

HVORDAN OPNÅR VI EN BÆREDYGTIG PLASTIKKULTUR?

Udfordringerne med plastikforurening kommer vi næppe til at løse med et teknologisk quickfix. Vi skal derfor også ændre adfærd som samfund og nedsætte vores plastikforbrug. Derudover bliver vi nødt til at tage en pragmatisk og tværfaglig synsvinkel for at finde den bedste løsning for plastikgenanvendelse.

Forfatterne



Daniel Otzen er professor ved Interdisciplinary Nanoscience Center (iNANO) ved Aarhus Universitet, og han leder Novo Nordisk Centeret EnZync for genanvendelse af hærdet plast. dao@inano.au.dk



Andreas Møllebjerg er forsker ved EnZync, Aarhus Universitet, hvor han identificerer og anvender plastiknedbrydende bakterier og enzymer.



Mogens Hinge er lektor ved Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet, hvor han leder forskningsgruppen Plastic and Polymer Engineering, som har fokus på genanvendelse af plast.



Gauri Pathak er lektor ved Afdeling for Globale Studier, hvor hun som antropolog forsker i menneskers brug af plastik.

Plastik er et nyttigt materiale, som anvendes til et utal af formål i det moderne samfund. Menneskeheden fremstiller årligt omkring 400 millioner ton plastik, hvoraf cirka 90 % ikke genbruges. Af disse 90 % bliver cirka 10 % brændt, mens de resterende 80 % ender som plastikaffald. En del af dette bliver deponeret på lossepladser, men meget af det bliver "bare" smidt tilfældige steder og ender derfor i naturen, både som synligt skrald og som usynligt mikroplastik eller som udvaskede nedbrydningsprodukter og tilsætningsstoffer. På den måde følges fordele ved plastik tæt med dets ulemper.

Men hvordan bør vi forskere tilgå de udfordringer, som det enorme plastikforbrug stiller os overfor? Det er et stort spørgsmål, som kan belyses fra mange forskellige discipliner. Før vi vender tilbage til vores

bud på nogle svar, vil vi først se på, hvad plastik egentlig er.

Hvad er plastik?

Grundlæggende består plastik af polymerer og additiver (tilsætningsstoffer). En polymer er et stort molekyle, der er opbygget af mange identiske enheder, og i plastik er polymeren opbygget af lange carbonrige molekyler, der enten er lineære eller forgrenede. I såkaldt termoplast ligger polymererne blot ved siden af hinanden og holdes sammen af fysiske bindinger. Derfor kan termoplast smeltes og opløses og ved opvarmning formes i en ønsket facon.

Hvis polymererne i stedet er tværbundet med hinanden i store tredimensionelle netværksstrukturer, kaldes den hærdeplast. Hærdeplast kan ikke formes til en ny facon, når den først er hærdet.

Plastik kan også opdeles i to klas-

ser på baggrund af polymerernes kemi. Polymerer i klasse 1 har hovedkæder, der består af carbon-carbon (C-C) bindinger. Eksempler på plastik i klasse 1 er polyethylen, polypropylen, polystyren og poly(vinylchlorid).

Polymererne i klasse 2 har nogle gange carbon forbundet med oxygen eller nitrogen. Eksempler på plastik i klasse 2 er polyethylen-tereftalat, PET, og polyuretan, PUR.

Polymerer i klasse 1 er helt fremmede for biologiske organismer, og derfor er de meget vanskelige at omsætte i naturen. Klasse 2-polymerer minder lidt mere om biologiske molekyler som proteiner og fedtstoffer, og de er derfor lettere at nedbryde i naturen.

Polymeren bliver som regel blandet med tilsætningsstoffer for at opnå nogle bestemte egenskaber. Det kan for eksempel være blødgørere

for at lave plastikken mere fleksibel, stoffer der beskytter mod nedbrydning på grund af UV-stråling eller farvestoffer, som får plastikken til at se pæn ud.

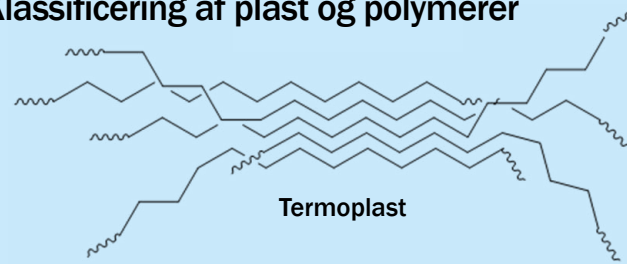
Mekanisk og kemisk genanvendelse

Plastik kan genanvendes ved at give det en ny facon i et nyt produkt eller nedbryde plastikken til mindre molekyler, som så igen kan anvendes til at lave ny plastik.

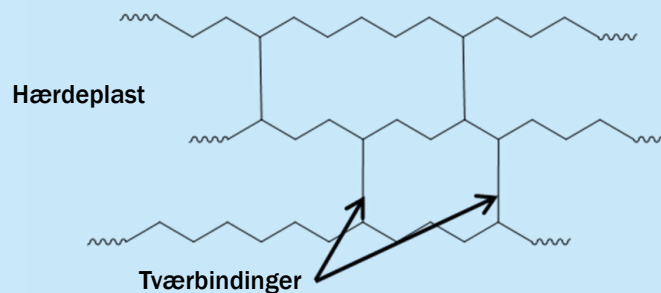
Mekanisk genanvendelse går grundlæggende ud på at finde brugte plastikprodukter og lave nye produkter ud fra den gamle plastik. Desværre får man derved en dårligere plastikkvalitet, da den resulterende plastik som regel vil være et blandingsprodukt af både polymer og tilsætningsstofferne. Ydermere skal plastikken oftest hakkes i mindre stykker, vaskes, gensmeltes mv., hvilket nedbryder polymeren lidt hver gang. Det gør polymeren kortere eller tværbinder den, så den kemisk set er lidt mere "flosset". Det betyder, at producenterne ikke har kontrol over egenskaberne som ved ny plastik. Forskere forsøger også at opløse polymeren i forskellige opløsningsmidler og så udfælde den igen, så plastikken herved bliver rensat og så god som ny. Men det kræver både organiske opløsningsmidler og varmeenergi.

Ved mekanisk genanvendelse tilstræber man altså at bevare polymeren intakt, når den genanvendes. Helt anderledes forholder det sig med *kemisk genanvendelse*. Det går ud på at nedbryde plastikken til mindre molekyler og bruge disse til at opbygge nye polymerer eller andre stoffer (for eksempel olie). Ulempen er, at det er energikrævende. For eksempel indgår pyrolyse ofte i kemisk genanvendelse, og pyrolyse indebærer en opvarmning af plastikken til 400-600 °C under iltfrie forhold. Pyrolyse er dog kun god til visse plastiktyper, da nogle typer som PVC og PET henholdsvis udvikler saltsyredampe eller bliver til sod under sådan en varmebehandling.

Klassificering af plast og polymerer



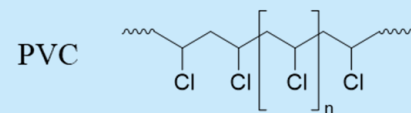
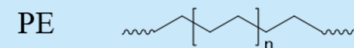
Plastik kan opdeles i to typer – termoplast og hærdeplast – afhængig af, om plastmaterialet kan smeltes om eller ej. I termoplast ligger polymererne blot ved siden af hinanden. Polymererne holdes sammen af fysiske bindinger og kan derfor smeltes og opløses. Polymererne kan både danne en velordnet, krystallinsk struktur eller ligge "hulter til bulter" (amorft) alt efter, hvordan materialet er opbygget. Illustrationen viser en polyethylen, som har en krystallinsk del (den centrale og ordnede del) og en amorft del (enderne).



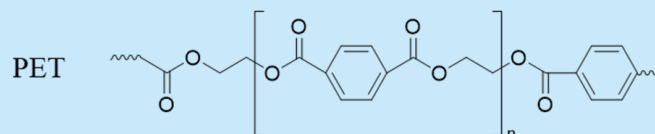
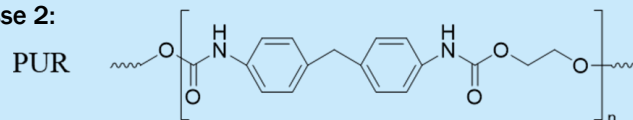
I en hærdeplast er der tværbindinger mellem polymererne, så de danner et stort netværk (for klarhed er afstand og bindingslængderne overdrevet i skitsen.) Når først polymererne er tværbundet, kan plasten ikke opløses eller smeltes.

Polymererne, der udgør hovedbestanddelen af plastik, kan inddeles i to klasser efter opbygningen af deres hovedkæde (bemærk, at på figurerne angiver den kantede parentes den kemiske struktur, der gentages i polymeren). Polymerer i klasse 1 har primært carbon-carbon-bindinger i deres hovedkæde, som tydeligt ses ved polyethylen (PE), der for eksempel bruges til fryseposer, plastikdunke, ol. Et andet eksempel er polyvinylchlorid, PVC, som bruges til for eksempel nedløbsrør, legetøj mv. PVC har sidegrupper af chlor, og udskiftningen af hydrogen til chlor ændrer dramatisk polymerens materialeegenskaber (hårdhed, bøjelighed, slagfasthed, osv.).

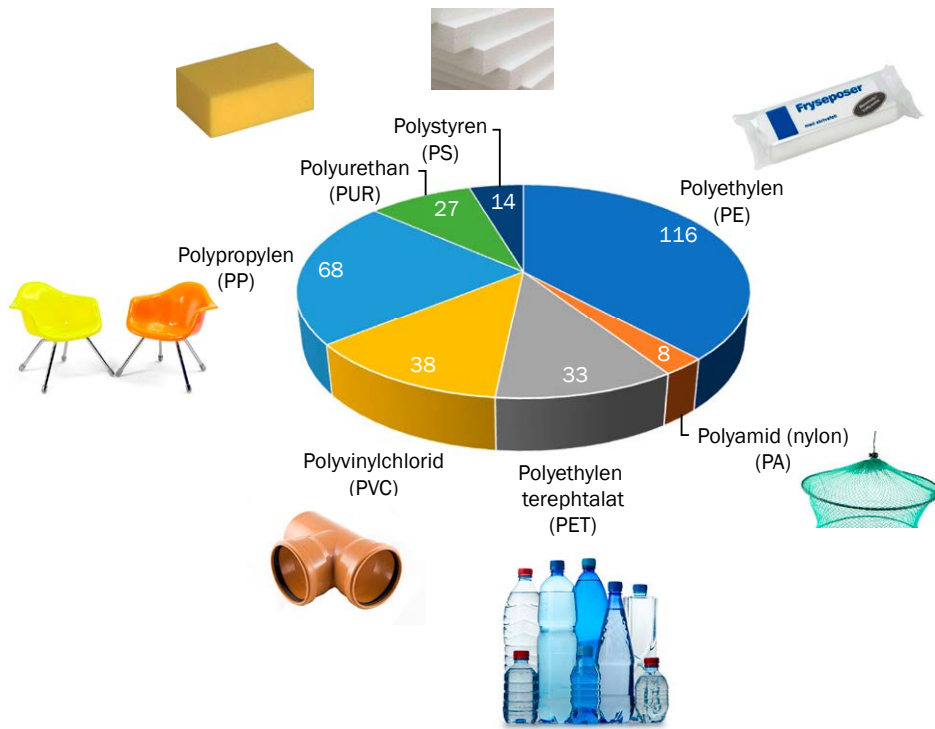
Klasse 1:



Klasse 2:



Eksempler på klasse 2-polymerer: Polyuretan (PUR) bruges i skumgummi-madrasser, skosåler mv., og den er ofte tværbundet. Polyethylentereftalat, PET, som er kendt fra sodavandsflasker, fødevarerbakker, mv. Det fremgår, at hovedkæden indeholder oxygen, i form af estergrupper, i PET, og nitrogen, i form af uretargruppen, i PUR.



Figuren viser, hvor mange millioner tons, der globalt blev produceret af de mest almindelige plasttyper i 2016. Der er også vist eksempler på typiske produkter indenfor de forskellige plasttyper. Tal efter D. Danso, J. Chow, W.R. Streit (2019).

Biologisk nedbrydning af plastik

Udover metoder til mekanisk og kemisk genanvendelse er der forhåbninger til *biologisk nedbrydning* af plastik. Ligesom kemisk genanvendelse går disse metoder også ud på at nedbryde plastik til mindre bestanddele, som så kan genanvendes til at opbygge andre stoffer (for eksempel plastik). I modsætning til kemiske og fysiske processer kan enzymer med skræddersyede egenskaber ikke designes fra bunden. Vi er nødt til at finde dem i naturen, og det bedste sted at lede er i mikroorganismer, der har været i kontakt med plastik i længere perioder. I praksis går forskningen indenfor dette felt derfor ud på at finde, videreudvikle og anvende enzymer, som kan nedbryde de polymermolekyler, plastikken består af.

Enzymer er cellens egne katalysatorer, og de kræver derfor ikke ekstreme betingelser (som højt tryk og temperatur), da de virker under betingelser, som levende organismer kan klare (selvom de godt kan udvikles til at modstå temperaturer op til 70-80 °C). Udfordringen er

at finde enzymer til de forskellige plastiktyper.

Vi har endnu ikke fundet enzymer, som er gode til at nedbryde plastiktyper tilhørende klasse 1. Det skyldes, at C-C-bindinger er meget stærke og derfor svære at nedbryde. Det er straks lettere, hvis nogle af bindingerne i polymeren er mellem carbon og oxygen (C-O). Men for at få oxygen ind i polymererne skal de reagere med oxygenmolekyler (for eksempel fra luft). Det kan opnås ved hjælp af ultraviolet lys, som kan tilføre energi nok til at gennemføre reaktionerne. Oxygenmolekylerne kan reagere mange steder på de lange C-C kæder, og derfor er en oxygenering (iltning) af plastik en ukontrollerbar proces. Den tilfældige oxygenering af carbonkæderne resulterer i nedbrydningsprodukter, der består af en blanding af mindre carbon-kæder med forskellige længder, og det er ikke et godt udgangspunkt for at lave nye polymerer.

Vi ved, at svampe i naturen kan nedbryde carbon-rige molekyler som for eksempel lignin fra planters cellevægge, men det kræver en ret kompliceret blanding af både enzy-

mer og hjælpestoffer, som er svære at efterligne i en fabriksreaktor.

Forskningen er længere med biologisk nedbrydning af plastiktyper i klasse 2, særligt PET. I 2016 fandt japanske forskere ligefrem en bakterieart på en losseplads, der kunne leve udelukkende af PET (og vand). Efterfølgende har andre forskere opdaget en masse forskellige enzymer, der kan nedbryde PET (kaldet PETaser). En af disse PETaser (fundet i en kompostbunke) har vist sig så effektiv, at den efter forskellige forbedringer snart kan bruges til at nedbryde PET på industriel skala. Ved at behandle med enzymer natten over kan tonsvis af brugte plastikflasker nedbrydes til de originale byggesten, som dernæst kan sættes sammen igen til nye plastikflasker af samme kvalitet (foruden alle mulige andre produkter, der indeholder PET). Metoden er udviklet af det franske firma Carbios, mens danske Novozymes producerer enzymet.

Forskere har også for nylig opdaget mikroorganismer og enzymer, der giver håb om enzymatisk nedbrydning af plastiktypen polyuretan (PUR). Problemet er dog, at alle de opdagede enzymer kun kan nedbryde nogle bestemte typer PUR. Ingen mikroorganismer eller enzymer er endnu blevet opdaget, der kan nedbryde andre typer hærdet plast, som for eksempel dem man anvender til maling og forsejling og vindmøllevinger.

Affaldsproblemet skal løses lokalt

Selvom vi er godt på vej til at udvikle bedre måder at genanvende plastik, har vi lang vej endnu. Vi kan ikke forvente, at der i nær fremtid pludselig opstår nogle teknologiske gennembrud, der fixer vores plast-forureningsproblemer. Vi bliver simpelthen nødt til at blive bedre til at håndtere vores plastikaffald ud fra den viden og teknologi, vi allerede har.

Cirka to milliarder mennesker på jorden mangler i dag adgang til systematisk affaldsindsamling og -håndtering, særligt i landli-

Jagten på plastiknedbrydende enzymer

Forskningscentret En'Zync er sat i verden for at udvikle metoder til at lede efter enzymer, som kan nedbryde plastiktyster, vi endnu ikke har gode metoder til at nedbryde.

Enzymerne finder vi i bakterier, og vi screener derfor bakterier fra miljøer, der har været forurenet med plastik. Vores forventning er, at de bakterier, der er gode til at nedbryde og drage nytte af plastik, i højere grad vil findes i disse miljøer, hvor de har en konkurrencefordel i forhold til bakterier, der ikke kan nedbryde plastik. I laboratoriet lader vi de indsamlede bakterier vokse på et substrat (vækstmedium), der minder om plastik. Hvis bakterierne indeholder enzymer, der kan nedbryde plastik, afsløres dette ved, at substratet skifter farve og optages i bakterierne. Alle bakterier, der kan nedbryde vores "snyde-plastik", undersøger vi nærmere ved at fodre dem med mere og mere plastikagtige substrater, for eksempel længere og mere krydsbundne plastikmolekyler. På den måde frasorteres vi enzymer, der kun har en svag tendens til at nedbryde plastik, så vi ender med kun at have bakterier med de mest plastiknedbrydende enzymer tilbage.

De mest interessante enzymer undersøger vi nærmere, så vi kan blive klogere på, hvordan nedbrydningen af plastik foregår på det molekylære niveau, og hvordan enzymerne binder til plastikken. Det kommer til at foregå ikke bare som fysiske forsøg i laboratoriet, men også som computersimuleringer. Simuleringsdata er uhyre nyttige til at hjælpe os med at forstå processerne i de fysiske forsøg til bunds.

Samtidig planlægger vi at optimere enzymerne, så de kan blive endnu bedre til at nedbryde plastikken. Her vil vi bruge en blanding af flere forskellige strategier. Vi kan bruge rationelt design, hvor vi udnytter den viden, vi får om enzymernes mekanisme til at gøre dem endnu bedre. Derudover vil vi bruge dirigeret evolution, hvor vi forsøger at fremskynde evolutionære ændringer i en ønsket retning. Det gør vi ved at lave en masse tilfældige varianter af det plastiknedbrydende enzym ved at fremprovokere mutationer i de bagvedliggende gener og identificere de mest effektive varianter baseret på deres højere aktivitet. Ved at gentage denne proces en håndfuld gange kan vi udvikle enzymer, der er mange gange mere effektive end de oprindelige.

ge områder. Mange steder har befolkningen ikke råd til at betale for at få hentet affald, eller også forhindrer manglende koordination eller andre problemer i den lokale forvaltning en effektiv affaldsindsamling og -håndtering. I stedet bliver plastikaffald (sammen med alt muligt andet affald) brændt af, smidt i "vejkanten" eller deponeret på mere eller mindre tilfældigt indrettede lossepladser. Det kan også indgå i en "uformal økonomi", hvor affaldssamlerne ofte efterlader de billigste (og dermed uinteressante) plastiktyster på lossepladsen – eller som affald i naturen.

I højindkomstlande som Danmark sorteres affaldet heldigvis i stigende grad, men det er stadigvæk indviklet og til tider en uigennemskuelig proces at sortere plastikaffaldet, så det nemt kan genbruges. Derfor sendes store mængder ikke-genanvendeligt affald (deriblandt meget plastik) til "genanvendelse" i andre og typisk fattigere lande. Den løsning er ikke særlig god, og Kina er holdt op med at tage imod plastikaffald fra andre lande – så nu sendes det blot videre til andre

lande, typisk i Sydøstasien. Men disse lande har lige så svært ved at genanvende plastik, som vi har her i Danmark. I værste fald ender dette eksporterede plastikaffald i lav- og mellemland blot på åbne lossepladser. Nedbrydning af biologisk materiale på sådanne lossepladser kan føre til så høje temperaturer, at affaldet selvantænder. Dermed bliver plastaffaldet

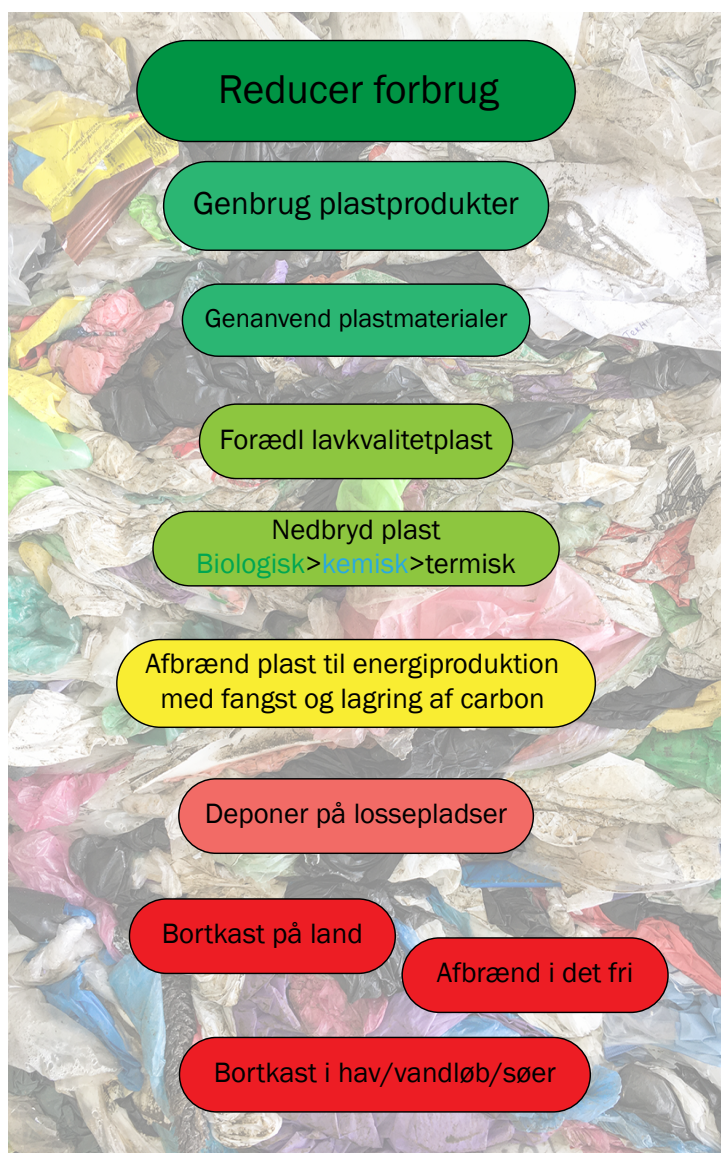
brændt af under ukontrollerede forhold, hvilket giver en større forurening, end hvis vi havde brændt det i et af vores forbrændingsanlæg. I nogle tilfælde kontrolleres disse lossepladser af kriminelle organisationer, hvilket blot gør det sværere at ændre på affaldshåndteringen.

Konklusionen er derfor, at vi ikke kan "eksportere" os ud af plastaf-

Det er en indviklet og til tider en uigennemskuelig proces at sortere plastikaffaldet, så det nemt kan genbruges.
Foto: Colourbox.



Figuren viser et eksempel på et plastaffaldshierarki. Hvis vi skal have styr på problemerne med plastaffald, skal vi have flyttet vores håndtering af affaldet så højt op i hierarkiet som muligt – og allerhelst reducere forbruget af plastik. Figur efter G. Pathak, M. Hinge and D.E. Otzen (2023).



i at transformere samfundet til at have et bæredygtigt plastikforbrug. Her kan antropologer, psykologer, undervisere og pædagoger spille en vigtig rolle. At udvikle en sådan “økodannelse” kræver, at man tager almindelige menneskers hverdag alvorligt, så løsningerne ikke kommer i modstrid med hverdagens vaner og aktiviteter.

Det er vigtigt at understrege, at hvis vores plastikforbrug skal være bæredygtigt, må genanvendelse af plastik ikke medføre et merforbrug – for eksempel fordi folk tænker, at “når jeg er så god til at genanvende plastik, kan jeg godt bruge mere af det”. Det er desværre almindeligt at se denne opførsel, hvor en forventet besparelse ophæves af et større forbrug.

Pragmatisk meliorisme

Stillet overfor den store udfordring med at få styr på plastikforurening vil nogle måske henfalde til fortvivlelse, mens andre har blind tiltro til, at et teknologisk fix vil løse udfordringen. Ingen af disse tilgange er en god vej fremad. Derfor foreslår vi en tilgang til udfordringen, som vi kalder *pragmatisk meliorisme*. “Pragmatisk” betyder her, at vi i videst muligt omfang bør genanvende de plastiktyper, der er lettest at genanvende, på de måder, der med mindst mulig indsats har størst mulig virkning. Begrebet “meliorisme” betyder den opfattelse, at verden kan forbedres ved en menneskelig indsats. En sådan tilgang anerkender, at plastik er kommet for at blive, så derfor skal vi udvikle metoder, der styrker vores evner til at bruge, sortere og genanvende plastik på den mest forsvarlige og borgervenlige måde. Alternativt kommer vi let i en situation, hvor vi blot ender med en masse uhåndterbare regler såsom “forbud mod plastiksugerør”, hvor symbolværdien måske er høj, men den praktiske betydning lille.

Vi håber, at en transdisciplinær pragmatisk meliorisme også kan være model for at løse andre miljøudfordringer ved at udvikle både tekniske, sociale og økologiske bæredygtige politikker. ■

Videre læsning
G. Pathak, M. Hinge and D.E. Otzen (2023): Transdisciplinary pragmatic melioration for the plastic life cycle: Why the social, natural, and technical sciences should prioritize reducing harm. *Sci Total Environ.* Oct 15:895:165154. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723037774

Plastics Europe, 2022. Plastics – The Facts 2021. plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021.

D. Danso, J. Chow, W.R. Streit (2019): Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 85 (2019), pp. e01095-19

faldsproblemet, men bliver nødt til at løse det herhjemme.

Plastikudfordringen er i høj grad tværfaglig

Hvad skal der gøres for at løse problemerne med plastikforurening? Først og fremmest er det vigtigt at indse, at vi ikke bare kan løse problemet rent teknologisk. Vi er nødt til at se problemet i en bredere sammenhæng, der tager hensyn til, hvordan mennesker forbruger og behandler plastik i hverdagen. Det betyder, at det er en opgave, der kræver viden og ekspertise fra mange forskellige fagområder.

Det er vigtigt, at den måde, der reguleres og organiseres indsamling og sortering af affald, afspejler den

måde, hvorpå plastik fremstilles, bruges og genanvendes. Det betyder blandt andet, at teknologier til genanvendelse af plastikaffald skal være fleksible, så de kan tilpasses lokale økonomiske og klimatiske forhold og ikke tænkes som en “one size fits all”-løsning.

Et centralt spørgsmål er, hvem der skal betale for denne omstilling? Er det plastikproducenten, plastikforhandleren, forbrugeren eller staten? Hvordan bruger vi den rette kombination af afgifter og tilskud? Det skal samfundsforskere hjælpe med at udvikle gode modeller til at afgøre.

En anden væsentlig opgave er oplysning og uddannelse af borgerne, så de bliver gode medspillere