordel sammenlignet med epoxyharpikser, som i dag mangler en praktisk industriel genanvendelsesmetode.

Forskning indikerer, at biobaserede polyamidfibre (såsom PA56) viser bemærkelsesværdig bionedbrydelighed under visse betingelser, hvorimod mange petroleumbaserede polymerer forbliver meget længere i miljøet.

Tabel 1 — Genanvendelighed ved endt levetid for epoxybaserede komposit-tåhætter
Sammenligning af epoxy-matrix og fibergenvindingsruter, skalerbarhed og industriel modenhed

Metode	Kan den genvinde epoxy?	Kan den genvinde fibre?	Skalerbar?	Bemærkninger
Kemisk	✗ (epoxy nedbrydes)	✓ (behov for tilpasning)	! (dyrt, giftigt)	Anvendes i laboratorier/pilotskala
Termisk	✗ (epoxy brændes)	! (fibre svækkes)	✓ (industriel)	Anvendes i cementovne
Mekanisk formaling	✗ (epoxy tabes)	✗ (fibre makuleres)	✓	

Tabel 2 — Sammenligning af genanvendelsespræstation og miljøpåvirkning: Biobaseret PA56 vs epoxybaserede komposit-tåhætter

Materiale-genvindingsudbytte, energibehov, omkostninger, bibeholdelse af kvalitet og cirkularitetspotentiale

Kriterium	41 % bio-PA56 / 59 % petro-PA hætte	Epoxybaseret hærdeplast-komposithætte
Affaldstype	Én polymerfamilie	Tværbundet epoxy + glas-/carbonmåtte
Primær genanvendelsesrute	Opmaling → smeltning → sprøjtestøbning af nye hætter (lukket kredsløb)	Kun fibre kan genvindes
Typisk genvindingsudbytte	80–90 % af polymermassen tilbage til dele af samme kvalitet	50–60 % af fibermassen; 0 % af epoxy-matrixen
Energibehov pr. kg genvundet materiale	Ca. 15 MJ (omsmeltning)	35–55 MJ (solvolyse / pyrolyse)
Kvalitetstab efter 1 cyklus	< 10 % i Izod-slagstyrke	20–30 % fiberstyrke; epoxy væk
Antal højværdi-cykler	5–7× (industridata for PA)	1× (fibre kræver tilpasning)
Nedgraderingsmulighed	PA → bildetal, kabelbindere	Malet epoxy → fyldstof til beton/asfalt
Følsomhed over for forurening	Lav – smeltfiltrering fjerner pigmenter	Høj – skal adskille harpiks, fiber, metal
Nødvendig infrastruktur	Standard PA-genanvendelseslinjer (findes globalt)	Specialiseret hærdeplatanlæg (< 10 globalt)
Omkostning til genvinding	Ca. 0,3 € kg ⁻¹ (kompounding + energi)	1,5–3 € kg ⁻¹ (kemikalier + høj varme)
Miljømæssig kredit (GWP)	Ca. –1,8 kg CO ₂ -e kg ⁻¹ sammenlignet med jomfruelig PA	Ca. –0,4 kg CO ₂ -e kg ⁻¹ (kun fibre)

Tabel 3 — Funktionelle og bæredygtighedsmæssige fordele ved biobaseret PA56 i sikkerhedståhætteanvendelser

Konsekvenser for drivhusgasaftryk, procesenergi, arbejdssikkerhed og lovgivningsmæssig overholdelse

Fordel ved bio-PA56 tåhætte	Hvorfor det betyder noget, selvom lossepladslevetiden er den samme
Omkring 40 % mindre fossil kulstof i granulatet	Direkte reduktion af drivhusgasaftrykket fra selve harpiksen
Vedvarende råmateriale	Beskytter brandet mod olieprisvolatilitet og scope-3-rapporteringspres
Sprøjttestøbningscyklus på ca. 65 sekunder vs. 30 minutters epoxyhærdning	9x lavere energi i formgivningstrinnet; største bidrager til GWP-forskellen
Omsmeltelig (termoplast)	Mekanisk genanvendelse er mulig; epoxy er irreversibelt tværbundet
Ingen styren-/amin-VOC'er under forarbejdning	Bedre indeklima- og arbejdereksponeerings scorerer
Opfylder kommende krav til bioindhold (EU, USA føderalt)	Fremtidssikrer produktet mod udvidet producentansvarsafgifter

Tabel 4 — Indikativt primærenergibehov for tåhættematerialer (vugge-til-port)

Værdierne repræsenterer typiske brancheintervaller for produktion af jomfruelige materialer; faktiske værdier afhænger af leverandør, geografi og energimix. Værdierne er beregnet til sammenlignende screening frem for præcis produktniveau-LCA.

Materialekategori	Typisk materiale anvendt i tåhætter	Primærenergibehov (MJ/kg)	Vigtigste energidrivere	Bemærkninger for fødtøjsanvendelse
Glasfiber	E-glas + epoxy	45–65 (glasfiber) + 70–90 (epoxyharpiks)	Fibersmeltning (~1500 °C), petrokemisk harpikssyntese	Epoxy-matrix forhindrer lukket kredsløbsgenanvendelse
Carbonfiber	PAN-baseret CF + epoxy	250–300 (carbonfiber) + 70–90 (epoxyharpiks)	PAN-stabilisering & karbonisering	Højeste indlejrede energi; begrænset genbrug
Biobaseret	PA56 (41 % biobaseret)	60–80	Fermentering + polymerisation	Lavere fossil energiinput; termoplastisk genanvendelighed

Tabel 5 – Sammenligning af genanvendelighed

Kriterie	Epoxykomposit	Metaller	Bio-PA56
Lukket kredsløbsgenanvendelse	Nej	Sjældent	Ja
Multi-cyklus genbrug	Nej	Begrænset	Ja (5–7x)
Infrastruktur	Specialiseret	Tung industri	Eksisterende PA-linjer
Værdibevarelse	Lav	Mellem	Høj

Materialegenanvendelighed og cirkularitetspræstation:

- **Biobaserede PA56 tåhætter**

Biobaseret PA56-materiale muliggør mekanisk genanvendelse med høj materialebevarelse, typisk med genvinding af >80 % af polymermassen, og understøtter multi-loop genanvendelse (5–7 cyklusser) med begrænset forringelse af mekaniske egenskaber.

Genanvendelse er økonomisk levedygtig (ved brug af standard polyamid-genanvendelseslinjer, der er bredt tilgængelige globalt) samtidig med at høj materialeværdi bevares. De genanvendte komponenter kan genbruges i sikkerhedsfodtøj eller nedgraderes til andre industrielle anvendelser.

- **Epoxybaserede komposit-tåhætter**

Kun forstærkningsfibre kan delvist genvindes, typisk én gang, og med betydeligt styrketab. Selve epoxy-matrixen er ikke genvindelig og ødelægges under genanvendelse.

Genanvendelsesprocesserne kræver højt energiforbrug, specialiseret infrastruktur og kemikaliehåndtering, hvilket resulterer i høje omkostninger og begrænset skalerbarhed.

Den samlede cirkularitet er lav, da det meste materiale ender med at blive bortskaffet.

- **Sundheds-, sikkerheds- og regulatoriske overvejelser**

Den primære erhvervsmæssige risiko ved epoxybaserede systemer opstår under fremstilling og reparation, hvilket kræver strengt personligt beskyttelsesudstyr, ventilation og eksponeringskontrol.

Meget af produktionen af epoxybaserede tåhætter finder sted uden for EU, hvor reguleringshåndhævelsen og erhvervsmæssige standarder varierer, men produkterne er stadig underlagt EU's markedsrestriktioner. Igangværende EU-reguleringer kan yderligere begrænse visse epoxy-kemikalier, hvilket øger den langsigtede risiko for epoxybaserede fodtøjskomponenter.

Vigtige resultater og observationer

- **Markeds- og reguleringsmæssig kontekst**

Cirka 73 % af forbrugerne er villige til at betale en merpris for bæredygtige materialer, hvilket indikerer et stigende markedstræk for sikkerhedsfodtøj med lavere miljøpåvirkning.

EU's lovgivningsmæssige køreplan (fra 2026 og frem) strammer fortsat restriktionerne for farlige stoffer, herunder visse epoxyhærdere og CMR-klassificerede kemikalier, hvilket øger den langsigtede overholdelsesrisiko for epoxybaserede systemer.

- **Begrænsninger for epoxybaserede kompositter ved endt levetid**

Omkring 95 % af alle epoxybaserede kompositprodukter ender i dag på lossepladser eller bliver forbrændt på grund af irreversible tværbindinger i hærdeplastmatricer.

Avancerede genanvendelsesmetoder findes på laboratorie- eller pilotskala, men forbliver energikrævende, dyre og økonomisk ulevedygtige for fodtøjsindustrien. I praksis har genanvendeligheden af epoxybaserede komponenter (carbonfiber, glasfiber) minimal positiv miljøpåvirkning i industriel skala.

- **Systemniveauets kompleksitet ved epoxybaserede tåhætter**

Epoxyharpikser anvendes typisk i kombination med glasfiber- eller carbonfiberarmeringer, hvilket skaber flermaterialestrukturer. Selv når der anvendes "bio-epoxy"-varianter, forhindrer selve kompositstrukturen effektiv adskillelse og genvinding, hvilket gør lukket kredsløbsgenanvendelse upraktisk for fodtøjsanvendelser.

- **Miljømæssig fordel ved biobaserede PA56 tåhætter**

Biobaserede PA56 tåhætter henter 41 % af polymerindholdet fra biomasseaffald som råmateriale, hvilket reducerer afhængigheden af fossilt kulstof, og i modsætning til epoxykompositter består PA56 tåhætter af en enkelt termoplastisk polymerfamilie, hvilket markant reducerer kompleksiteten ved demontering og genanvendelse.

Eksisterende polyamid-genanvendelsesinfrastruktur muliggør praktisk lukket kredsløbsgenanvendelse inden for fodtøjs- og tilstødende industrier.

- **Præcisering vedrørende bionedbrydelighed**

Biobaseret PA56 er ikke bionedbrydeligt under reelle bortskaffelsesforhold.

Miljøfordelen i forhold til epoxykompositter handler derfor ikke om nedbrydning på lossepladser, men om kulstofoprindelse, procesenergi, arbejdssikkerhed, genanvendelighed og lovgivningsmæssig robusthed.

Samlet vurdering og vigtigste resultater

Når de vurderes på tværs af kulstofaftryk, procesenergi, arbejdssikkerhed, lovgivningsmæssig robusthed, mekanisk ydeevne og genanvendelighed ved endt levetid, tilbyder biobaserede PA56 tåhætter den mest gunstige balance, der i øjeblikket kan opnås blandt kommercielt tilgængelige tåhættematerialer, uden at gå på kompromis med certificeret sikkerhedsydeevne.

Biobaserede PA56 tåhætter optimerer beskyttelses-til-påvirkningsforholdet ved at kombinere certificeret mekanisk ydeevne med reduceret fossilt kulstofinput, lavere fremstillingsenergi, forbedret arbejdssikkerhed under forarbejdning og praktisk lukket kredsløbsgenanvendelighed – fordele, som metaller og epoxybaserede kompositsystemer ikke leverer samtidigt.



<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>