

# Kulfiberforstærkning af betonkonstruktioner

Christian Brix Roed



# Agenda

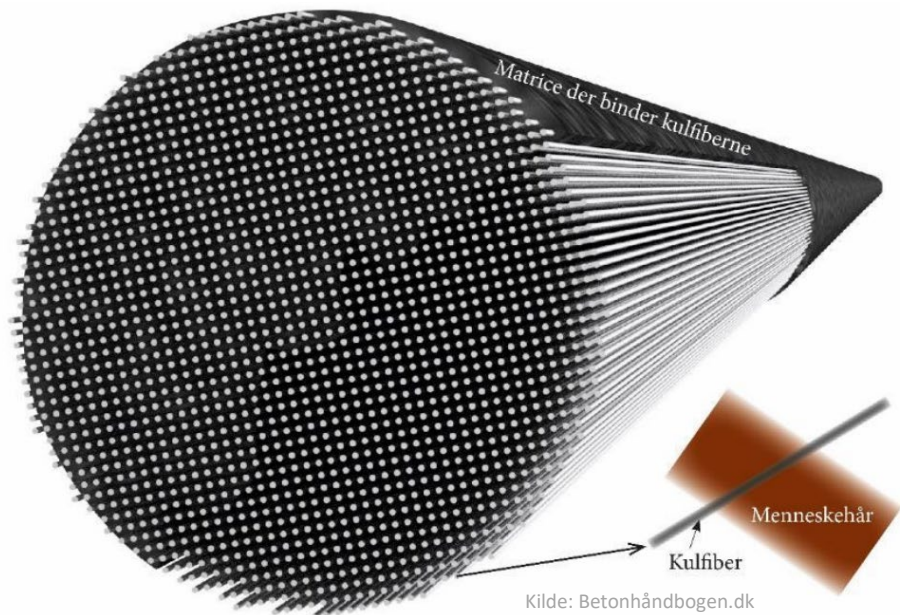
- Hvem er oplægsholderen?
- Hvad er kulfiber?
- Hvordan kan kulfiber bruges i byggeri?
- Forstrækning af betonkonstruktioner med kulfiber
- Normer
- Opsummering – Fordele og ulemper

# Hvem er oplægsholderen?

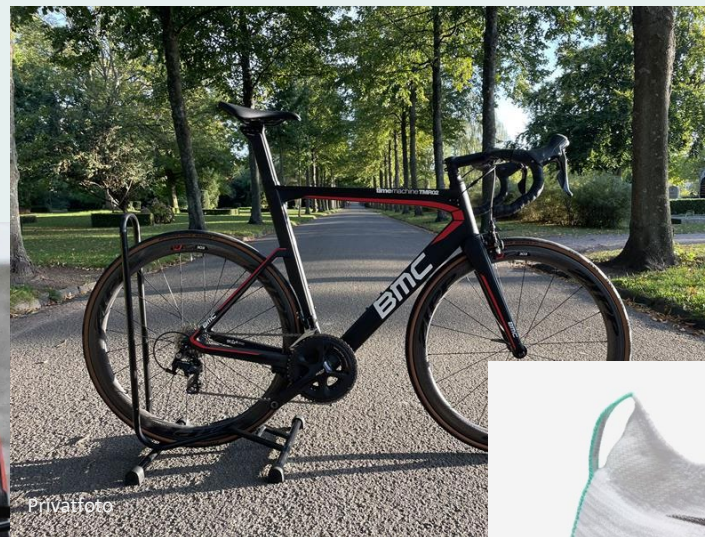
- 2011 – 2016 Civil ingeniør inden for konstruktioner
  - Chalmers University of Technology (Gøteborg)
- 2016 – 2020 Konstruktionsingeniør hos VBK i Gøteborg
- 2020 – 2022 Teknisk sælger S&P Reinforcement Sverige
- 2022 – 20.. Konstruktionsingeniør hos Artelia København



# Hvad er kulfiber?

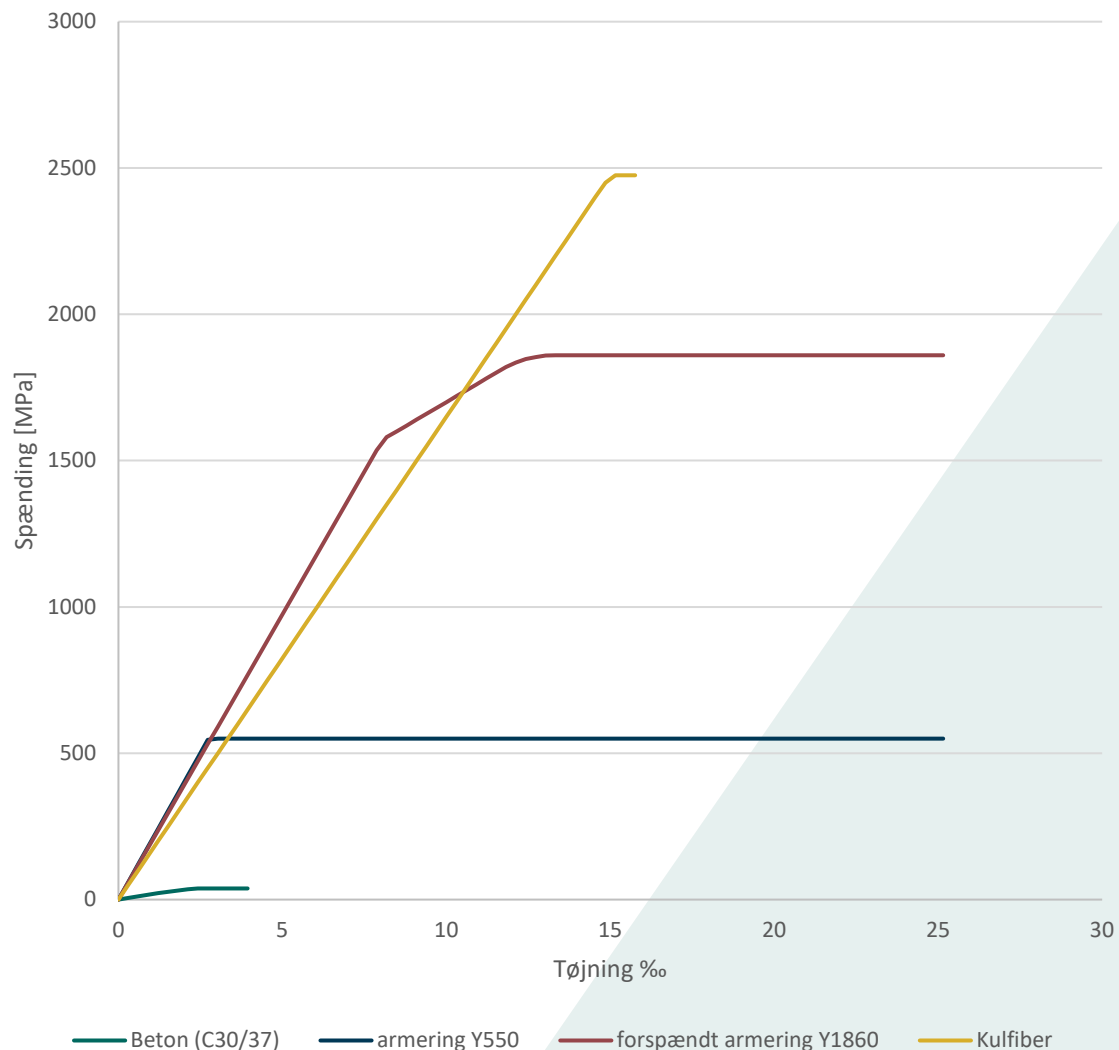


- Kemisk fremstilling
- Tynde tråde bestående af kulatomer
- Støbes ind i en plastmatrise (epoxy, vinyl..)
- Kulfiberkomposit = CFRP = kulfiber + plastmatrice



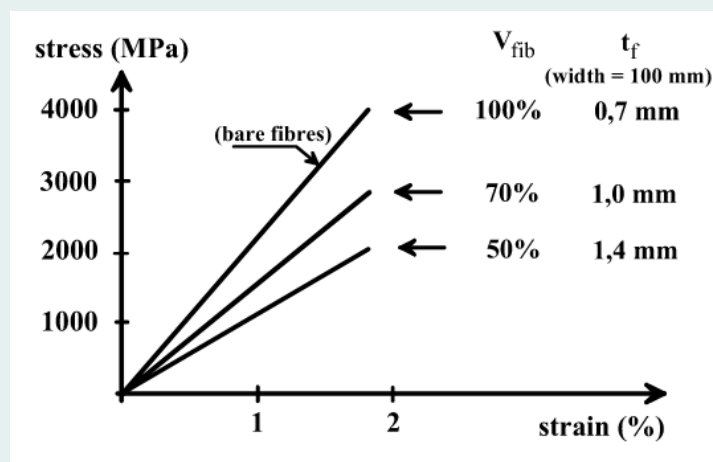
# Hvad er kulfiber? - Egenskaber

- Meget høj trækbrudspænding i fiberretningen - 4 til 5 gange højere Y-stål.
- Stivhed svarende til armeringsstål i fiberretningen.
- Materiale densitet på 1,6-1,8 g/cm<sup>3</sup> - Ca. 20-25% af densiteten for stål
- Lineær-elastisk til brud.
- OBS. Kulfiberkomposittens mekaniske egenskaber påvirkes af fremstillingsprocessen samt fiberindholdet.



E-modul [GPa]	Brudspænding [MPa]	Brudtøjning [%]	Temperaturudvidelseskoefficient [x10 <sup>-6</sup> /°C]
200-260	2000-3300	9-16	-1 to 0
160-170		14-18	

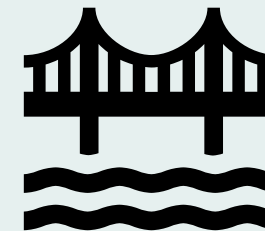
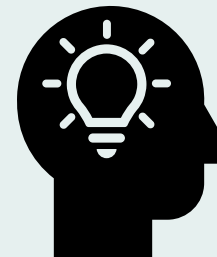
Kilde: Betonhåndbogen.dk



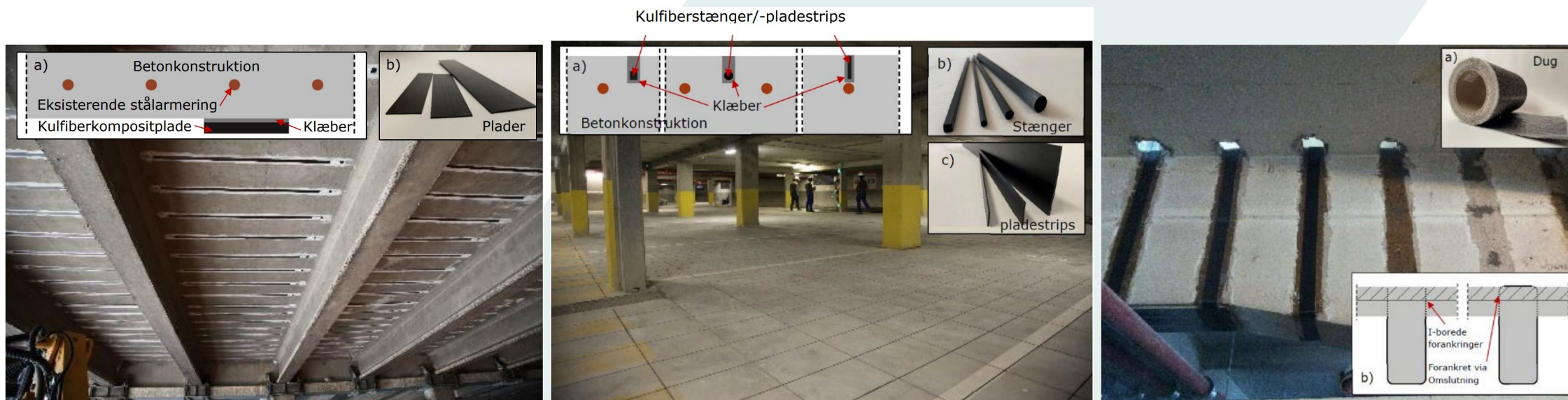
Kilde: FIB bulletin 14

# Hvordan kan kulfiber bruges i byggeri?

- 1970'erne: Ny forstærkningsmetode til betonkonstruktioner
  - Pålimning af stålplader på betonkonstruktioner.
    - + Effektiv og hurtig forstærkningsmetode
    - Tungt at installere
    - Stødplader ved samlinger
    - Rustproblemer



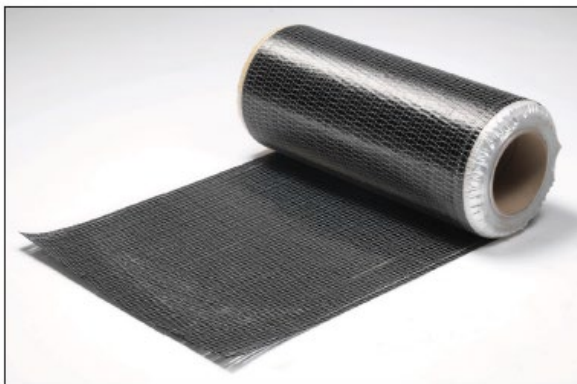
- 1980'erne: Den første betonkonstruktion forstærkes med kulfiber i Japan.
- 1990'erne: De første betonkonstruktioner forstærkes med kulfiber i Europa.



Kilde: Betonhåndbogen.dk

# Produkter til kulfiberforstærkning af betonkonstruktioner

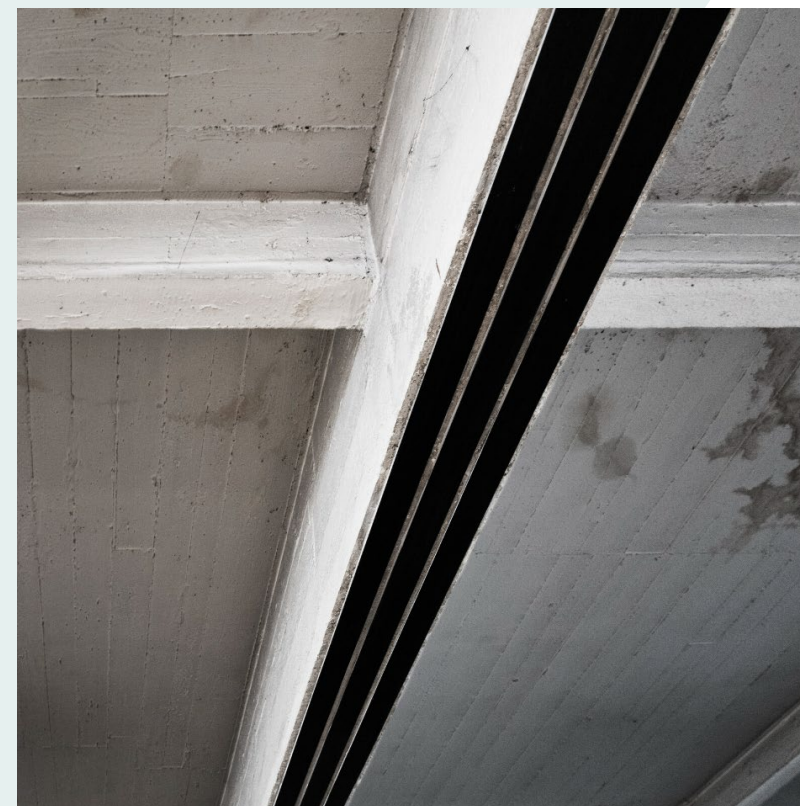
- Et kulfiberforstærkningssystem består af tre dele:
  - Kulfiberkompositmateriale
  - Klæberen (to-komponent epoxyresin)
  - Betonen



Kilde: SP-reinforcement.dk



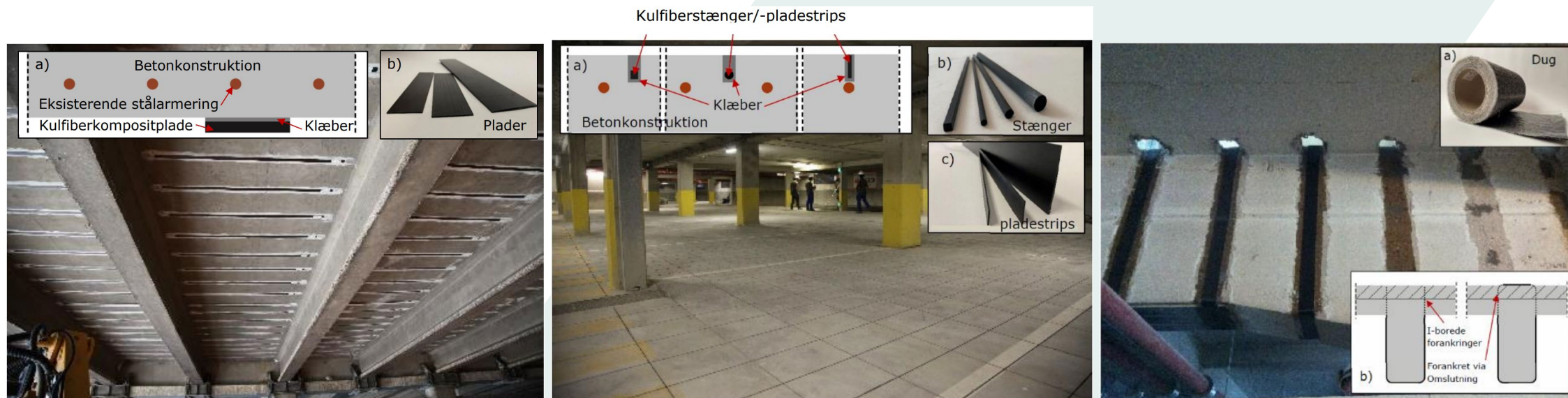
Kilde: tilsynsbillede



Kilde: SP-reinforcement.dk

# Produkter til kulfiberforstærkning af betonkonstruktioner

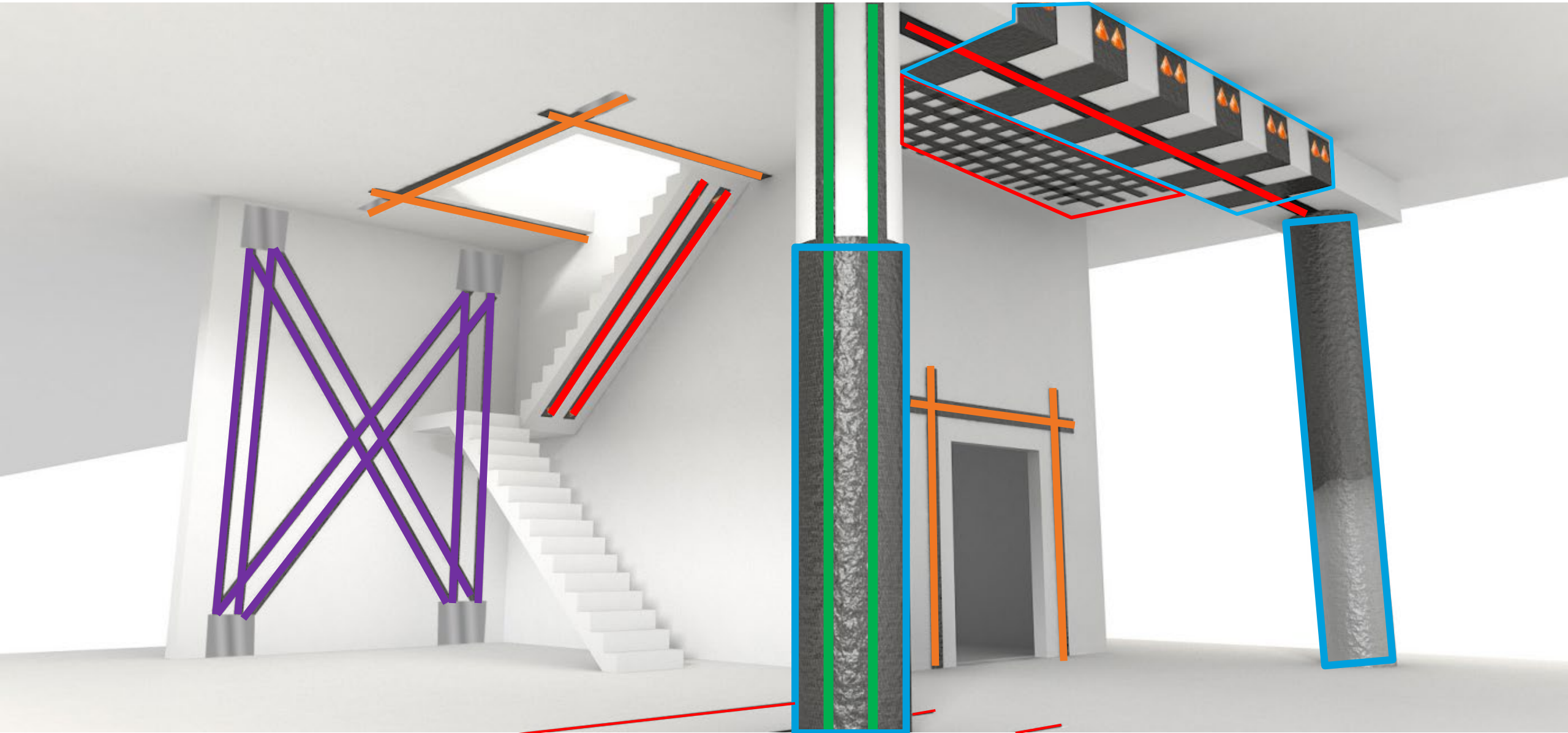
- Der er tre typiske fremgangsmåder til udførelse af kulfiberforstærkning.
  - Externally bonded (EB): Pålimning af kulfiberplader på betonens overflade.
  - Near surface mounted (NSM): Kulfiber kompositter som limes ind i fræsedede riller i betonens dæklag.
  - Hand lay-up (insitu): Pålimning af rå kulfiberdug på betonens overflade.



Kilde: Betonhåndbogen.dk

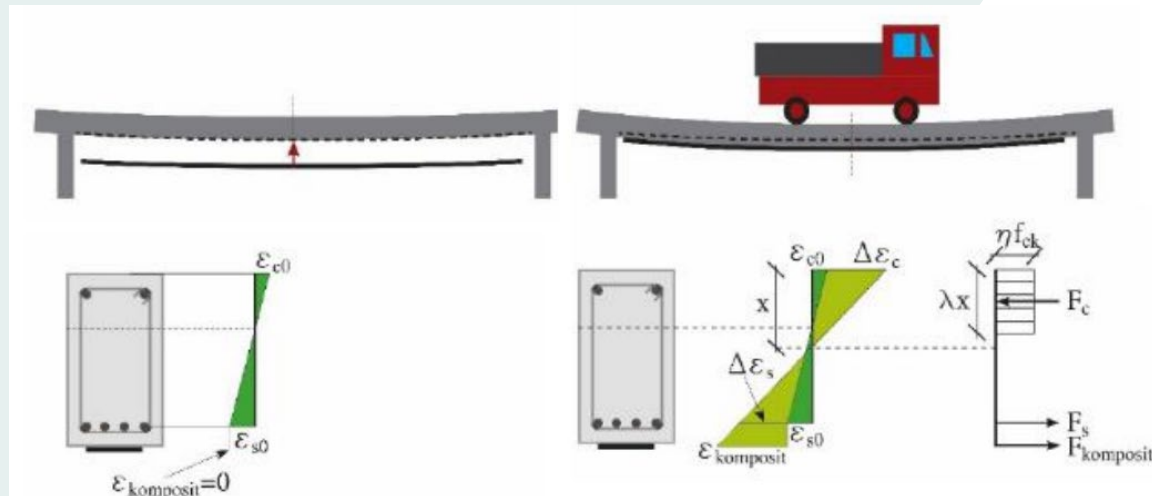
# Forstærkning af bærende konstruktioner med CFRP

Bøjning   Forskydning   Søjlevirkning - udknækning   Søjlevirkning - normalkraft   Stabilitet   Lokale forstærkninger



# Hvordan virker det?

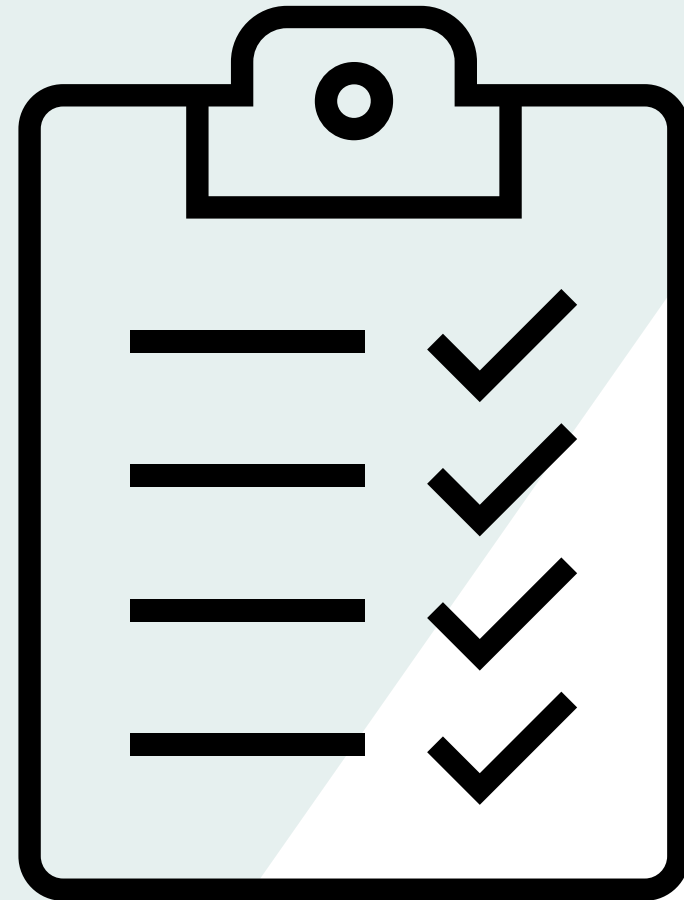
- Hookes lov er gældende
  - $\sigma = E * \varepsilon$
- Kulfiber kræver en tøjning for at udvikle en kraft
  - $F = E * A * \varepsilon$
- Kulfiberkompositten er kun effektivt for den last som påføres konstruktionen efter den er monteret.
- Konstruktionens deformationen bør være så lille som muligt når kulfiberkompositten monteres.



Kilde: Betonhåndbogen.dk

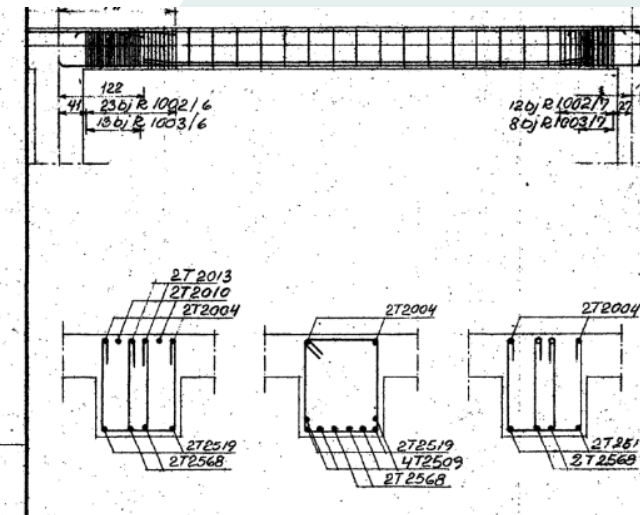
# Projektering af bøjningsforstærkning

1. Forundersøgelse af den eksisterende konstruktion.
2. Eftervis konstruktionen for fremtidig ulykkesgrænsetilstand (brand).
3. Analyser tværsnittets tøjning og spændinger i montagetilfældet.
4. Beregn det nødvendige mængde kulfiber.
5. Kontroller materiale spændinger i anvendelsesgrænsetilstand
  - Eller tilpas kulfibermængde (4)
6. Kontroller delamineringsbrud.
  - eller tilpas kulfibermængde (4)
7. Eftervis forskydningsbæreevnen.



# Forundersøgelser

- Årsag til forstærkning
  - Øget lasteffekt, skader, ændret statisk system.
- Eksisterende konstruktion
  - Betongemetri, tryk- og trækstyrke.
  - Armeringsareal, kvalitet og placering.
- Statisk system
  - Statisk system inden og efter forstærkning.
  - Eksisterende og fremtidige belastninger og snitkræfter.
- Reparation af eksisterende konstruktion.
  - Forstærkningen må ikke svækkes af kendte skader i dennes levetid.



Fotodokumentation: Kerneboring og makroanalyse

Prøve nr: K1

Konstruktion: Tagdæk



Foto 4.2.1: Kerne K1. Fotoet viser kernen efter udtagningen.

Foto 4.2.2: Kerne K1. Fotoet viser borehullet. Der er ingen synlige revner i borehullet.

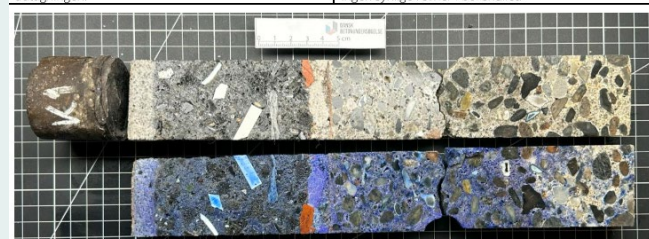
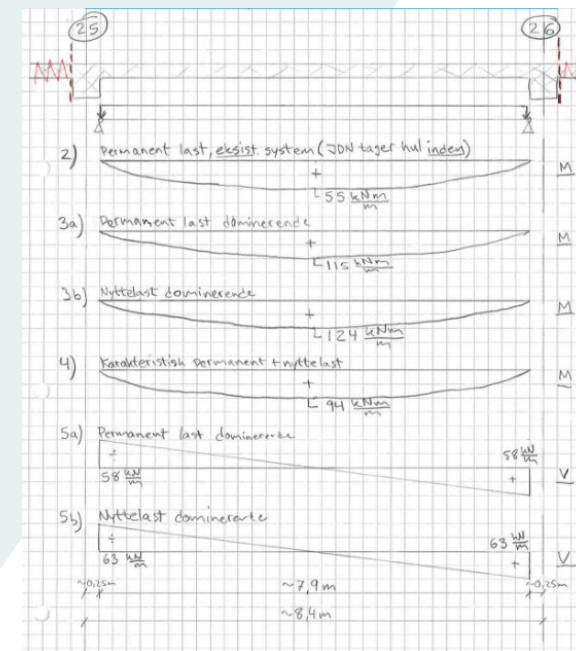


Foto 4.2.3: Kerne K1. Den gennemskårne kerne med oversiden (boresiden) tv. Nederste kernehælvedel er påført pH-indikator (ukarboniseret pasta fremstår lilla).



# Forundersøgelse

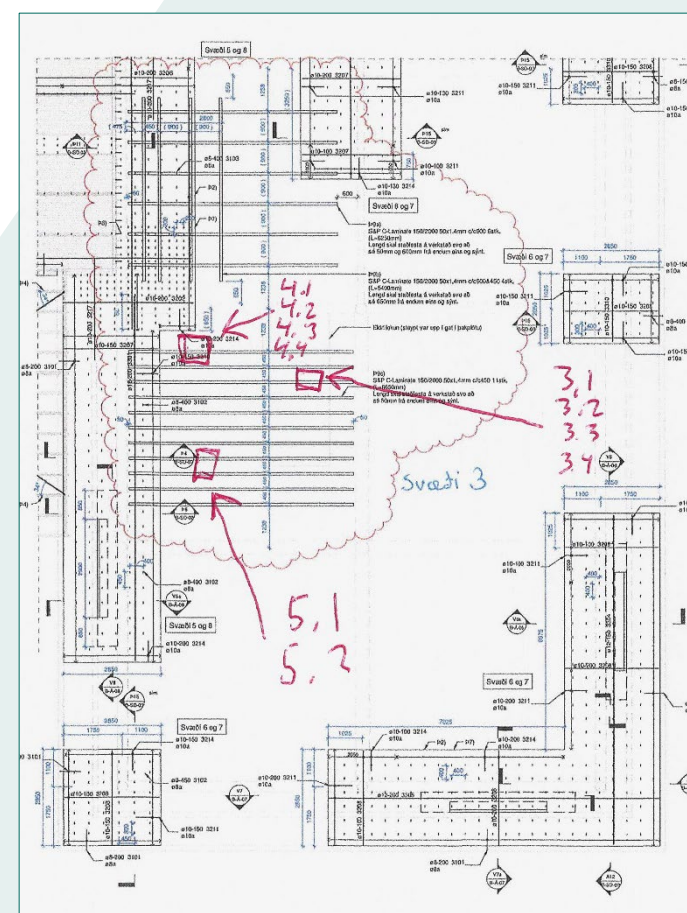
- Betonens trækstyrke skal testes (DS/EN 1542) og udregnes ud fra 5% fraktilen iht. DS EN 1990 annek D.

Punkt:	Aftræksstyrke [MPa]	Afvigelse [MPa]	Brudtpe
ID	$x_i$	$(x_i - x_m)^2$	
4.1	4,50	0,01	Intet brud
4.2	4,40	0,03	Intet brud
4.3	4,50	0,01	Intet brud
4.4	4,90	0,11	Intet brud
Total	18,30	0,15	
Antalprøver	n	4	stk.
Gennemsnit (middeltal)	$m_x = x_i/n$	4,58	MPa
Standard Afvigelse (spredning)	$s_x = (1/(n-1) * \sum (x_i - m_x)^2)^{0,5}$	0,22	-
Variationskoefficient	$V_x = s_x / m_x$	0,05	-
Min. værdi for var. Koeff.	$V_{x,min}$	0,10	-
Reduktionsfaktor (Tabel D1)	$k_n$	2,63	-
Karakteristisk værdi	$X_{k(n)} = m_x * (1 - k_n * V_x)$	3,37	MPa

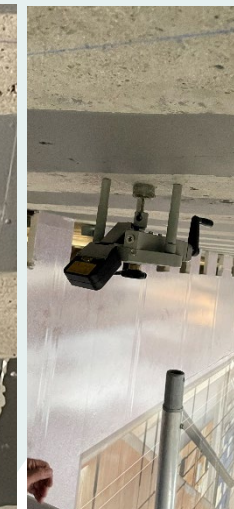
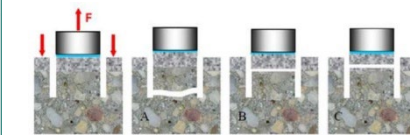
Table D1 : Values of  $k_n$  for the 5% characteristic value

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ known	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_x$ unknown	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

NOTE 1 This table is based on the Normal distribution.



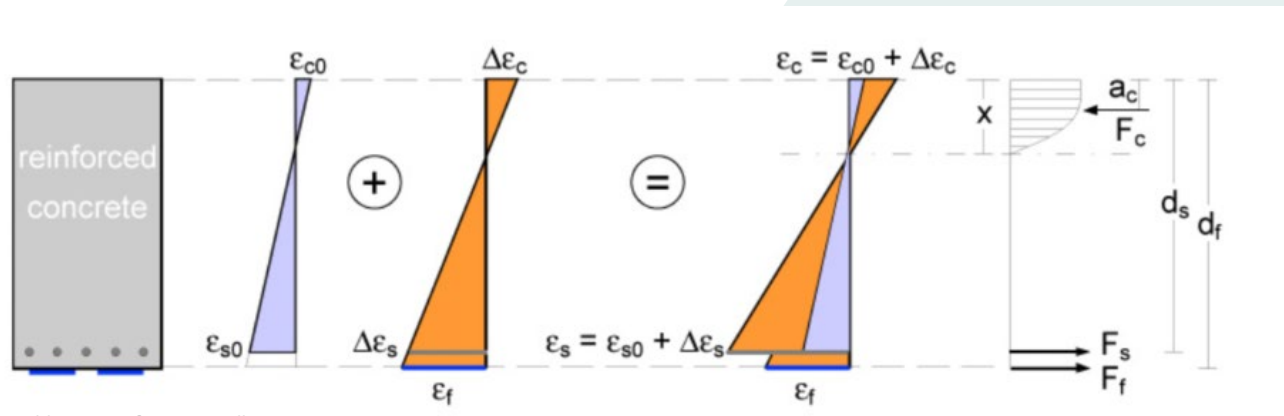
Kilde: SP-reinforcement.dk



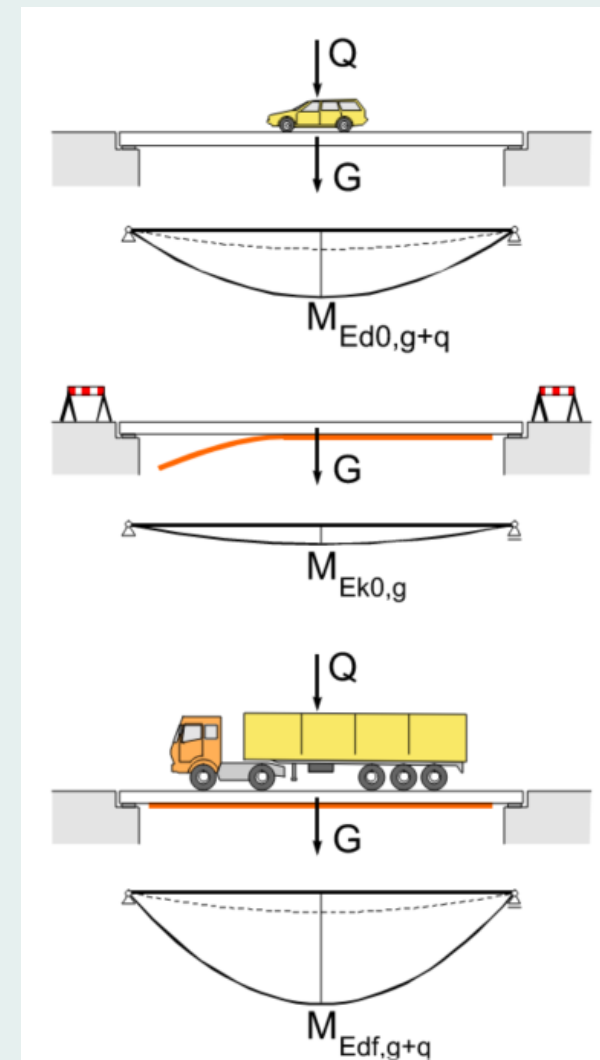
Kilde: Tilsynsbilleder

# Bøjningsforstærkning - tværsnitsanalyse

- Almindelige arbejdskurver og brudspændinger er gældende for beton stål, og kulfiberkomposit.
- Almindelig bjælketeori er gældende: Plane tværsnit forbliver plane (Bernoullis princip).
- Materiale tøjninger i montagetilfældet er udgangspunktet for beregningen i brudgrænsetilstand.
- Tværsnittets kraftvektorer skal være i ligevægt.
  - $F_c = F_s + F_f$
  - $F_c * a_c = F_s * d_s + F_f * d_f$
- Forankringen til betonen skal kontrolleres!



Kilde: SP-reinforcement.dk



Kilde: SP-reinforcement.dk

# Bøjningsforstærkning - delaminering



Kilde: Betonhåndbogen.dk

- Delaminering = afskalning = debonding
- Kulfiberkompositten løsriver sig fra betonen
  - Høje spændinger i forankringszonen.
  - Revner i forankringszone.
  - Store revne dannelser.
  - Koncentrerede laster.
- Betonens trækstyrke begrænser hvor meget kraft der kan overføres mellem kulfiber og beton → Betonen er det svage led.
- Delamineringsbrud sker pludseligt (uvarslet). !

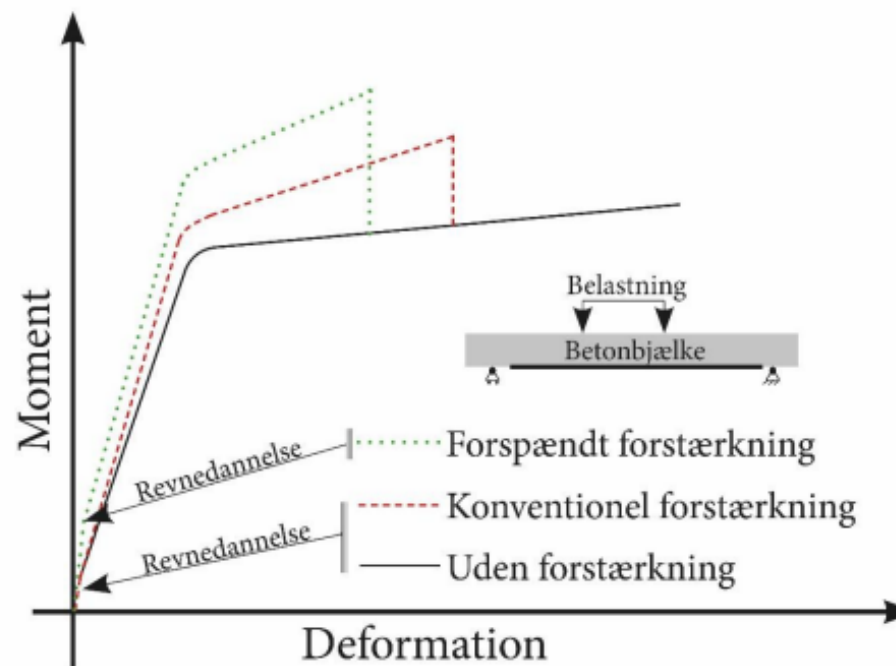
# Bøjningsforstærkning - Brudscenarier

## Semi-duktilt brud

- Flydning i stålarmring efterfulgt af betonknusning
- Flydning i stålarmring efterfulgt af brud i CFRP
- Flydning i stålarmring efterfulgt af delaminering

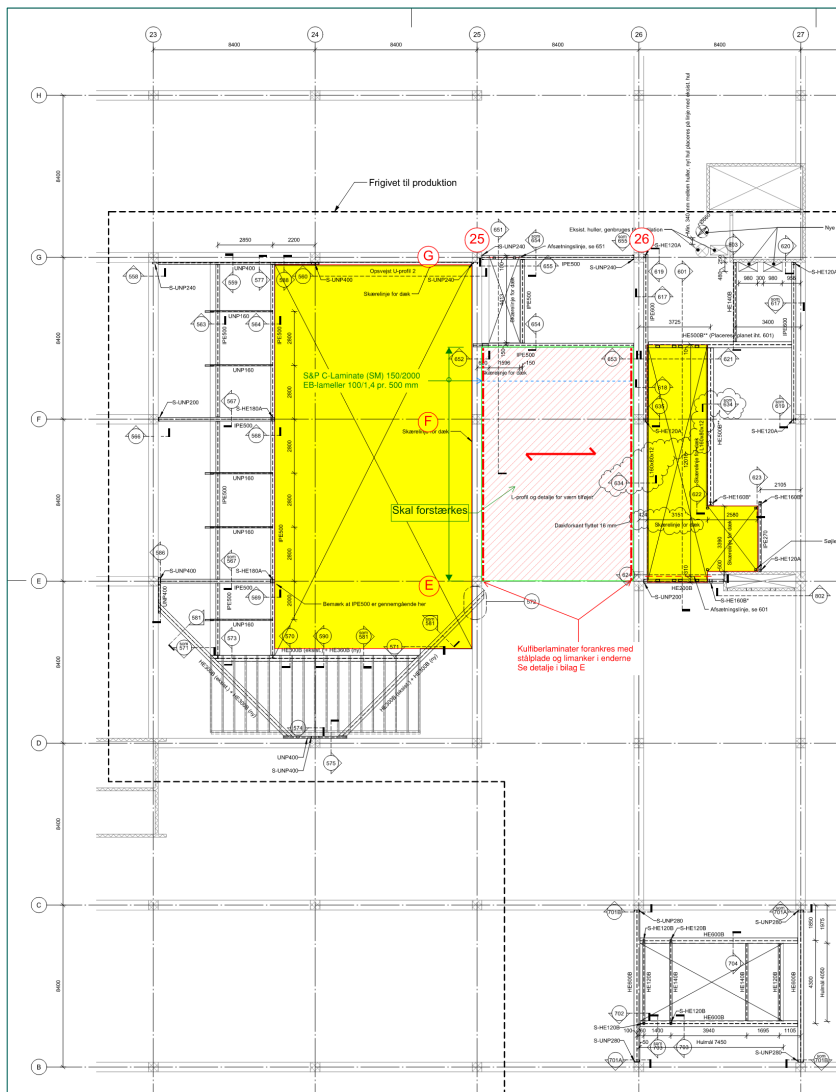
## Sprødt brud

- Betonknusning inden stålarmringen flyder
- Delamineringsbrud inden stålarmringen flyder

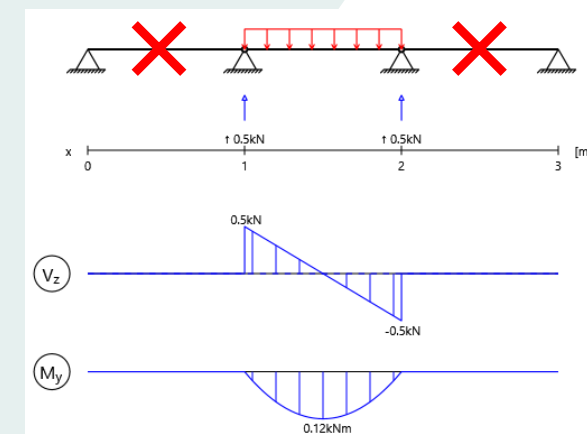
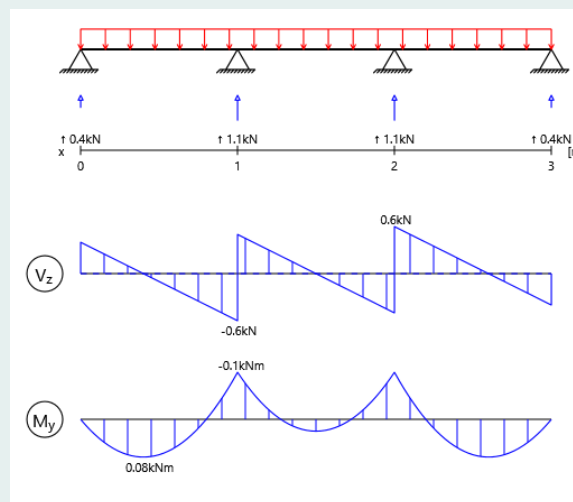


Kilde: Betonhåndbogen.dk

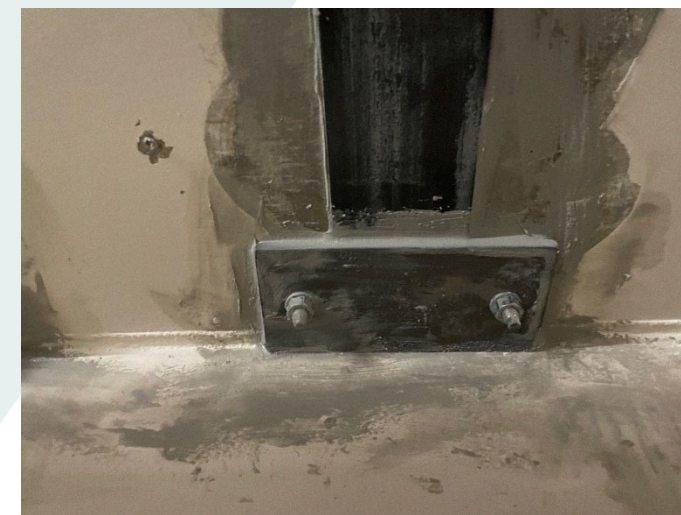
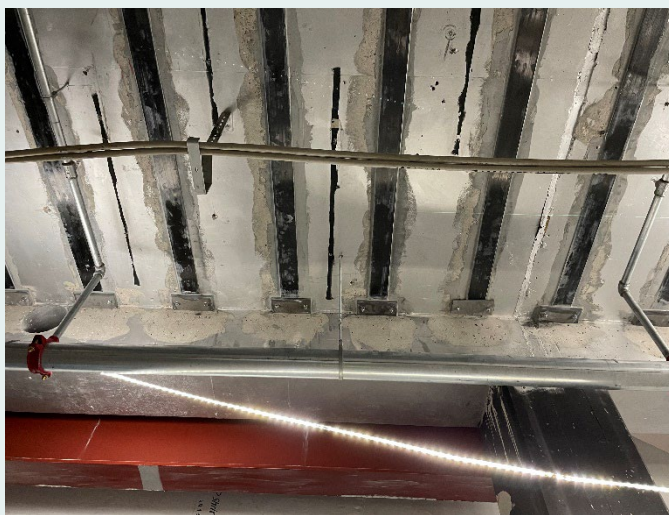
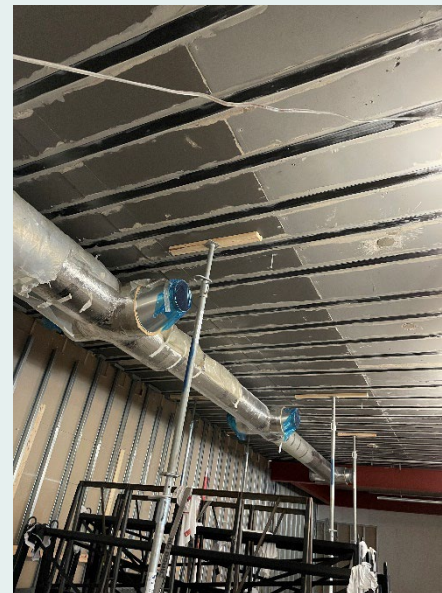
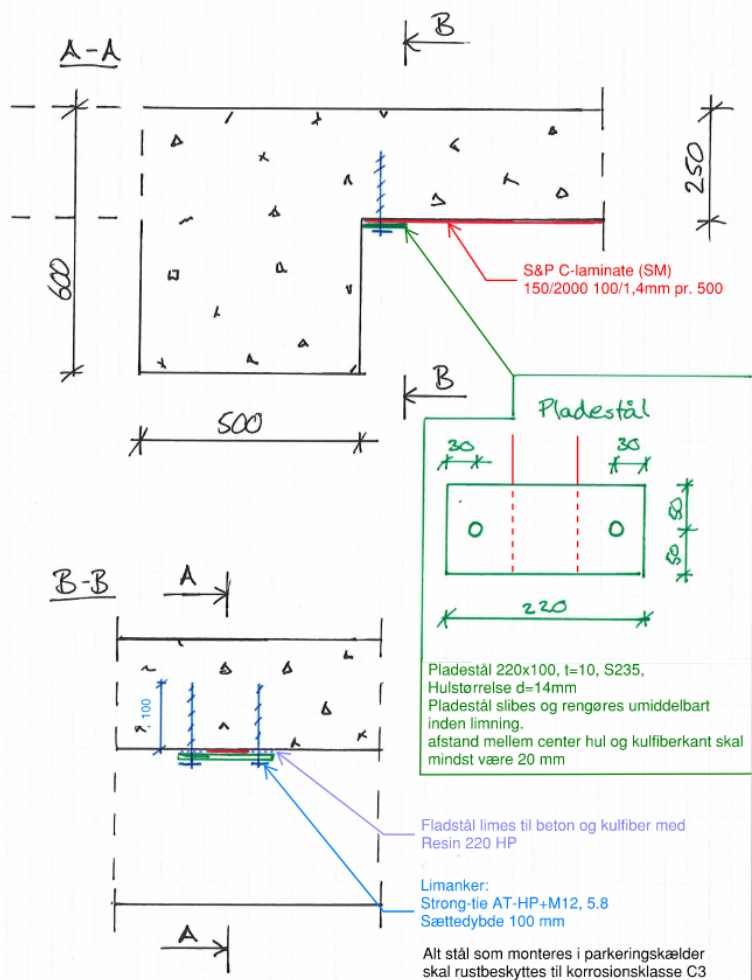
# Bøjningsforstærkning - Eksempel



- Der skal etableres huller i et kontinuert etagedæk
  - **Gule markeringer:** Huller
  - **Rød skravering:** forstærket dæk
- Feltmomentet stiger når indspænding over understøtninger forsvinder.



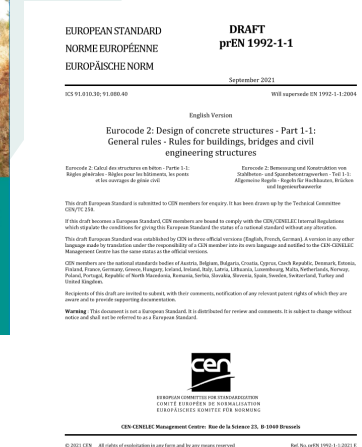
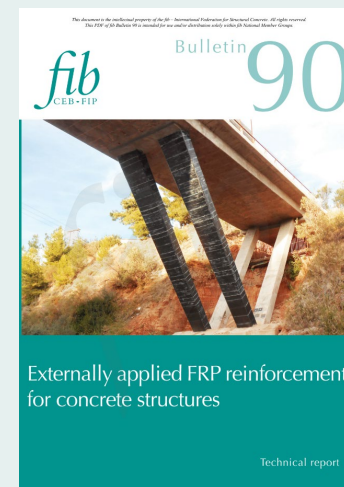
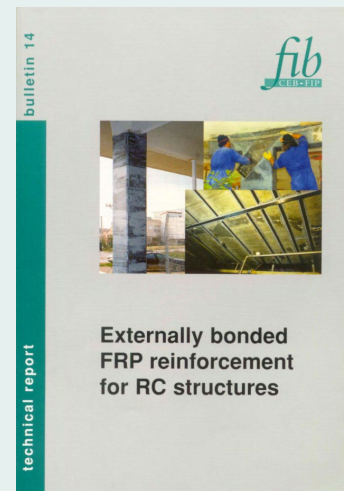
# Bøjningsforstærkning - Eksempel



Kilde: Tilsynsbilleder

# Normer og litteratur - Tidslinje

- FIB bulletin 14 (2001)
- Eurocode (2004-2007)
- Nationale annekser til Eurocode (2004-2010)
  - Schweiz, Tyskland, Italien, Frankrig, UK, Holland, (Norge)
- ETA godkendelser fra producenter
  - SIKA, Sto, S&P reinforcement, Mapei...
- FIB bulletin 90 (2019)
- Foreløbigt informativt annekse i prEN1992-1-1:2021 E
  - Annekse J: Strengthening of Existing Concrete Structures with CFRP
  - Annekse JA: Embedded FRP Reinforcement (New structures)



# Kulfiber som byggemateriale – fordele og ulemper

## Fordele

- + Forstærker det bærende system i stedet for at erstatte det.
- + Ruster ikke.
- + "Usynligt" (konstruktionshøjde 1-5 mm).
- + Fleksibel og enkel installation.
  - + Lav egenvægt.
  - + Længder tilpasses på byggepladsen.
  - + Kan monteres over eksisterende installationer.
  - + Selvklæbende – ingen behov for understøtning.

## Ulemper

- Sprødt materiale.
- Ingen CE-mærkning for kulfiber.
- Omfattes ikke af Eurocode... endnu.
- Konstruktionen skal eftervises uden kulfiberforstærkning i brandtilfældet.
- Kan påvirke konstruktionsklassen.
- Kræver vinterforanstaltninger ved installation.
  - Min 10 grader og min. 3 grader over dugpunkt.

