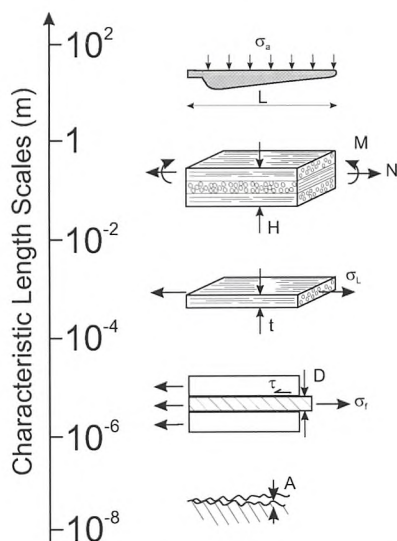


Mekanik på nanoskala: Forbedring af fiberkompositters egenskaber

Bent F. Sørensen og Stefanie Feih, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

Hvad er fiberkompositter?

Fiber-forstærket plast, som består af lange orienterede fibre i en grundmasse (matrix), har stor styrke/vægt forhold og anvendes derfor i stigende grad til lette, men stærke konstruktioner, som f.eks. vindmøllevinger, togvogne og skibe. Sådanne materialer kaldes *fiberkompositter* (sammensatte materialer), og kan skræddersys til at have helt specielle mekaniske egenskaber. For eksempel kan man fremstille komponenter som lagdelte strukturer (laminater), der består af lag (lamina) med forskellig fiberorientering. Et laminat kan have vidt forskellige stivheder i forskellige retninger. Et laminats stivhed kan med god nøjagtighed beregnes ud fra stivhederne af et lamina (lag med ensrettede fibre). Denne fremgangsmåde anvendes traditionelt til at give en komponent netop de stivheder, der ønskes.



Figur 1. Relevante længdeskala for fiberkompositter spænder fra nanometer (ruheder på fiberoverflade) til mange meter (længde af store komponenter).

Det er langt sværere at forudsige *styrkeegenskaber* af laminater af fiberkompositter end stivhedsegenskaberne. Det skyldes, at brud i kompositter, i modsætning til f.eks. brud i keramiske og metalliske materialer, ikke sker ved vækst af en enkelt revne, men ved udvikling af en skadeszone, hvori der er adskillige aktive skadesmekanismer. Det gode er, at det gør kompositmaterialer *skadestolerante*. Det betyder, at den allerførste skade (f.eks. brud i en enkelt fiber) ikke fører direkte til brud af komponenten. Bagsiden er, at hvis man vil forstå, hvordan brud udvikles i et komposit-

materialer, må man derfor prøve at finde ud af, hvordan brudmekanismerne udbreder sig alene og sammen på forskellig skala. De første skader udvikles på fiberniveau og vokser sammen på større og større skala og fører til sidst til brud af komponenten, se figur 1. I det efterfølgende beskrives de vigtigste brudmåder på de forskellige skala.

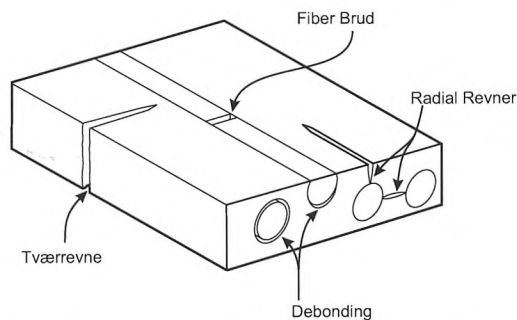
Nogle fakta:

I de fleste fiberkompositter er volumen af fibre omkring 50 volumen % eller højere. Fibrene har typisk en diameter på 10–20 μm . I en 50 meter lang vindmøllevinge er den samlede fiberlængde ca. 20×10^9 m. Det svarer til ca. 50 gange afstanden mellem Jorden og Månen. Det samlede overfladeareal af fibre er ca. 1 km^2 . Det svarer nogenlunde til arealet af 140 fodboldbaner.

Hvis vi forestiller os, at matrixmaterialet til vingen nu smøres ud som et jævnt lag på de 140 fodboldbaner, bliver tykkelsen mindre end 4 μm . Det er tankevækkende, at det i så store komponenter kan lade sig gøre at få fordelt matrixmaterialet mellem fibre.

Brudmekanismer på forskellige skala

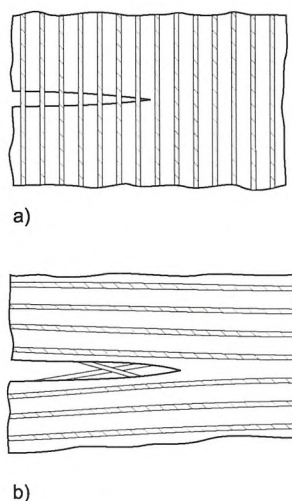
På fiberniveau er det naturligt at beskrive revner i forhold til fiberretningen. De vigtigste brudmekanismer på mikroskala er vist i figur 2. Hvilke brudmekanismer der udvikles, afhænger af belastningsretningen (parallelt eller vinkelret på fiberretningen). Matrixrevner, der udgår radiale fra fiberen kaldes *radiale revner*, og matrixrevner vinkelret på fiberretningen kan kaldes *tværrevne*, mens revner langs fiber/matrix grænsefladen kaldes *debond- revner*. Fibrene kan også bryde.



Figur 2. De vigtigste brudmekanismer på mikroskala.

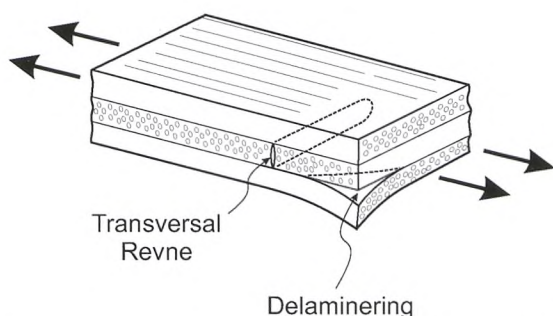
På lamina-skala er de to vigtigste brudmekanismer (se figur 3) revnevækst vinkelret og parallelt med fiberretningen (splitning). I begge tilfælde dannes der

ofte *fiberbrodannelse*, dvs. fibre der hænger fast på begge revneflader og derved hæmmer revneåbningen og -væksten. Hvis der udvikles mange fiberbrud, kan det føre til ustabil brud. Specielt for revner vinkelret på fiberretningen (figur 3a), sker der *glidning* i grænsefladen mellem fiber og matrix.



Figur 3. Brudmekanismer på lamina-skala: Revnevækst vinkelret og parallelt med fiberretningen.

På laminat-skala kan der udvikles yderligere brudmekanismer (figur 4). De vigtigste er *delaminering* og *transversale revner* i lag orienteret vinkelret på trækretningen. Ved delaminering, dvs. revnevækst mellem forskellige lamina, kan der også udvikles fiberbrodannelse. Transversale revner, dvs. revner parallelt med fiberretningen, kan udvikles når der er store trækspændinger vinkelret på fiberretningen.



Figur 4. Brudmekanismer på laminat-skala: Delaminering og tværrevner.

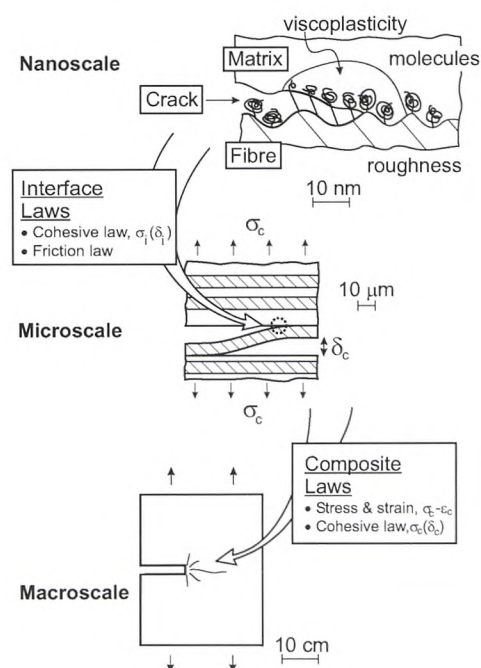
Nanoparametre styrer mikroskala egenskaber

Kigger man nærmere på brudmekanismerne på lamina-skala (figur 3), opdager man at fiberbrodannelsen aktiverer to grundlæggende mekanismer på mikroskala: separation mellem fiber og matrix (debonding) og friktionsstyret glidning i grænseflade mellem fiber og matrix. *I begge tilfælde er det altså grænsefladens egenskaber, der er styrende.* Debonding styres af vedhæftningen mellem fiber og matrix, mens friktionen

delvis styres af overfladeruhederne på fibre. Der følger heraf, at hvis man har metoder til at styre vedhæftningen mellem fibre og matrix samt fibrenes overfladeruhed, så besidder man værktøjet til at skræddersy laminaters styrkeegenskaber. Imidlertid er det netop her, at den grundlæggende viden mangler. Derfor har vi startet et forskningsprojekt, med det formål at etablere en sammenhængende viden om, hvordan manipulation af fibrenes overflader kan føre til markante forskelle i kompositmateriales styrkeegenskaber.

Et nyt STVF-rammeprogram er netop igangsat

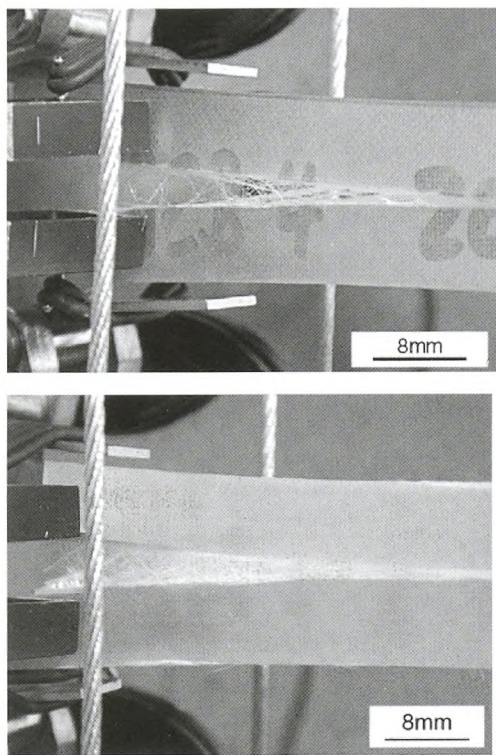
Det nye forskningsprojekt støttes af Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd (STVF) med 11 mill. kr. over 4 år, gennem et såkaldt Rammeprogram, som dækker tre ph.d.-studerende og tre post docs. I projektet vil vi variere vedhæftningen mellem fiber og matrix mellem svag (dvs. næsten ingen vedhæftning) og stærk binding (så debonding ikke finder sted). Friktionen styres gennem overflade topologien, der varieres mellem glat og ru. Ideen er skitseret i figur 5.



Figur 5. Den mekaniske opførsel af grænsefladen, som styres med kemi og overfladeruhed, beskrives gennem grænseflade love, som udgør forbindelsen mellem overflader på mikroskala. Mikromekaniske modeller forudsiger komposit love, som på makroskala repræsenterer brudprocesser i en kontinuumsmodel, hvor kompositmaterialet betragtes som et homogent anisotrop kontinuum.

En stærk vedhæftning kan skabes ved at fastgøre lange molekylekæder på fiberoverfladerne. Under efterfølgende debonding, vil de lange molekyllkæder trækkes ud; derved forøge energioptagelsen. I mekanikkens verden kan denne debonding-proces beskrives ved en såkaldt *kohæsiv lov*, som er sammenhængen mellem brudzonens strækning og den resul-

terende spænding. Overfladeruhederne på fibrene kan styres ved f.eks. litografiske metoder eller ætsning under kontrollerede forhold. I projektet vil vi undersøge to systemer: En glasfiberkomposit og en kulfiber komposit. Disse systemer har stor praktisk interesse for de to deltagende virksomheder, LM Glasfiber A/S og NKT-Flexibles.



Figur 6. Revnevækstforsøg med revne parallel med fiberretningen. Det ses, at laminatet med svagere fiber/matrix vedhæftning (øverst) frembringer mere fiberbrodannelse end standardmaterialet (nederst).

Ideen med at styre de makroskopiske styrkeegenskaber gennem overfladebehandling af fibrene er ikke ny. Kommerciel glasfiber produceres med en overfladebelægning, en såkaldt sizing, som dels tjener det formål at beskytte fibrene under fremstillingen, dels at sikre god vædning mellem fiber og det viskøse matrixmateriale før hærdning, samt efterfølgende at sikre en "passende stærk" binding mellem fiber og matrix. Men på nuværende tidspunkt eksisterer der ikke tilstrækkelig viden til, at denne overfladebehandling kan optimeres.

Vi forventer, at maksimal styrke og maksimal revnevækstmodstand (sejhed) opnås ved forskellige grænsefladeegenskaber. En stærk binding giver ikke nødvendigvis de bedste styrkeegenskaber. Vi har allerede fundet, at en svagere fiber/matrix binding kan give en forøget fiberbrodannelse (se figur 6), som fører til en større revnevækstmodstand. Der er interessant, at man kan gøre et materiale stærkere på makroskopisk niveau ved at gøre det svagere på nano- og mikroniveau.

En anden central problematik er måling og modellering af kohæsive love for fiber/matrix grænse-

fladen. I første omgang testes plane emner ved brudmekaniske forsøg i ESEM (environmental scanning electron microscopy), hvorved brudzoner kan studeres under stor forstørrelse. Finite-element simuleringer anvendes til at identificere de kohæsive love. Andre testmetoder, som f.eks. enkelt-fiber udtrækningsforsøg samt fiberfragmenteringsforsøg, undersøgelser med nano-Raman koblet med SPM (Scanning Probe Microscope) samt evt. røntgen mikrotomografi tænkes også anvendt. Kompositgenskaber forudsiges ved mikromekanisk modellering, f.eks. ved anvendelse af enhedscelle ("unit cell") modeller.

Projektet er tværdisciplinært. Det spænder over polymerkemi og overfladekarakterisering, fremstillingsmetoder, mikromekanik og materialekarakterisering. Forskningsprojektet udføres af et team af forskere fra Afdelingen for Materialeforskning og Polymercenteret på Forskningscenter Risø, fra Aalborg Universitet, Force Technology samt virksomhederne LM Glasfiber A/S og NKT-Flexibles I/S. LM Glasfiber A/S er verdens største vindmøllevejsfabrikant og NKT-Flexibles fremstiller rør til off-shore industrien.

Opsummering

Brud i fiberkompositter er kompliceret, men byder på spændende udfordringer for materialeforskningen. Det er fascinerende, at de mekaniske egenskaber af store komponenter afhænger af det mekaniske samspil mellem fibre og matrix, altså af de mekaniske egenskaber af fiber/matrix grænsefladen. Vi regner med inden for de nærmeste år, at kunne opbygge en sammenhængende forståelse af, hvordan kemi og mekanik spiller sammen i kompositmaterialer fra nanoskala til makroskala.

Referencer:

[1] www.risoe.dk/interface



Bent F. Sørensen er seniorforsker ved Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.



Stefanie Feih har været post doc i to år ved Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.