





Nanomaterialer - muligheder og risici

Anders Baun, Steffen Foss Hansen, Nanna Hartmann, Institut for Vand og Miljøteknologi
Stig I. Olsen, Institut for Planlægning, Innovation og Ledelse
Mona Lise Binderup, Henrik Rye Lam, Fødevarerinstitutionen

Nanomaterialer findes allerede i dag i en række produkter og i fremtiden kommer der endnu flere. Disse nanomaterialer er tilsat for at give produkterne nye og forbedrede egenskaber. Man kan eksempelvis købe slidstærk og farveholdbar maling, sportstøj, der holder sig lugtfri selv efter flere uger i sportstasken, og bilkatalysatorer, der fjerner skadelige gasser fra bilens udstødning. Den nyeste forskning viser dog også, at nogle nanomaterialer kan være farlige for mennesker og miljø. En af fremtidens store opgaver er at inddrage overvejelser om risiko og miljøpåvirkninger, når vi bruger og udvikler nanoprodukter.

Nyt forskningsfelt

Denne bog illustrerer, at nanoteknologi rummer mange nye og spændende muligheder, der vil påvirke og forandre vores hverdag inden for en lang række områder. Indtil for ganske få år siden var man ikke opmærksom på, at der også kunne følge nogle negative effekter med nanoteknologiens mange anvendelser. I 2004 observerede en forskningsgruppe fra NASA i USA imidlertid, at mus fik skader på lungerne efter at have været udsat for høje koncentrationer af carbonnanorør. Med opdagelsen af de første risici fulgte en vis skepsis over for nanoteknologi både hos mange politikere og i den almindelige befolkning. Mens nogle nanomaterialer vil være uskadelige for både mennesker og miljø, kan andre typer af nanomaterialer vise sig at have uheldige virkninger. Undersøgelser af nanomaterialers giftighed har ført til et helt nyt videnskabeligt forskningsfelt *nanotoksikologi*. I dette kapitel vil vi fortælle, hvad man i dag ved om nanomaterialers uønskede effekter, samt beskrive metoderne til risikovurdering.

Størrelsen er vigtig

Toksikologi er studiet af stoffers giftighed. Ved nanotoksikologi undersøger forskerne giftigheden af materialer i nanostørrelse. Et *nanomateriale* er defineret som et materiale,

der er 0,1-100 nm i mindst en dimension. Det vil sige, at nanopartikler ('nano' i tre dimensioner), nanorør ('nano' i to dimensioner) og nanometer tynde overfladefilm ('nano' i en dimension) alle defineres som nanomaterialer. Du kan læse mere om definitionen af nanomaterialer i *boks 1*.

Selvom et materiale er ufarligt i større form, kan det godt vise sig at være giftigt, når det er i nanostørrelse. For eksempel er guld- og sølvsmykker helt ufarlige, mens nanopartikler af de samme materialer for det første er mere reaktive og for det andet, fordi de er så små, kan trænge ind i mennesker, dyr og planter (*figur 1*). Her kan partiklerne muligvis lave vævsskader eller fremkalde resistens hos bakterier. Nanomaterialer kan altså alene i kraft af deres størrelse have nogle nye egenskaber, som betyder, at vi ikke automatisk kan antage, at nanomaterialer er ufarlige, fordi deres større 'søskende' er det. Omvendt betyder det dog ikke, at alle nanomaterialer er farlige. For eksempel bruges nanopartikler af fedt til at transportere kræftmedicin frem til kræftceller. Fedtpartiklernes ringe størrelse betyder, at de lettere bliver optaget fra blodet, men de nedbrydes af kroppens egne enzymer og genbruges til andre formål.



Figur 1. Smykker af guld er ufarlige, fordi guld er et ædelmetal og derfor inaktivt. Guldpartikler i nanostørrelse (højre) har overraskende vist sig at være meget reaktive og egner sig derfor vældigt godt som katalysatorer. Det er dog uvist, om partiklernes reaktivitet er farlig for mennesker og dyr.

Risikovurderinger af nanomaterialer

Risikovurdering kendes fra mange andre områder, og det er nærliggende at sammenligne vurderinger af nanomaterialerne med de vurderinger, der i dag laves af kemiske stoffer. Her indgår de kortlagte risici i en samlet risikovurdering af anvendelsen af nanomaterialer, og vurderingerne indgår så igen i en overordnet politisk afvejning af, hvorvidt risikoen er samfundsmæssig acceptabel eller ej. Hvis man vil vide, om der er en risiko ved anvendelsen af et stof, er der to simple spørgsmål, man ønsker at besvare:

- I hvor høj grad bliver man udsat for stoffet?
- Hvor farligt er stoffet?

For eksempel ved de fleste godt, at for meget alkohol er farligt, men såvel den akutte forgiftning – for mange øl fredag aften – som den kroniske – alkoholisme – afhænger af, hvor meget alkohol man indtager. Det samme mener man på nuværende tidspunkt gælder for nanomaterialer. Det vil sige, at risikoen afhænger af, om man kommer i kontakt med materialerne, og om de i sig selv er skadelige. I videnskabelig sammenhæng kalder man de

to ovennævnte spørgsmål for en *eksponeringsvurdering* og en *effektvurdering* (figur 2). Ved at inddrage risikovurderinger på et tidligt tidspunkt i udviklingen af nye nanomaterialer kan vi forsøge at forebygge skader på mennesker og miljø uden at standse udviklingen af nanoteknologiske produkter.

Eksponeringsvurdering: Vurdering af sandsynligheden for, at dyr, mennesker eller miljø kommer i kontakt med et givent materiale.



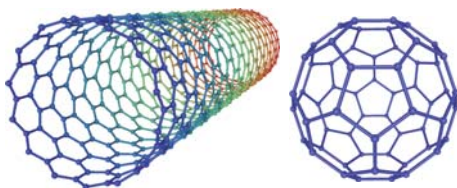
Effektvurdering: Vurdering af, hvor skadeligt et materiale eventuelt er ved eksponering.



Figur 2. Eksponering (venstre) og effekt (højre) af alkohol.

Nanomaterialer i vækst

Mængden af nanomaterialer, der produceres og anvendes på verdensplan, har stor betydning for, hvor meget miljøet og mennesker bliver udsat for. Desværre er det meget vanskeligt at skaffe præcise oplysninger om de producerede mængder. For nogle materialer kan man foretage skøn over produktionen, men for hovedparten af nanomaterialerne er dette ikke muligt. Produktionen af carbonholdige nanomaterialer som nanorør og *fullerener* (figur 3) er blevet anslået til mere end 1000 tons på verdensplan i året 2003. Siden er dette tal naturligvis steget i takt med, at brugen af nanomaterialer i flere typer af produkter er vokset, men hvor meget produktionen er i dag kan kun skønnes groft. Nanorør tilsættes blandt andet byggematerialer og sportsudstyr for at gøre dem stærkere, mens fullerener blandt andet bruges i smøreløser. Vi ved, at mængden af nanobaserede produkter stiger dramatisk år for år, og vi kan derfor antage, at industiarbejdere, forbrugerne og miljøet udsættes for en stigende mængde nanomaterialer både nu og endnu mere i den nærmeste fremtid.

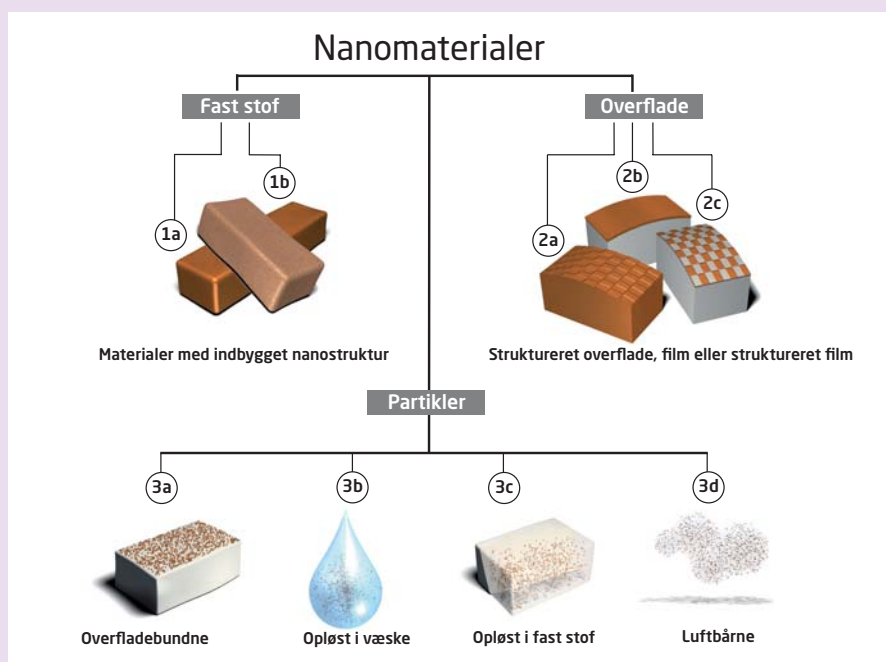


Figur 3. Produktionen af blandt andet nanorør og fullerener stiger hvert år. Nanorør tilsættes byggematerialer og sportsudstyr for at gøre dem stærkere, mens fullerener bruges i smøreløser.

Det er dog ikke kun mængden, der afgør om vi bliver udsat for nanomaterialer. Som det fremgår af *boks 1*, findes der nemlig mange forskellige typer af nanomaterialer. Materialetypen, og hvor i produktet nanomaterialet befinder sig, har også stor betydning for, om man bliver udsat for det, og det er således nyttigt at opdele nanoteknologiske produkter efter nanomaterialets placering i produktet. *Figur 4* viser opdelingen af de forbrugerprodukter, der var tilgængelige på internettet i 2006, efter principperne i *boks 1*.

Boks 1. Nanomaterialer er mange ting

Som kapitlerne i denne bog viser, dækker begreberne 'nanoteknologi' og 'nanomaterialer' over utroligt mange forskellige ting. For at definere 'nanomaterialer' mere præcist kan man opdele dem efter, hvor i produktet materialet sidder. Det giver os tre overordnede kategorier, nemlig produkter, hvor hele materialet har nanostruktur (1a-1b), produkter med nanomaterialer på overfladen (2a-2c) og produkter med nanopartikler (3a-3d). Du kan se eksempler på de forskellige produkter og materialer på modsatte side.



Materialer med nanostruktur



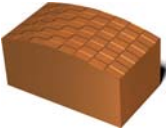
Overflade og fast stof af samme materiale, eksempelvis nanokrystallinsk kobber med stor brudstyrke



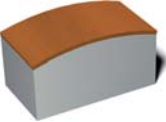
Overflade og fast stof af flere materialer, eksempelvis porøse piller af magnesiumchlorid til opbevaring af ammoniak



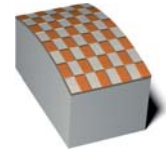
Nanomaterialer på overflader



Fast stof med overfladestrukturer i samme materiale, eksempelvis cellevenlig plastik til implantater



Umønstrede nanofilm til dugfri solbriller



Mønstrede nanofilm på et andet materiale, eksempelvis magnetiske film i harddiske



Nanopartikler



Platinnanopartikler bundet til overfladen af bærematerialet i bilkatalysatorer



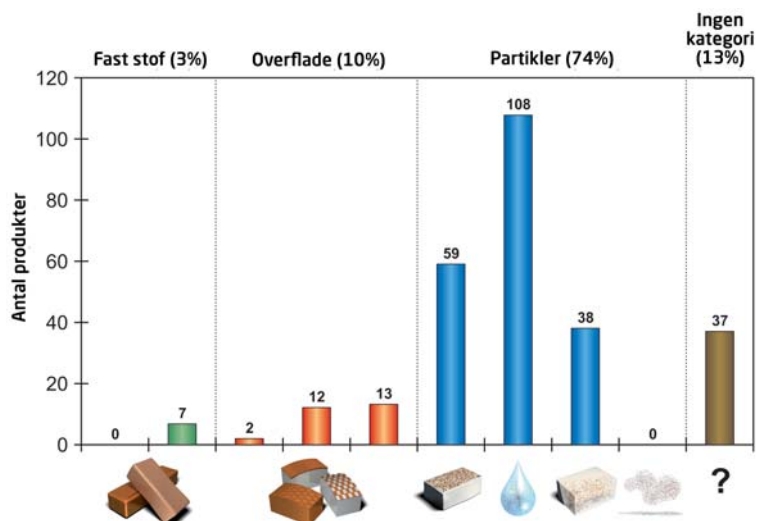
Carbonnanorør blandet i fast stof i tennisketsjere og racercykler



Titaniumdioxid i solcreme

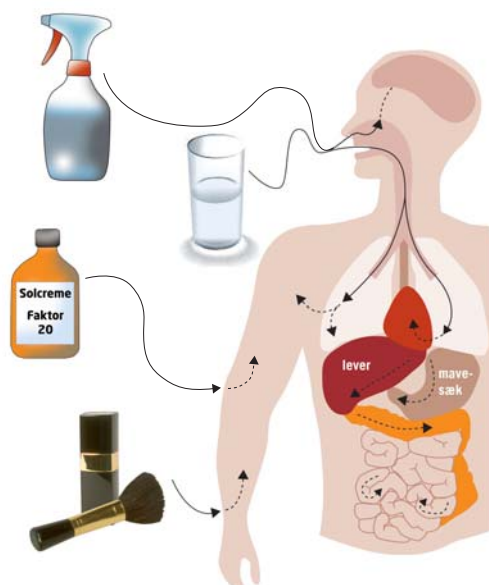


Luftbårne nanopartikler i forbindelse med produktion



Figur 4. Antallet af forbrugerprodukter til salg på internettet i 2006, som ifølge producenten er baseret på nanoteknologi. Produkterne er opdelt efter placeringen af nanomaterialet i produktet. Produkter som katalysatorer og det meste medicin sælges ikke via internettet og indgår derfor ikke i undersøgelsen.

Figur 4 viser, at størstedelen af de forbrugerprodukter, der er til salg på internettet, indeholder nanopartikler opløst i væske. Det er for eksempel rengøringsmidler, midler til overfladebehandling, maling, kosmetik og solcreme, og påvirkningen fra nanopartikler i disse produkter sker hovedsageligt gennem huden eller via åndedrættet. Figur 5 viser de forskellige måder man kan optage nanopartikler på sammen med eksempler på relevante produkter.

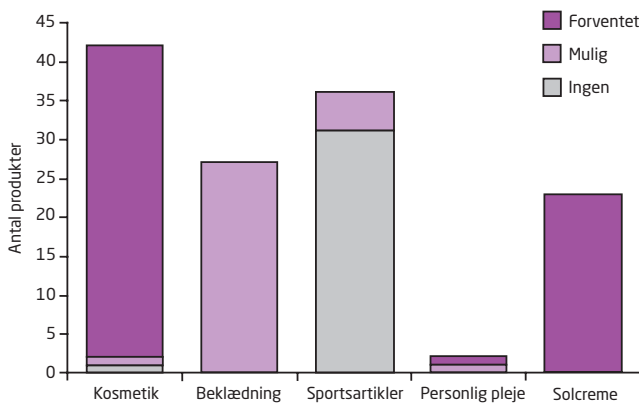


Figur 5. Eksponeringsveje. Nanopartikler kan blive optaget gennem huden, munden og ved indånding gennem luftvejene.

Luftbårne nanopartikler (for eksempel nanorør eller fullerener) finder man normalt ikke i forbrugerprodukter (figur 4). Frie nanopartikler findes derimod i forskningslaboratorier og på fabrikker, hvor der kan være risiko for, at de ansatte indånder partiklerne og måske får skader på lunger eller andre organer. Som nævnt i indledningen har dyreforsøg vist, at luftbårne carbonnanorør og fullerener har skadelige virkninger på lungevæv. Dette vender vi tilbage til senere i kapitlet.

Eksponeringsvurdering: Hvor meget udsættes vi for?

Som vi har set, afhænger eksposering altså af, hvor meget der er af et givent nanomateriale og hvor i produktet det sidder. I en undersøgelse fra 2007 fandt man, at der var 243 nanobaserede produkter på markedet i Danmark. Opgørelsen dækker kun de såkaldte forbrugerprodukter og ikke industrielle produkter som for eksempel *bilkatalysatorer* eller elektronik baseret på nanoteknologi. Af de 243 forbrugerprodukter var 134 beregnet til personlig pleje eller sportsbrug. Figur 6 viser, at forbrugeren sandsynligvis bliver udsat for nanopartikler i kosmetik og solcreme ('forventet'), mens det ikke er særligt sandsynligt, at man bliver udsat for nanopartikler i sportsudstyr, fordi partiklerne er indkapslet i produktet ('ingen'). 'Mulig' eksposering betyder, at man ikke kan udelukke, at man kan blive udsat for nanopartikler fra produktet.



Figur 6. Eksponeringsvurdering af produkter med nanomaterialer. Der er stor sandsynlighed for eksposering af nanopartikler i kosmetik og solcreme, lav eller ingen sandsynlighed med hensyn til sportsartikler, mens der er en mulighed for eksposering af nanopartikler fra tøjet.

Det er i dag stærkt omdiskuteret, hvor meget nanomaterialer påvirker miljøer. Fra tidligere tiders anvendelser af ny teknologi ved man dog med sikkerhed, at materialer, der anvendes i samfundet, før eller siden også dukker op i naturen. Fra produktionen af nanomaterialer vil der kunne udledes nanopartikler med spildevand og affald og som luftbårne partikler fra udsugning. Ser man på de nanobaserede forbrugerprodukter (figur 4), kan nanopartikler som for eksempel titaniumdioxid (TiO_2), zinkoxid (ZnO) og fullerener i væsker slippe ud i vandmiljøet. Disse nanopartikler anvendes blandt andet i solcreme, kosmetik og biplejeprodukter, der efter brug vaskes af og ender i spildevandet eller direkte i miljøet. Nanopartikler, der sidder fast på en overflade, kan også slippe ud i naturen. Et eksempel

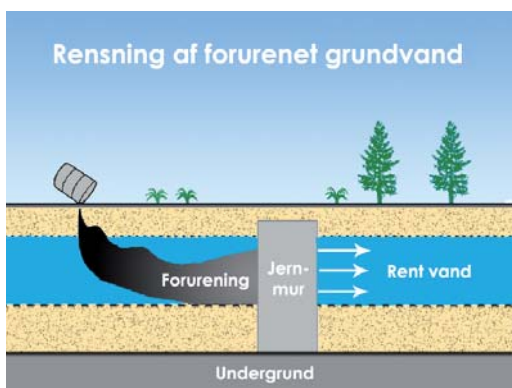
er metallet platin, som bruges i bilkatalysatorer (figur 7). Nanopartikler af platin er bundet til en overflade af keramik og kan ved almindelig slid rive sig løs fra katalysatormaterialet. Man har således fundet et stigende indhold af platin i støv opsamlet i svenske vej-tunneler, og den nyeste forskning viser, at der netop er tale om platin i nanostørrelse.



Figur 7. Bilkatalysatorer indeholder nanopartikler af platin, der renser udstødningsskassen for skadelige nitrogenforbindelser. Partiklerne kan imidlertid slides af katalysatormaterialet og slippe ud i miljøet.

Dette er et eksempel på et af de dilemmaer, som mange nanomaterialer sætter os i: Bilkatalysatorerne med nanopartikler er en af de vigtigste grunde til, at luftforureningen fra biler er blevet reduceret, men samtidig skaber vi med de selv samme miljøbeskyttende katalysatorer ny forurening. Her skal nytteværdien af katalysatorer med nanoplatin altså holdes op imod den mulige skadevirkning af platin på nanoform.

Et andet eksempel på et muligt dilemma er anvendelsen af nanopartikler af jern til rensning af forurenede grundvande. Grundvandsforureningerne stammer fra de klorholdige væsker, man tidligere anvendte til tøjrensning – de såkaldte klorerede opløsningsmidler. Stofferne er tungere end vand, og hvis de bliver spildt på jorden, kan de sive ned til grundvandet. For flere år siden opdagede man, at man kan fjerne den slags forurening med jern. Det er dog en vanskelig proces, der kræver store gravearbejder, at få jernet ned til grundvandet (figur 8). Problemet kan nu løses med jernnanopartikler, der takket være deres ringe størrelse kan pumpes ned i grundvandet uden graveri. Her er altså en mere nænsom metode til at rense forurenede grundvande, som desværre samtidig direkte udsætter miljøet for nanopartikler.

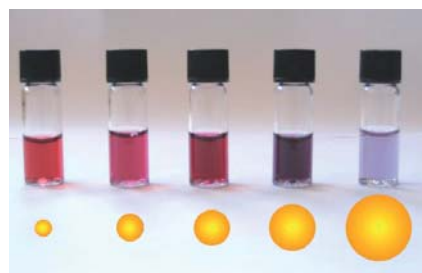


Figur 8. Tidligere har man bygget store 'jernmure' for at rense grundvandet for forurening. I dag kan nanopartikler af jern pumpes direkte ned i undergrunden uden gravearbejde.

For både nanopartikler af platin og jern findes der ikke nogen videnskabelig dokumentation for, at de har skadelige virkninger på mennesker eller miljø. Alligevel er det vigtigt, at man foretager den slags risikovurderinger af mulige uønskede virkninger på mennesker og miljø, inden anvendelsen af materialerne udbre-des.

Nanomaterialer har særlige egenskaber

Det er vigtigt at understrege, at nanomaterialer er lige så forskellige som andre materialer. Ligesom der er forskel på farligheden af køkkensalt og kviksølv, vil farligheden af et nanomateriale også afhænge af materialets kemiske sammensætning. For nanopartikler er det dog ikke kun den kemiske sammensætning, der er vigtig, men også de egenskaber, partiklerne opnår i kraft af deres beskedne størrelse. Kemiske reaktioner sker altid på overfladen af materialer. Jo mindre en partikel er, jo større en procentdel af dens atomer befinder sig på overfladen. Flere overfladeatomer betyder således også større kemisk reaktivitet. Derfor er såvel overfladeareal som reaktivitet per gram materiale væsentlig større for nanomaterialer sammenlignet med de samme materialer i større størrelse. Den overraskende reaktivitet af guldnanopartikler, som vi nævnte i indledningen, kan netop forklares med, at partiklerne har mange flere overfladeatomer end større guldparkler. Guldnanopartikler skifter dels farve til rød og blå (figur 9), men bliver desuden meget reaktionsvillige og kan derfor bruges som en katalysator, der får kemiske reaktioner til at gå hurtigere. Herudover vil den ringe størrelse muligvis lette nanopartiklernes optagelse i organismen. Det er kombinationen af den kemiske sammensætning, overfladearealet, reaktiviteten og optagelsesevnen, der bestemmer nanomaterialers eventuelle skadelige virkninger i mennesker og natur.



Figur 9. Forskellige størrelser af guldparkler har også forskellige farver, fordi de reflekterer lyset forskelligt.

Effektvurdering: Hvor farlige er nanomaterialer?

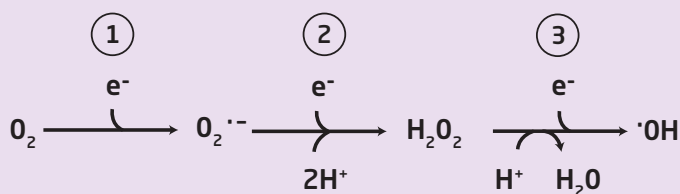
Der har hidtil ikke været meget fokus på de ændrede egenskaber af nanomaterialer i forhold til deres større 'søskende', og der findes derfor kun forholdsvis få undersøgelser, som belyser dette. I det følgende beskrives de vigtigste fund gjort fra pattedyr og organismer fra vandmiljøer. Jordlevende organismer som regnorme, insekter samt planter er stort set ikke blevet undersøgt i nanotoksikologisk sammenhæng.

Inden for nanotoksikologien undersøger man, om nanomaterialer er akut giftige, og om de medfører skader på længere sigt i både mennesker og miljø. Flere studier på menneskeceller har vist, at nanopartikler som for eksempel nanorør er problematiske. En undersøgelse fra 2003 viste, at prøver med nanorør var giftige for menneskelige hudceller, og at de forårsagede oxidativt stress (boks 2), det vil sige dannelsen af meget reaktive oxygenioner, der er kendt for at kunne forårsage skader på væv og organer. Forskerne var imidlertid i tvivl, om den oxidative stress skyldtes nanorørene eller den forholdsvis høje mængde af jern i de uoprensede prøver, men andre forsøg har siden vist, at nanorør også forårsager lungeskader i mus og rotter. Der er lavet mere end 400 videnskabelige studier af

C_{60} -molekyler (fullerenmolekyler med 60 carbonatomer), carbonnanorørs og guld-, sølv- og kobbernano-partiklers virkning på flere forskellige cellekulturer og organismer såsom rotter, mus, fisk og krebsdyr, og et klart flertal af disse studier viser skadelige effekter af de undersøgte nano-partikler. Partiklerne skader blandt andet lunger, knoglemarv, lever, milt, hjerte, blodkarsystem og hjerne, og disse organer betragtes derfor som de mest sårbare for nano-partikler. Selvom forskerne ikke kender de nøjagtige mekanismer bag skaderne, tyder flere studier på, at det ikke alene er koncentrationen eller dosis af nano-partikler på massebasis, der er afgørende for farligheden. En mulig skademe-kanisme er oxidativt stress, som du kan læse mere om i boks 2. En anden mulighed er, at nano-partikler kan transportere andre kemikalier med sig til organer, hvortil kemikalierne aldrig ville kunne komme af sig selv. Partiklerne kan med andre ord virke som bærere af andre stoffer. Samlet set viser disse forsøg, at man gør klogt i at inddrage undersøgelser af de mulige skade-virkninger af nanomaterialerne tidligt i udviklingen af nye materialer.

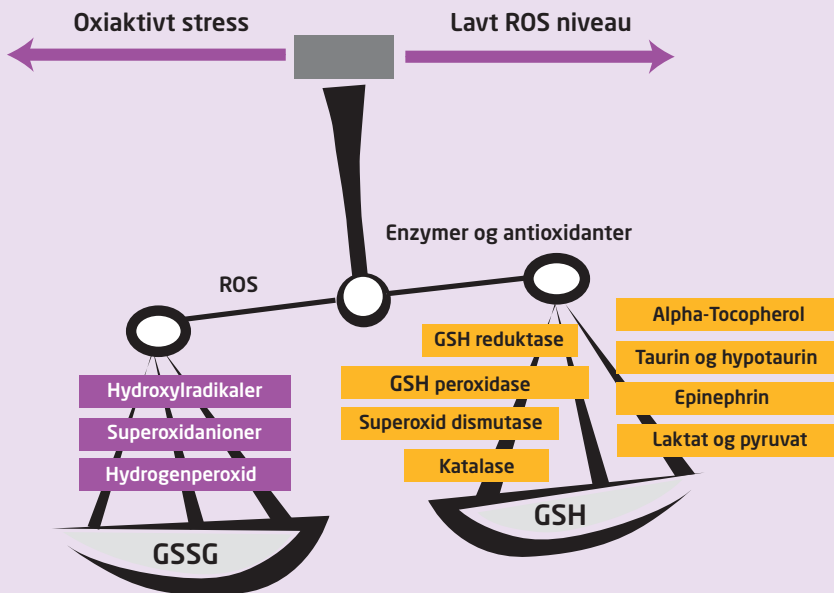
Boks 2. Oxidativt stress

Selvom flere studier har vist, at forskellige typer af nano-partikler kan skade væv og organer hos både dyr og mennesker, kender forskerne endnu ikke den præcise mekanisme bag skaderne. En af de bedst undersøgte og beskrevne virkninger af nano-partikler i kroppen er dannelsen af forskellige typer reaktivt oxygen, som på engelsk kaldes for 'Reactive Oxygen Species' eller ROS. ROS er små oxygenholdige molekyler, der dannes både ved større partiklers og ved nano-partiklers reaktion med biologisk materiale (figur 10). ROS er meget reaktionsvillige på grund af tilstedeværelsen af en uparret elektron og indgår blandt andet i kroppens immunforsvar, hvor de hjælper med at nedbryde fremmede organismer og som naturlige mellemprodukter ved kroppens normale stofskifte, specielt i cellernes mitochondrier. Reaktionsvilligheden kan imidlertid også vendes mod kroppens egne celler og væv, hvis mængden af ROS bliver for stor.



Figur 10. Dannelsen af reaktive oxygenforbindelser på nano-partiklers overflade. 1) Dannelsen af superoxidationer sker i huden, når UV-lys bryder kemiske bindinger og elektroner på nano-partiklens overflade overføres til O_2 , som så får en uparret elektron ($\text{O}_2^{\cdot -}$). 2+3) Reduktions-oxidations reaktioner mellem for eksempel reaktive jernatomer på nano-partiklens overflade og kroppens væv danner $\cdot\text{OH}$ med en uparret elektron.

Normalt beskytter cellerne sig mod ROS ved hjælp af effektive forsvarsmekanismer, som omfatter ROS-nedbrydende enzymer og de såkaldte antioxidanter, blandt andet C-vitamin og glutathion (GSH). Ved reaktion med ROS omdannes GSH til sin oxiderede form (GSSG). Oxidativt stress defineres derfor som forholdet mellem den reducerede og oxiderede form af glutathion, GSH/GSSG. Jo lavere forholdet er mellem GSH og GSSG, jo mere oxidativt stress (*figur 11*). Længerevarende oxidativt stress er farligt, fordi der kan ske skader på organismens DNA, herunder mutationer og til sidst celledød. Cigarettrøg er en af de vigtigste eksterne kilder (uden for kroppen) til frie radikaler, og det er desuden velkendt, at metaller som bly, cadmium, jern og kviksølv skaber oxidativt stress.



Figur 11. Oxidativt stress defineres som balancen mellem mængden af den reducerede (GSH) og oxiderede form af glutathion (GSSG). Balancen påvirkes af effektiviteten af kroppens forsvar, herunder ROS-nedbrydende enzymer, og af mængden af reaktive oxygenmolekyler.

Det oxidative stress medfører celle- og vævsskader på flere måder. Først opstår der en betændelsestilstand i vævet. Højere niveauer af oxidativt stress påvirker mitochondriernes funktion. Til sidst dør cellen enten ved *apoptose* (programmeret celledød) eller *nekrose* (ikke-programmeret celledød) for eksempel udløst af iltmangel. Det reaktive oxygen kan desuden skabe genmutationer, som i værste tilfælde kan medføre kræft.

Basissæt af forsøgsdyr

Når man skal undersøge virkningen af en given type nanopartikler i naturen, laver man såkaldte økotoksikologiske forsøg. Det er laboratoriemetoder, hvor man udsætter vandlevende organismer for forskellige koncentrationer af et givent stof. På den måde finder man frem til en værdi for dødelighedskoncentrationen (LC_{50}), som er et mål for den koncentration af et kemisk stof, der slår halvdelen af forsøgsorganismene ihjel. Da man ikke kan undersøge alle relevante arter fra vandmiljøet, har man valgt at fokusere på et såkaldt basissæt af organismer. Basissættet består af alger, krebsdyr og fisk, og man dækker på den måde flere niveauer i økosystemet.

Nanomaterialer i vandmiljø

Den første undersøgelse af nanopartiklers effekter i vandlevende dyr blev udført af forskeren Eva Oberdörster. I et studie fra 2004 undersøgte hun virkningen af C_{60} -molekyler på ferskvandsfisk. C_{60} -molekyler bruges blandt andet i forskelligt sportsudstyr, motorsmøreolie og kosmetik. Når hun udsatte fiskene for C_{60} , fandt hun efterfølgende oxidative skader i fiskenes hjerner. Forsøget er senere blevet meget kritiseret, fordi Oberdörster havde opløst C_{60} i et organisk opløsningsmiddel kaldet tetrahydrofuran, som i sig selv kan give den type skader, som hun så hos fiskene. Resultaterne kan derfor skyldes opløsningsmidlet og ikke C_{60} -nanopartiklerne. Alligevel er undersøgelsen vigtig. Den markerede nemlig begyndelsen på undersøgelser af nanopartiklers mulige skadevirkninger på miljøets dyr og planter. Siden 2004 er andre studier kommet til, og ved brug af forskellige fiskearter er det blandt andet blevet vist, at carbonnanorør og TiO_2 -nanopartikler kan skade fisks gæller, hjerne og lever.

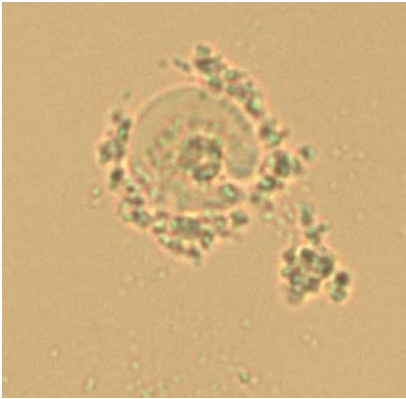
Også andre vandlevende dyr er blevet undersøgt. Det har især været undersøgelser med dafnier (figur 12), der får deres føde ved at filtrere alger ud af det vand, de lever i. Netop fordi de filtrerer store mængde vand i forhold til deres kropsstørrelse, er der risiko for, at dafnierne i særlig grad kunne blive udsat for nanopartikler. Nogle langtidsstudier med dafnier har vist øget dødelighed og nedsat reproduktion ved tilstedeværelsen af C_{60} , mens andre studier ikke finder disse effekter.



Figur 12. Dafnier er krebsdyr, der findes i næsten alle danske søer og vandhuller. De er fødegrundlaget for mange fiskearter og derfor meget vigtige for økosystemets funktion.

Billedet viser en dafnie, der har optaget C_{60} -partikler (sort) fra vandet, den markerede sorte streg i midten er fordøjelseskanalen.

Der er også lavet nogle få undersøgelser af, hvordan nanopartikler påvirker alger (*figur 13*), men det er ikke noget man ved ret meget om endnu. For TiO_2 har man dog fundet, at nanopartikler med en diameter på 25 nm hæmmer algers vækst mere end partikler med en større diameter. Det vil sige at miljøfarligheden af nanopartikler ikke kun afhænger af hvilken slags partikel det er, men også af størrelsen af nanopartiklen. Som tidligere nævnt kan nanopartikler virke som bærere af andre stoffer. For eksempel nedsætter TiO_2 -nanopartikler giftigheden af cadmium hos dafnier. C_{60} -molekyler øger derimod giftigheden af tjærestoffet phenanthren, formentlig ved at transportere mere phenanthren ind i dafnien eller hen til et sted i organismen, hvor phenanthren alene ikke har adgang til.



Figur 13. Algecelle omgivet af TiO_2 -nanopartikler, der er klumpet sammen efter at være kommet i kontakt med vand.

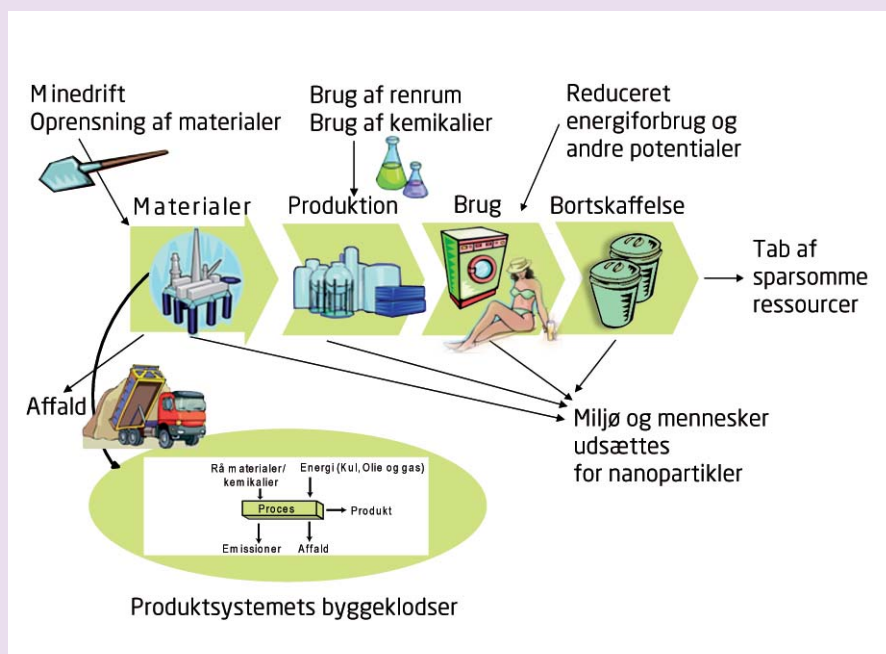
Nanomaterialets livscyklus

Vi ved i dag ikke, om man er nødt til at lave risikovurdering for hver enkelt nanomateriale, eller om det er muligt at generalisere ud fra nogen overordnede egenskaber ved materialerne. Som nævnt afhænger nanopartiklernes egenskaber ikke blot af materialet, men også af partikelstørrelsen. Forskerne regner med, at det er nødvendigt at undersøge mindst ni forskellige egenskaber for at kunne vurdere et nanomateriales mulige giftighed. Det betyder et utal af kombinationsmuligheder, der gør risikovurderingerne komplicerede.

Det er uhyre vigtigt, at man så tidligt som muligt forsøger at vurdere mulige risici ved nanomaterialer, kigger på nytteværdien og eventuelt forsøger at begrænse risikoen ved materialerne (*figur 14*). Ideelt set burde man gøre dette allerede ved forskning og udvikling af nanomaterialer. Som du kan læse om i *boks 3*, er det nødvendigt at vurdere påvirkninger af mennesker og miljø i hele produktets livsforløb. Som forbrugere ser vi normalt kun det færdige produkt, der ligger på hylderne i forretningerne. Derfor forholder vi os også udelukkende til brugen af produktet og til, hvordan vi skal skille os af med det, når det er gået i stykker eller skal udskiftes. Men når produktet ligger i forretningen, har det allerede en 'rygsæk' af sundheds- og miljøbelastninger med sig. I denne rygsæk ligger de risici, der er forbundet med udvinding af råmaterialer, forarbejdning, produktion og transport.

Boks 3. Fra vugge til grav

I livscyklusvurderinger (også kendt som LCA: Life Cycle Analysis) opgøres de samlede miljøbelastninger set over hele et produkts livsforløb fra udvindingen af råmaterialer fra jorden, til produktet er bortskaffet. Hvis man bruger LCA allerede i udviklingsfasen af et produkt, er det muligt at nedsætte de samlede miljøbelastninger, allerede før produktet kommer på markedet. Man kan vurdere, hvor i et produkts livsforløb, der er størst risiko for, at mennesker og miljø udsættes for eksempelvis nanopartikler: Er det i produktionen, eller er det hos forbrugerne? I det første tilfælde er det muligt at beskytte arbejderne i produktionen, mens det kan være sværere at beskytte forbrugerne, hvis først produktet er kommet på markedet.

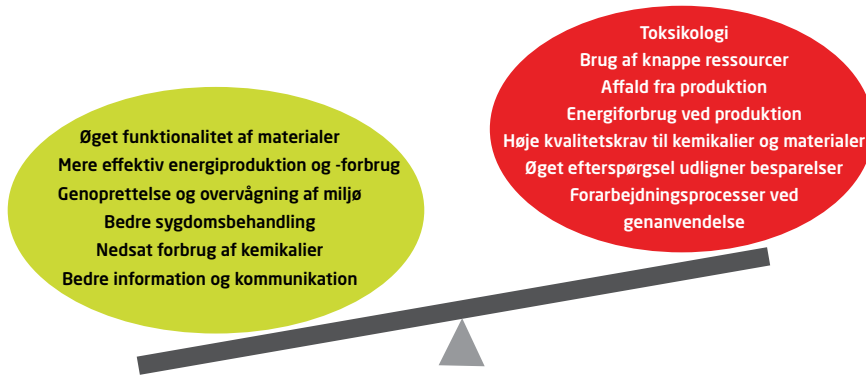


Materialer: I nanoteknologiske produkter anvendes ofte sparsomme ressourcer og sjældne metaller (som platin og palladium), som det kræver meget energi at udvinde.

Produktion: Produktionen af nanomaterialer finder ofte sted i ultrarene laboratorier (renrum), som det er meget energikrævende at holde rene.

Brug: Produkter med nanomaterialer giver ofte en energigevinst i brugsfasen, hvis de er designet til at bruge mindre energi.

Bortskaffelse: Når nanomaterialerne skal bortskaffes, kan de ikke adskilles fra produktet de sidder i og de sparsomme ressourcer går derfor tabt. For nogle produkter er der en risiko for at blive udsat for nanopartikler forskellige steder i livsforløbet.



Figur 14. Fordele (grønne) og ulemper (røde) ved nanomaterialer. Det er vigtigt at vurdere både fordele og ulemper, når vi beslutter os for at anvende eller begrænse brugen af et nanomateriale.

Nuværende regulering af nanomaterialer

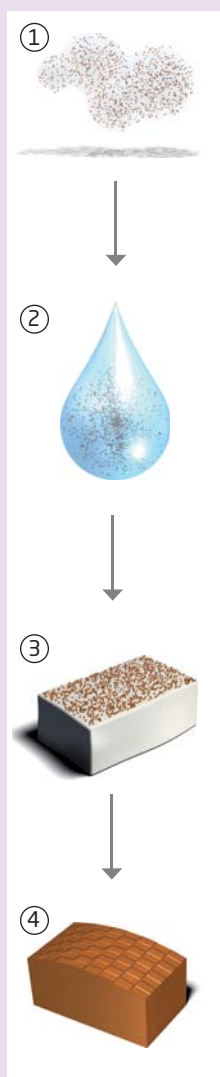
Nanomaterialer er på nuværende tidspunkt underlagt diverse lovgivninger på fødevarer-, miljø-, kemikalie-, arbejdsmiljø- og lægemiddelområdet både på nationalt plan og under EU's lovgivning. Bortset fra lægemiddelområdet, som er meget strengt reguleret, er problemet, at nanomaterialer generelt falder ind under forskellige undtagelser i disse lovgivninger, og dermed er nanomaterialer i dag ofte ikke reguleret særskilt.

Under den nuværende kemikalielovgivning skal kemikalier kun registreres (og eventuelt afprøves) på baggrund af deres kemiske sammensætning og fremstillingsmængde. Der skelnes ikke mellem almindelige materialer og nanomaterialer med hensyn til eksempelvis størrelse, overfladeareal eller andre af de egenskaber, som gør nanomaterialer unikke. Desuden er forsøgskrav til kemikalier baseret på de mængder, de bliver produceret i. For eksempel er der først krav om afprøvning af kemikalier på fisk, krebsdyr og alger, når de bliver produceret i over 10 tons per producent per år. Så store mængder fremstilles nanomaterialer meget sjældent i, og de unddrager sig derfor kravet om afprøvning i laboratorieforsøg.

Den store videnskabelige usikkerhed om risikoen ved nanopartikler og uklarhederne om, hvorvidt den nuværende lovgivning er tilstrækkelig til at beskytte sundhed og miljø, betyder, at anvendelse af forsigtighedsprincippet bliver diskuteret såvel internationalt som i Danmark. Her er det vigtigt at forstå, at anvendelsen af forsigtighedsprincippet ikke betyder, at man automatisk over en kam skal forbyde alt nanoteknologi og alle nanomaterialer. Forsigtighedsprincippet betyder blot, at alle reguleringstiltag er mulige, og at videnskabelig usikkerhed ikke må bruges som en undskyldning for ikke at gøre noget. Og der er meget, man kunne gøre: Man kunne for eksempel stille krav til, at producenterne offentliggør, hvad og hvor meget de producerer, og at de undersøger deres nanomaterialer og offentliggør resultaterne af disse forsøg.

Boks 4. Begrænsning af eksponering af nanopartikler

Eksemplet nedenfor viser, at ved at ændre på formen af et produkt med nanomaterialer, kan vi samtidig nedsætte risikoen for, at vi bliver udsat for materialet. Til at forhindre kalk på badeværelsesfliser kan man købe forskellige produkter, der ifølge producenten indeholder nanopartikler. Ved at bruge kategoriseringen af nanomaterialer i *boks 1* og de dertilhørende eksponeringsveje, som vi har beskrevet i dette kapitel, kan vi undersøge, om der kan opstå problemer ved anvendelse af et sådant produkt.



1. Hvis produktet skal sprayes ud på badeværelsesfliserne, er der stor risiko for indånding af nanopartiklerne og efterfølgende optagelse i kroppen. Ifølge *boks 1* går partiklerne fra at have været opløst i væske til at være luftbårne.

2. Problemet kan løses meget simpelt ved at sælge produktet i en håndpumpespray i stedet for i en almindelig spraydåse. På denne måde bliver dråberne større, når de sprayes ud, og risikoen for indånding er mindre. Nanopartikler forbliver altså opløst i væske ved brugen.

Man kunne også lave produktet om, så man i stedet for en spray solgte midlet som en væske, der skal påføres med en klud. Nanopartiklerne forbliver opløst i væsken, og risikoen for indånding er væk. I stedet må man overveje, om der er risiko for optagelse gennem huden.

3. En hel tredje løsning kunne være at fremstille badeværelsesfliser belagt med de nanopartikler, der er i spraydåsen. Så er risikoen for at partiklerne river sig løs og dermed risikoen for indånding og optagelse gennem huden minimal.

4. I stedet for at lægge partiklerne på overfladen, kunne man også lave fliser med en smudsafvisende nanostruktureret overflade. Ved denne nanoteknologiske løsning har man slet ikke brug for nanopartikler, og risikoen for optagelse gennem indånding eller hud er dermed lig nul.

Nanoteknologien rummer mange og store muligheder for forbedringer inden for så forskellige områder som energi, sygdomsbehandling og materialeudvikling, at det er vigtigt, at teknologiens udvikling ikke bremses unødigt. Her må vi huske, hvad tidligere tiders teknologiudvikling har lært os, nemlig at en succesrig og bæredygtig anvendelse af enhver ny teknologi afhænger af, at man finder ud af, hvordan man anvender den sikkert, før den bliver vidt udbredt. Historien er fuld af eksempler på teknologier, som er blevet anvendt uden omtanke, og disse har efterladt miljø- og sundhedsproblemer i deres kølvand. For nanoteknologien har vi en mulighed for at ændre denne tradition, fordi vi allerede tidligt er blevet opmærksomme på, at der er en risiko for sundhed og miljø knyttet til visse nanomaterialer. Heldigvis findes der gode muligheder for at begrænse eller helt at undgå uheldige bivirkninger ved nanoteknologiske produkter (boks 4). Det kræver, at virksomheder, forskere og produktudviklere fokuserer på at begrænse eksponeringen og indarbejder undersøgelser af nanomaterialernes miljøbelastning og sundhedsrisici på et tidligt tidspunkt i udviklingen af nanobaserede produkter. Hermed kan vi sikre, at nanoteknologiske produkter bliver bæredygtige gennem hele deres livscyklus fra den oprindelige opfindelse, til de ender som affald.



Kapitlets forfattere. Bagerst fra venstre: Lektor Anders Baun, Ph.d. studerende Steffen Foss Hansen og Lektor Stig I. Olsen. Forrest fra venstre: Ph.d. studerende Nanna Hartmann, Seniorforsker Mona Lise Binderup og Sektionsleder Henrik Rye Lam.