

---

# Træbro og valg af nye bæredygtige løsninger

## Vejforum

4. december 2024 Nyborg Strand

Inge B. Damsgaard (Vejdirektoratet) og Leo Gamborg Graven (COWI)

# Ny stibro Randers C - TSA 40



**E 45**  
**Randers**  
2024 - 2026

**E 45**  
**Aarhus S-N**  
2023 - 2027

**E 45**  
**Vejle-Skanderborg**  
2023 - 2027

**E 45 E 20**  
**Kolding**  
2025 - 2028



# Dagsorden

- Baggrund og rammer
- Helhedsorienteret tilgang med optimeringer på flere parametre
- Udfordringer
- Overvejelser i designfasen og det at bygge en træbro i DK
  - Træbroers klimaaftryk
  - Træbroer i DK
  - Træbro ved TSA 40
  - Læring fra projektet



# Baggrund

- En del af projektet for ombygning af tre tilslutningsanlæg ved Randers
- Gennemført MKV i 2018-2020
- Infrastrukturplan (IP35) - Juni 2021
- Igangsat 2022
- Projektering 2022-2023
- Opstartet i marken 2024 og afsluttet efterår 2025



# Skitseprojekt og valg af løsning

## Mindset:

- Vil gerne afprøve alternative materialer og løsninger
- Vil gerne understøtte den grønne omstilling
- Bæredygtighed og optimeringer skal være i fokus fra start
- Vigtigt, at der i planlægningen er afsat tilstrækkelig tid til at kunne vurdere og arbejde med de rigtige løsninger



# Funktionskrav til bro

- Broløsning tæt op mod eksisterende bro
  - Behov for støttevæg til at holde skråningen op mod vejbroen
- Forberede til senere udbygning af E45 til 6 spor
  - Dybe fundamenter
- Fokus på arbejdsmiljø under udførelse
- Minimal gener for trafikanter under udførelse



# Effektstudier og proces

## 1. Screening af flere brotyper

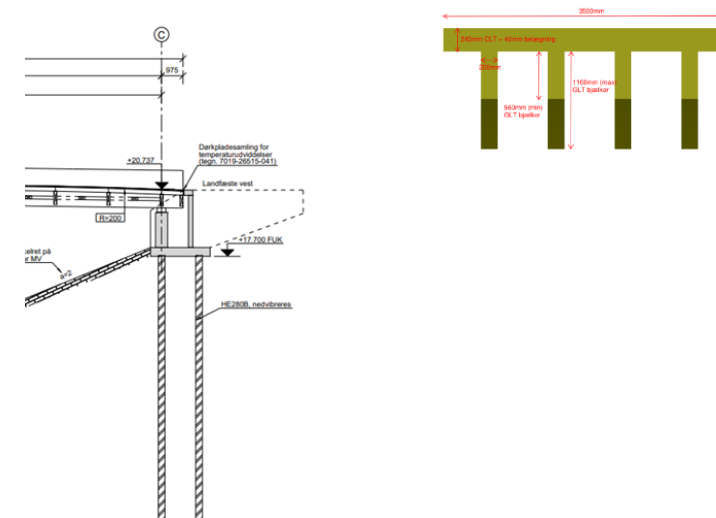
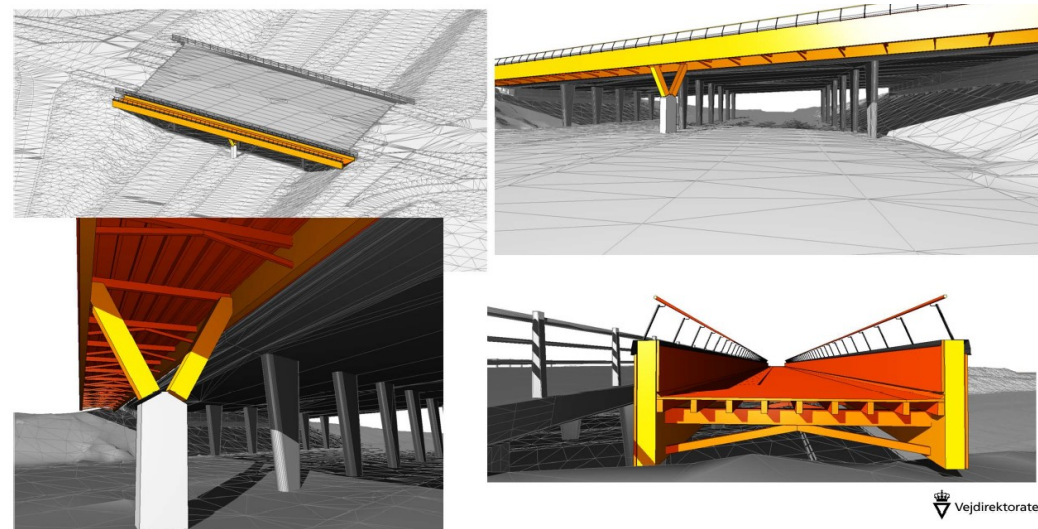
- Beton- In-situ
- Beton – elementløsning
- Træbro (limtræ – nordiske træsorter)

## 2. Variantoptimering af udvalgte brotyper

- Flere element-typer (OT, TT, U, H) og flere underbygninger
- Konsekvenser for pris, udførelse (A4), drift og vedligehold (B4) skal belyses
- Ikke kun overbygning men ligeledes fokus på fundering og interimforanstaltninger

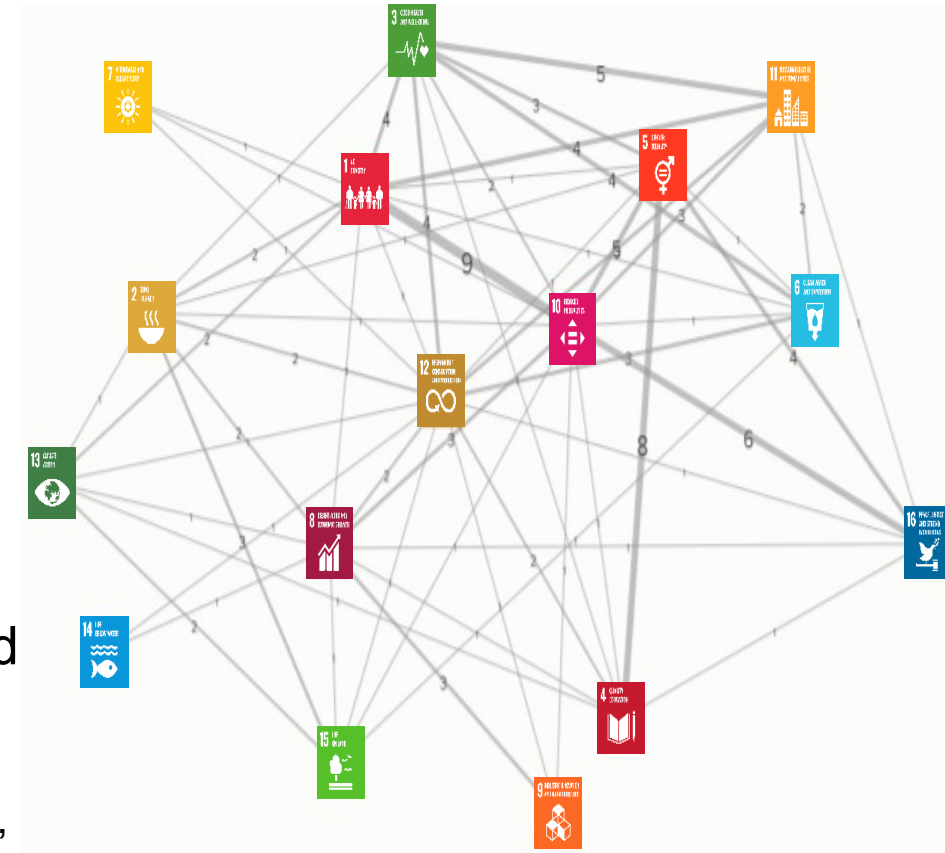
## 3. Egentlig skitsedesign

## 4. Detailprojekt ifm. udbud



# Optimeringer på flere parametre

- Totaløkonomi
- Minimering af materialeforbrug og optimeringer giver positiv bidrag på både pris og CO<sub>2</sub>
  - Materialevalg og Brotype (både brooverbygning, underbygning og fundering)
  - Lokale forhold afgørende (Areal og omgivelser, jordbundsforhold og grundvand)
  - Nødvendige interimsforanstaltninger (stillads og støttekonstruktioner, når man er tæt på eksisterende konstruktioner samt vej/motorvej i drift)
- Positiv effekt på andre fokusområder inden for bæredygtighed
  - Minimering af trafikgener
  - Styrkelse af arbejdssikkerheden under udførelsen (element kontra in-situ, tunge løft, stillads, på fabrik/på stedet, arbejder tæt på trafik).





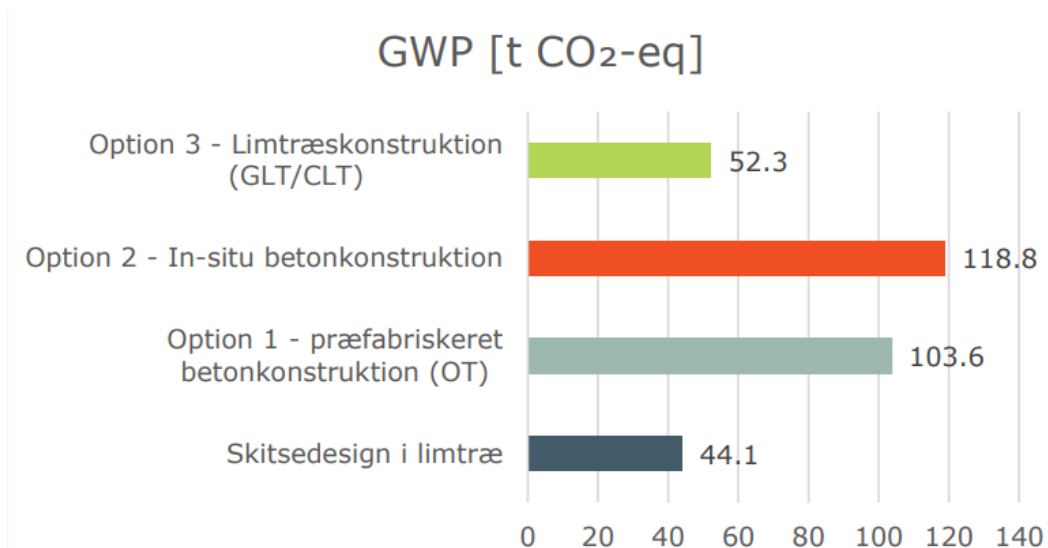
# Helhedsorienteret løsning - Fundering

	Positiv	Negativ
Direkte fundering		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der skal etableres dybere spuns mod eksisterende bro</li> <li>• Stor udgravning</li> <li>• Pladskrævende løsning</li> <li>• CO<sub>2</sub></li> </ul>
Stålpæle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindre spuns mod eksisterende bro</li> <li>• Minimal gravearbejde</li> <li>• Mindre pladskrævende og bedre trafikafvikling</li> <li>• Anvende genbrugsstål</li> <li>• CO<sub>2</sub>?</li> </ul>	
Borede betonpæle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindre spuns mod eks. Bro</li> <li>• Minimal gravearbejde</li> <li>• Mindre pladskrævende og bedre trafikafvikling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>?</li> </ul>

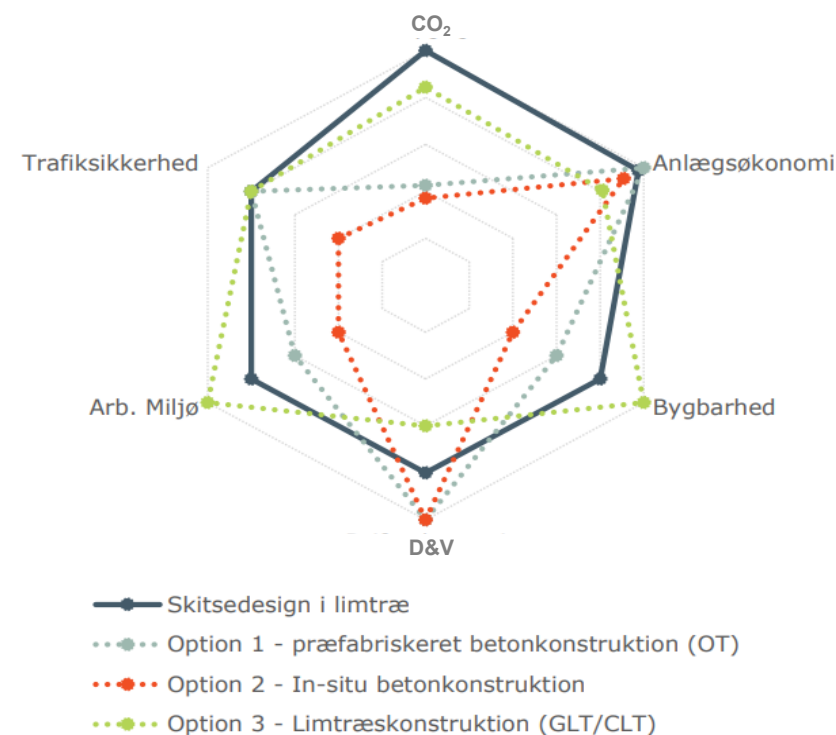
- Hvad er vigtigt, når tiltag kan have både positive og negative konsekvenser ?
- Hvad sker der for CO<sub>2</sub>-regnskabet, hvis entreprenøren ændrer løsning under udførelsen?

# Økonomi afgørende parameter

- CO<sub>2</sub> belastning for træbro halveret ift. betonløsning
- Hvad er vi villig til at betale pr. reduceret t CO<sub>2</sub>
- Skyggepris 1500kr/t CO<sub>2</sub> - 90.000 kr.)



Sammenligningsdiagram  
Værdierne i diagrammet er noramliserede scores i interval 0 til 100, hvor 100 er den bedste score.



# Økonomi

	Forøgelse i forhold til option 1 – samlet løsning
Option 1 – Præfabrikeret	0
Option 2 – In situ-beton	+10%
Option 3 - Limtrækonstruktion	+23%
Fase 3: Skitsedesign - Limtrækonstruktion	+2%

	Samlet pris	Træoverbygning	Fundering, beton og stål	Arbejdsplads og trafik	Interims-konstruktioner og belægning	Øvrige
Licitationspriser - Vinder	11,8 mio. kr.	32%	10%	31%	16%	11%
Nr. 2	+17%	ca. 2 mio. kr. (Prisforskel lå primært på træoverbygningen)				

# Udfordringer ved valg af træbro

- Få træbroer i DK
- Manglende erfaring med træbroer i både rådgiver og entreprenør branchen
- Der er faldgruber og udfordringer, når man går forrest – særligt i projekteringen
- Få leverandører af limtræsbroer/bjælker på markedet og produktionen kan give begrænsninger til design
- Patenteret produkt i forbindelse med overfladebehandling ved superkritisk imprægnering\*/Superwood af hovedbjælker for at sikre lang levetid.
- Der skal stilles de rigtige funktionskrav i udbud for at sikre konkurrence.
- Løsningen skal kunne være konkurrencedygtig på prisen – det er ikke nok at reducere CO<sub>2</sub>
- Stor prisforskel for træoverbygningen ved licitation (30-40% forskel)

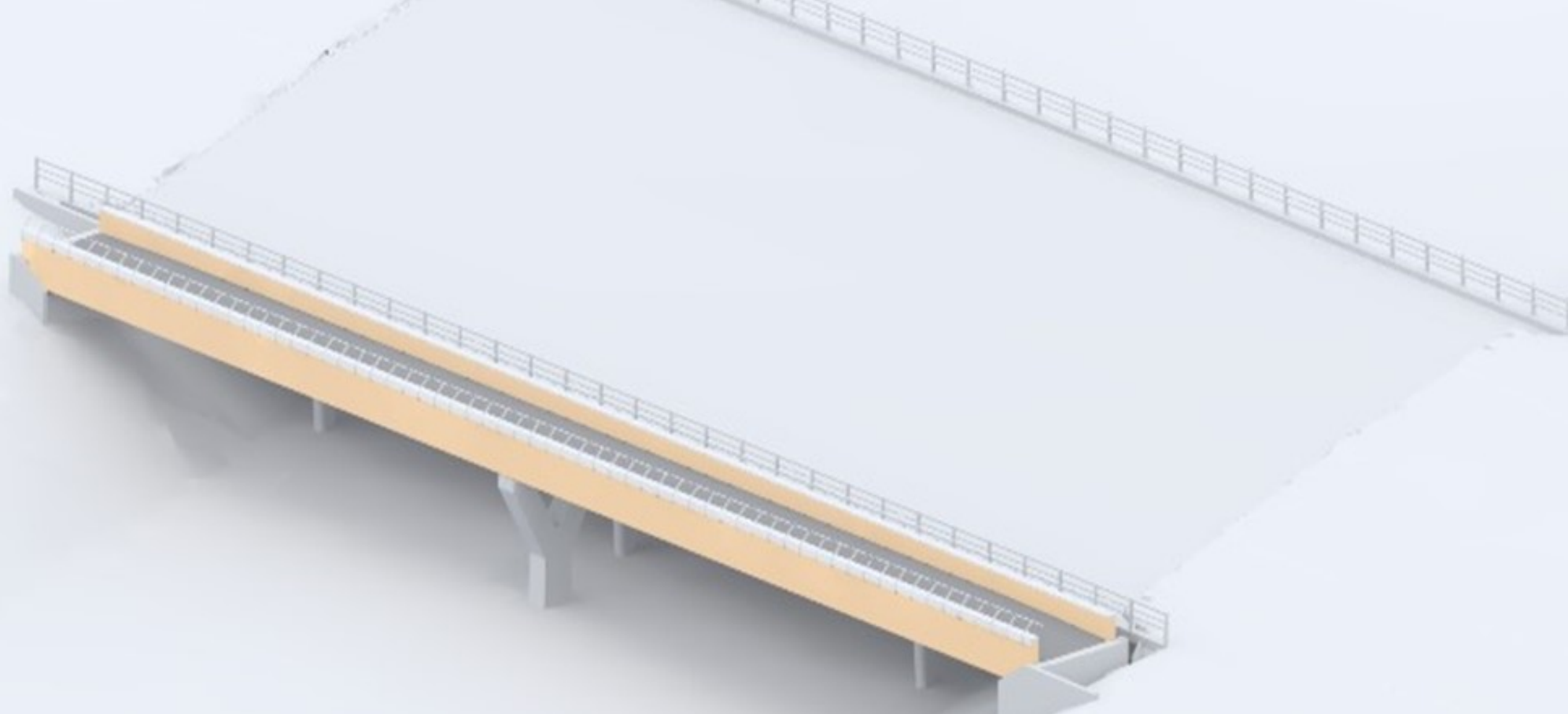
\*Miljøvenlig – gennemimprægneret ind i kernen



# Træbro og valg af nye bæredygtige løsninger

Leo Gamborg Graven  
Civilingeniør ved COWI

# Agenda



**Træbroers klimaaftryk**



**Træbroer i Danmark**



**Bro nr. 70-0-045.10**



**Læring fra projektet**



# Træbroers klimaaftryk

# Overvejelser i infraLCA

- Lagring af CO<sub>2</sub> i A1, frigives i C3 – forsinkelse er positivt  
Den gængse metode er at sammenligne uden biogen GWP
- Limtræ er ikke en del af bruttolisten – EPD Danmark blev anvendt
- Forbindelsesmidler og aptering er let at undervurdere i skitsefasen
  - Beslag, skruer, bolte, samlingsplader, lister, inddækning
- Udledning forbundet med overfladebehandling
  - Boracol 15 (2024) til 100 m<sup>2</sup> ~ 30 kgCO<sub>2</sub>e
  - 2 lag udendørs maling (2024) til 100 m<sup>2</sup> ~ 50 kgCO<sub>2</sub>e





# Sammenligning af 1/8PL<sup>2</sup>

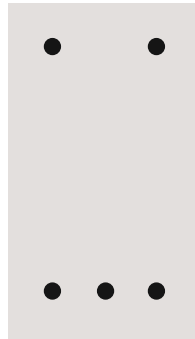
Fælles forudsætning: bjælkelængde = 3 m, moment om primær akse = 50 kNm



GL30c  
H 400  
B 115

~17  
kg CO<sub>2</sub>-ækv

85% udnyttet



2Y12  
C30/37 M  
H 300  
B 200  
3Y16

~60  
kg CO<sub>2</sub>-ækv

83% udnyttet



HE140B  
H/B 140  
t<sub>w</sub>/t<sub>f</sub> 7/12

~135  
kg CO<sub>2</sub>-ækv

90% udnyttet

*Bemærk at det indbyrdes forhold må formodes at ændre sig over tid, når produkternes miljødata opdateres.*

# Vejdirektoratets CO<sub>2</sub> targets

TSA 43

TSA 40

**900**

**kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>**

Baseline for broer  
baseret på 1990

**Kap 3.2**

**600**

**kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>**

2023 mål for 2-fags  
betonbro

**Kap 3.2**

**560**

**kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>**

Projekttestimat i fase  
3 for vejbro i beton

**270**

**kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>**

2030 mål, svarende  
til 70% reduktion

**Kap 3.2**

**200**

**kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>**

Projekttestimat i fase  
3 for stibro i træ



# Træbroer i Danmark

# En bro af træ over E45

- Kan klares med få løft, fordi brofagene vejer så lidt
- Ingen støbninger i forbindelse med overbygningen
- Limtræ kan let udføres med krumninger
- Limtræsbjælker op til 40 meter kan produceres hos Danske limtræsproducenter



# Lang levetid i Danmark

## 1

### Naturlig beskyttelse

#### Softwood

Limtræ (GLTc og GLTh)  
Konstruktionstræ (C)

#### Hardwood

Azobétræ  
Eg

## 2

### Mekanisk beskyttelse

Offerplader/Inddækning

Akryl eller anden belægning  
med nem reparation

Modulelementer i underbygning  
Geometrisk afvanding Undgå  
destruktive samlinger

Undgå at gennembyrde  
overdækningen

## 3

### Kemisk beskyttelse

Maling  
(Laserende eller dækkende)

Træbeskyttelsesmiddel

Superkritisk imprægnering

Trykimprægnering  
(styrkenedsættende)

Varmebehandling  
(må ikke anvendes bærende)

Table 4.1 (NDP) — Design service lives for categories of timber bridges

	Category of timber bridges	Design service life, $T_{if}$ [years]
1	Protected timber bridges (including their foundations and steel tension components according to EN 1993-1-11:— <sup>3</sup> ), other civil engineering structures supporting road or railway traffic <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>
2	Timber bridges with the main structural members protected for a 50-year design service life <sup>b</sup>	50 <sup>b</sup>
3	Replaceable structural parts of bridges line 1 and 2 <sup>c</sup>	25
4	Temporary structures <sup>d</sup>	≤ 10

#### 6.1.2 Protected members

(4) Timber members shall be protected from unacceptable increases of moisture.

NOTE Re-drying can be ensured by sufficient ventilation.

(7) Surfaces of protected members shall be protected from moisture.

NOTE 1 Surfaces within an inclination of 30° from an overhang can be regarded as protected from moisture unless local climate conditions require otherwise.

(6) Materials with a high durability such as some species of softwood or hardwood, modified wood, sufficient preservative treatment of wood or wood modification may be used unprotected if use class UC 2 and the required durability class DC applies.

Uddrag fra: CEN/TC 250/SC 5 "Eurocode 5: Design of timber structures"

# DK - Vejbro i Ikast



*Remmevej, vej overført Herningmotorvejen (2003)*

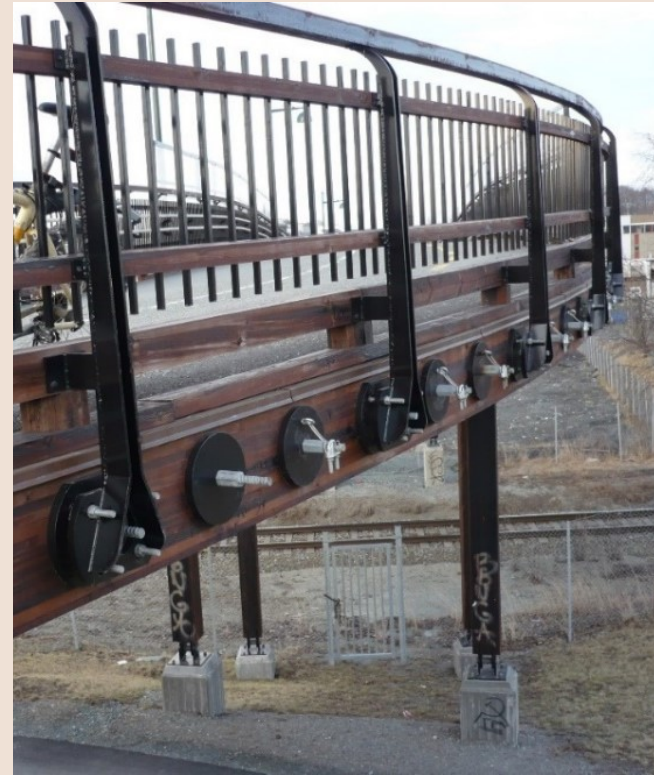
# DK - Jernbanebro i Varde



*Stibro over jernbane i Varde (2013)*



# NO - Stibro i Trondheim



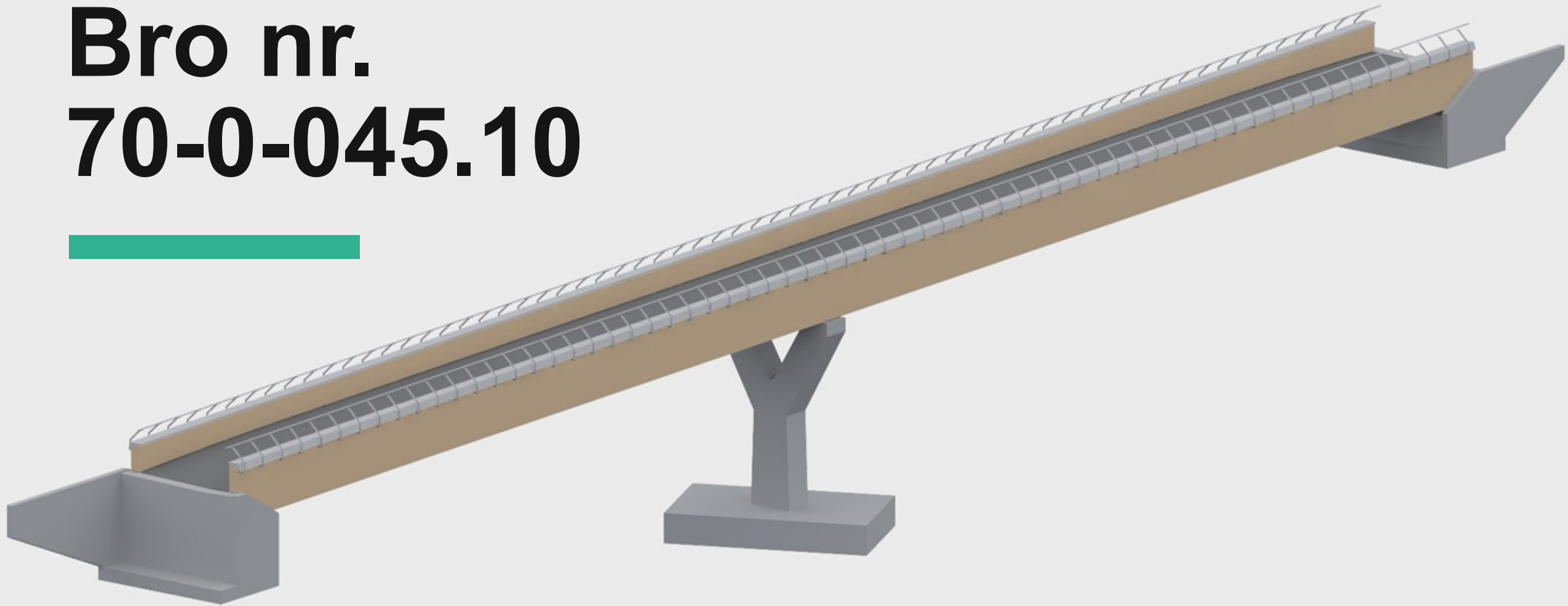
*Trondheim Dalen Footbridge (2012)*



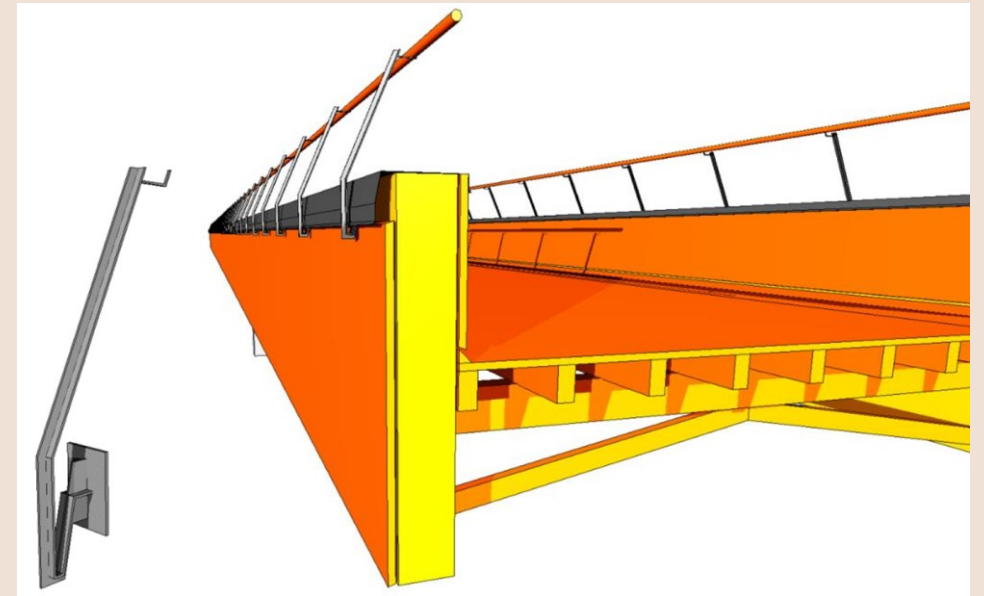
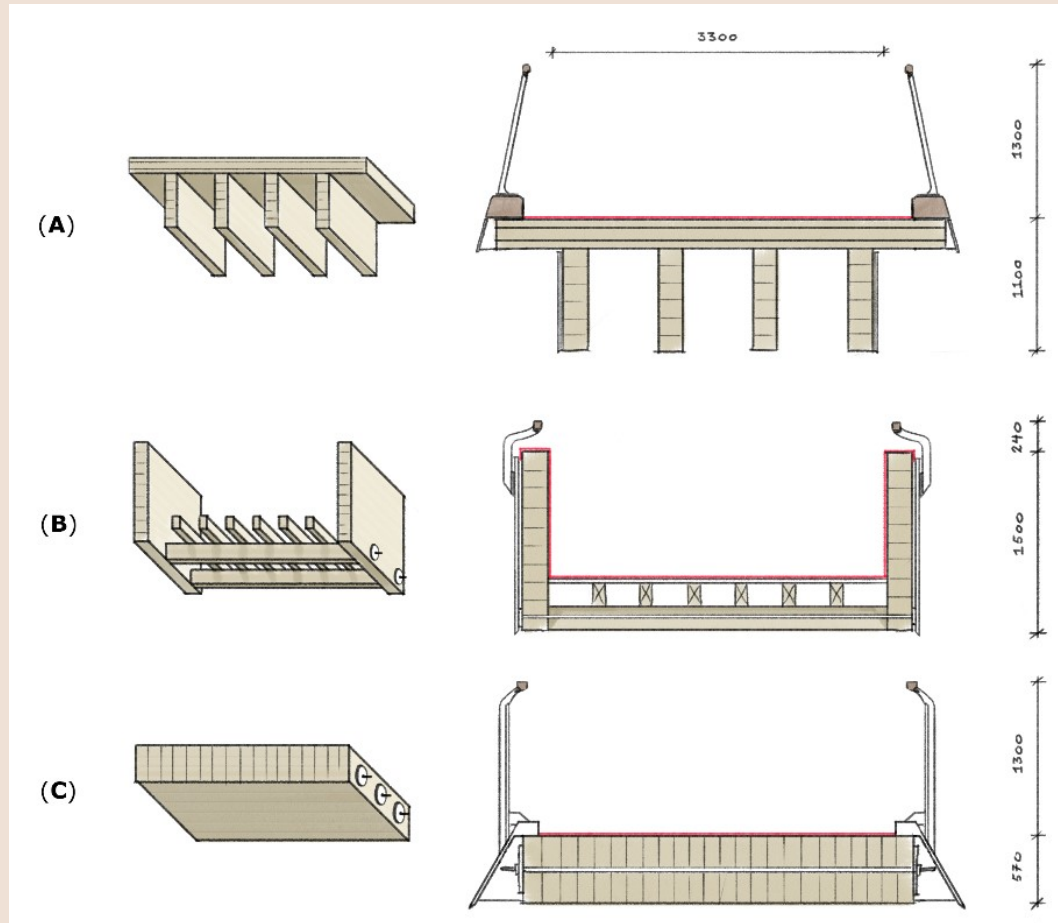
---

# Bro nr. 70-0-045.10

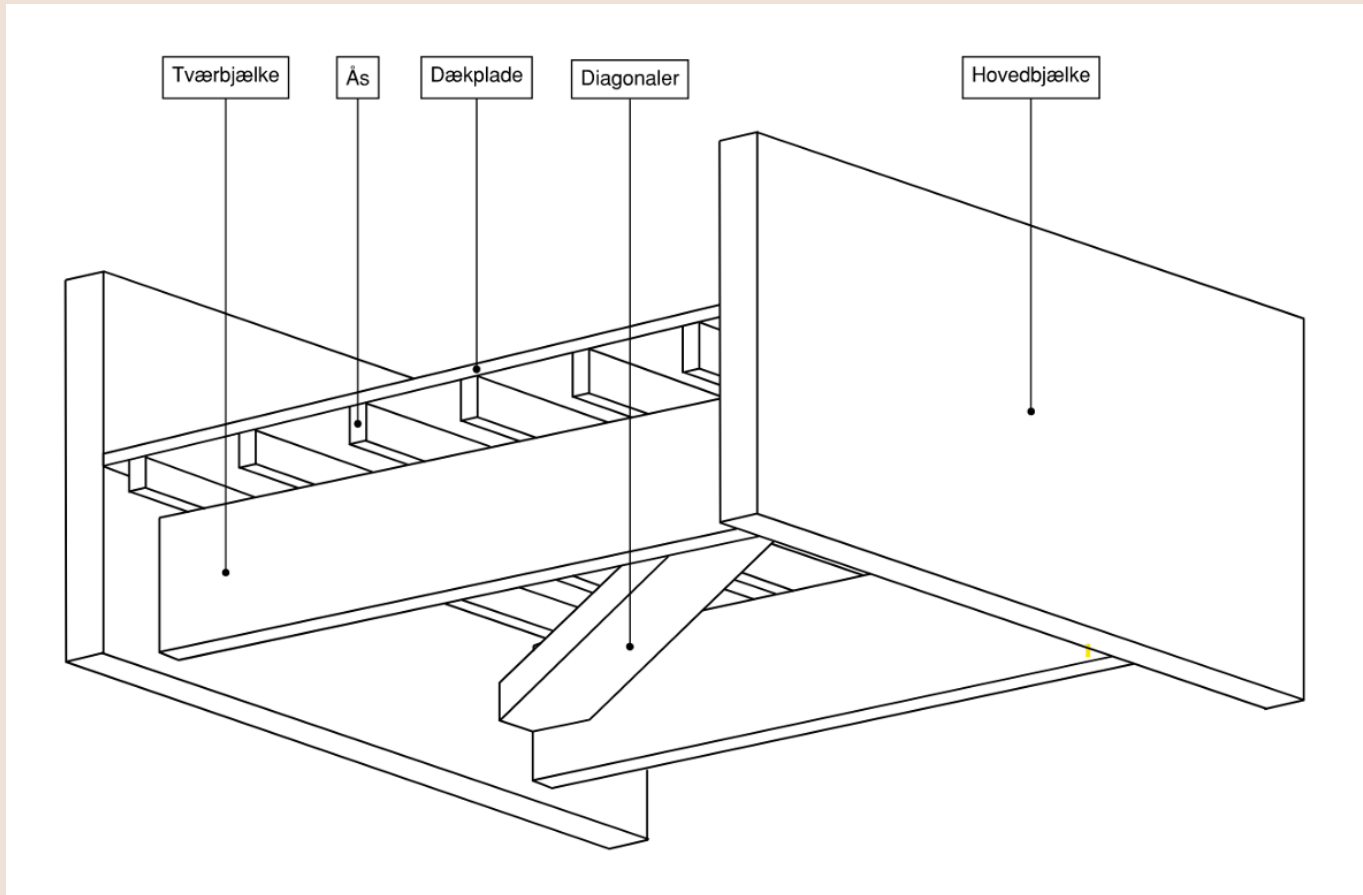
---



# Overbygning i fase 3 – TTTT, U, massivt → H



# Overbygning i fase 4



## Limtræ

Hovedbjælker  
Tværbjælker  
Åse  
Diagonalafstivning  
Inddækningsplader

## Konstruktionstræ

Afstandslitser

## LVL

Dækplader

## Stål

Bolt, møtrik, spændskiver  
Skruer  
Plader og svejsninger  
Rækværk

## Zink

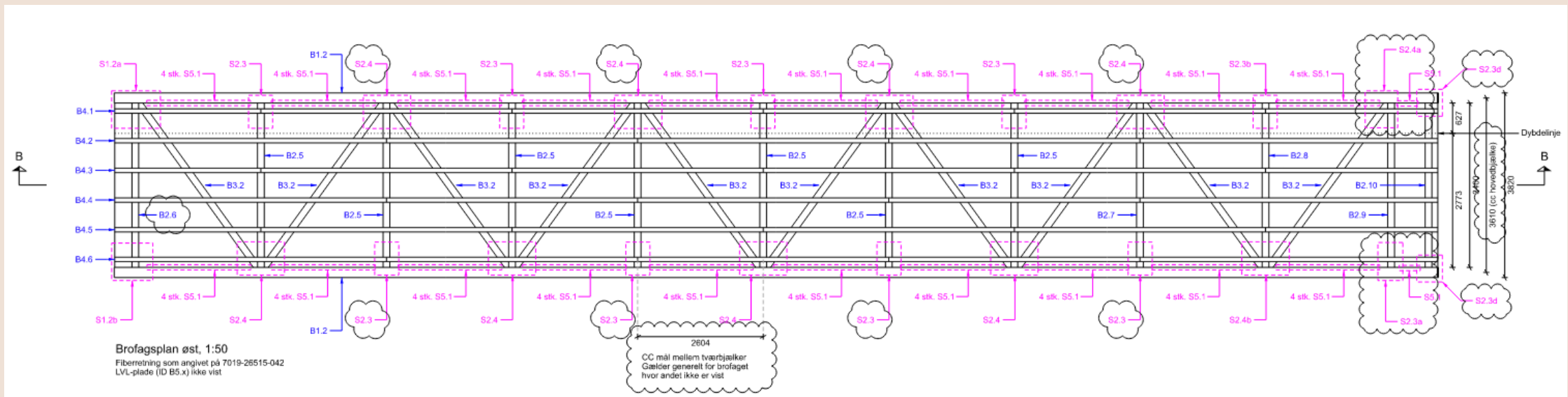
Inddækning

# Overbygning i fase 4

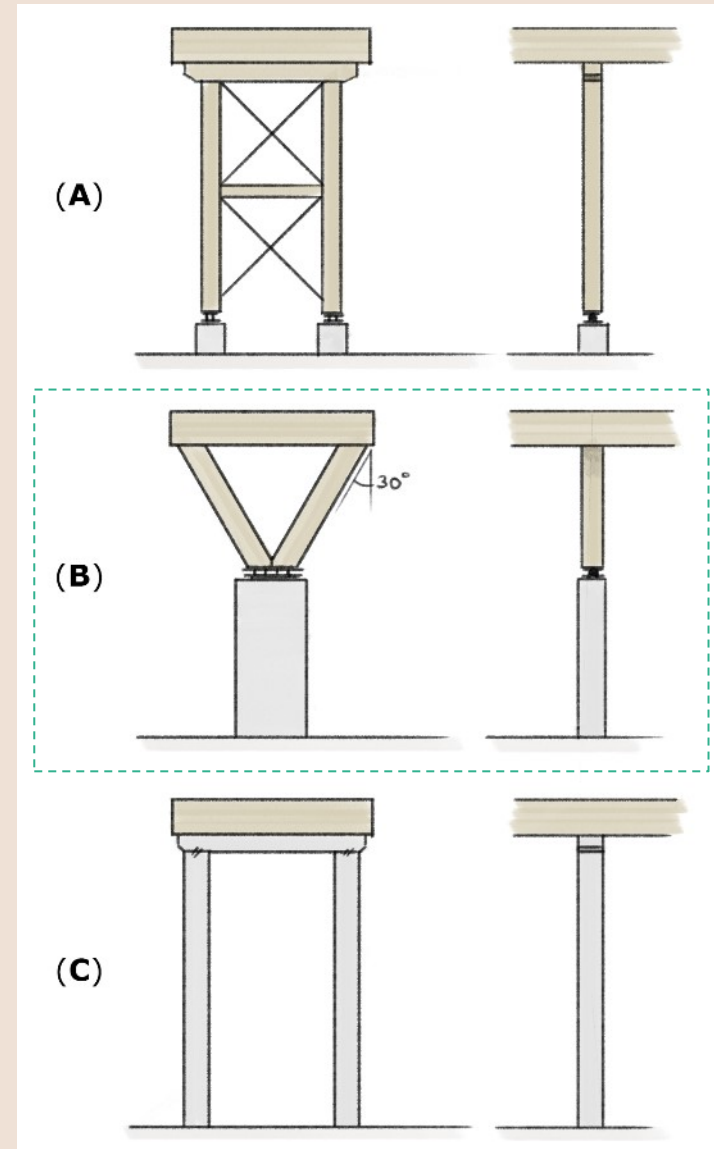
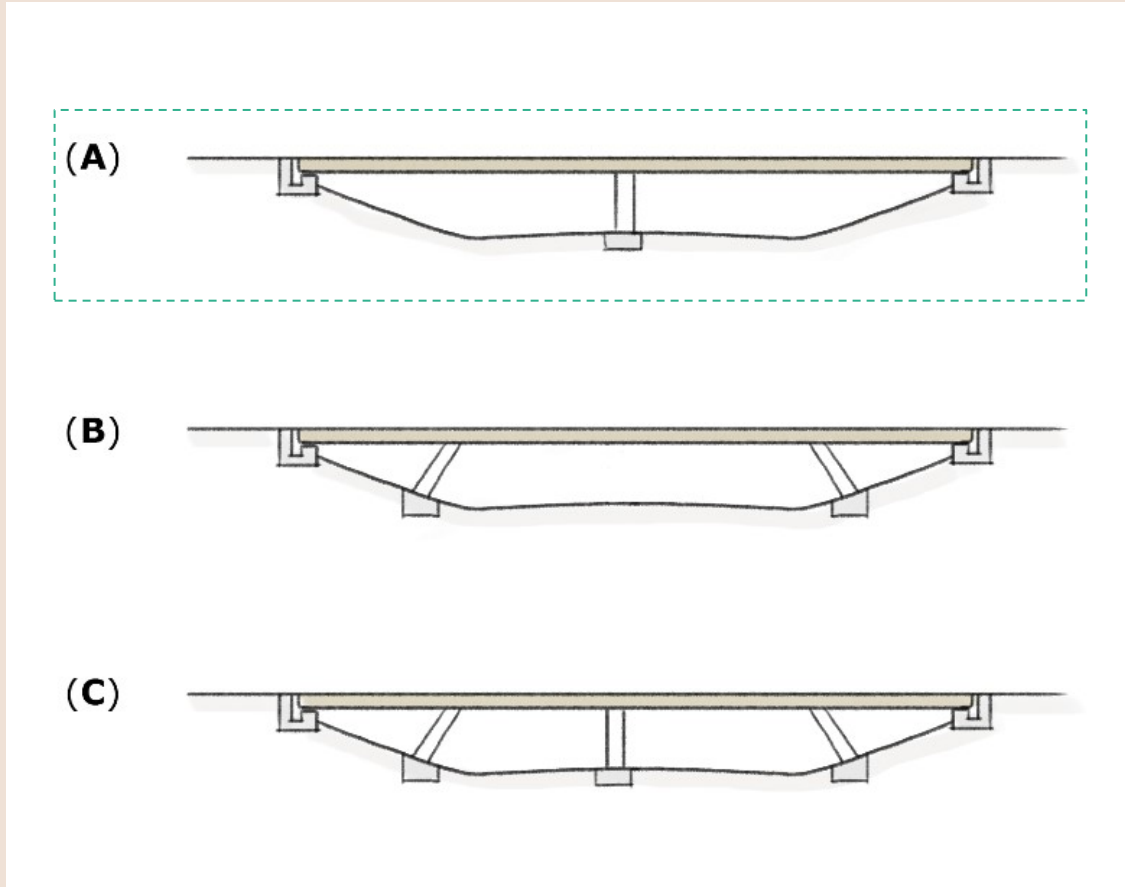
2 unikke brofag

20 unikke trækomponenter

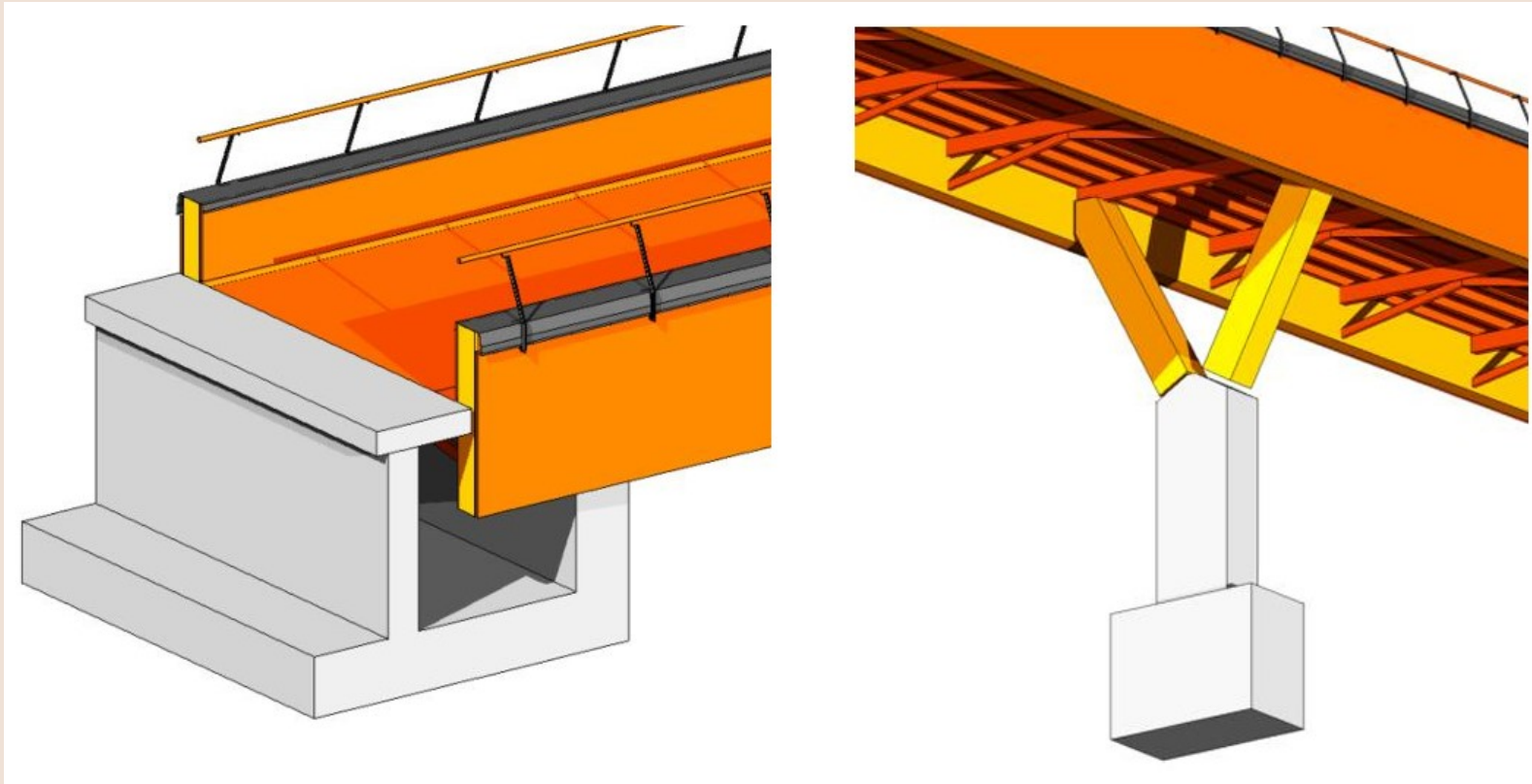
25 unikke stålsamlinger



# Underbygning i fase 3



# Underbygning i fase 3



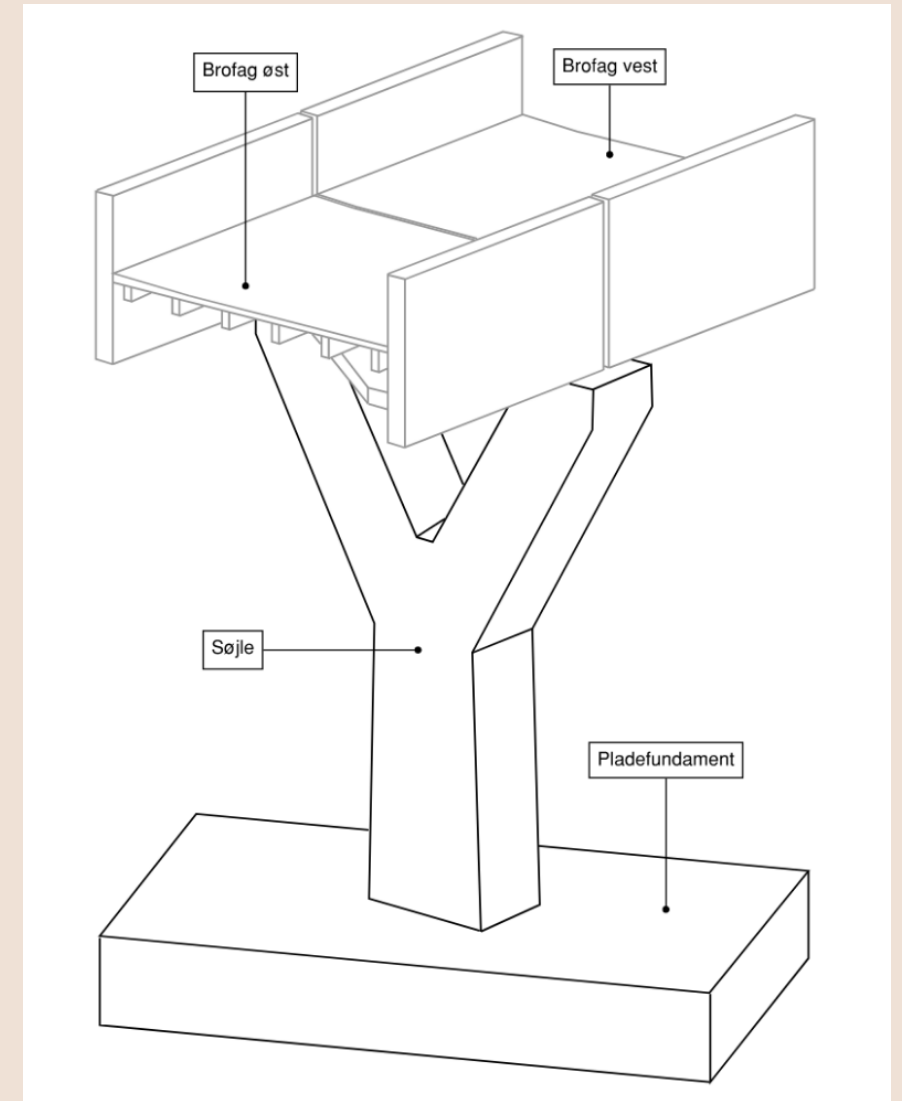
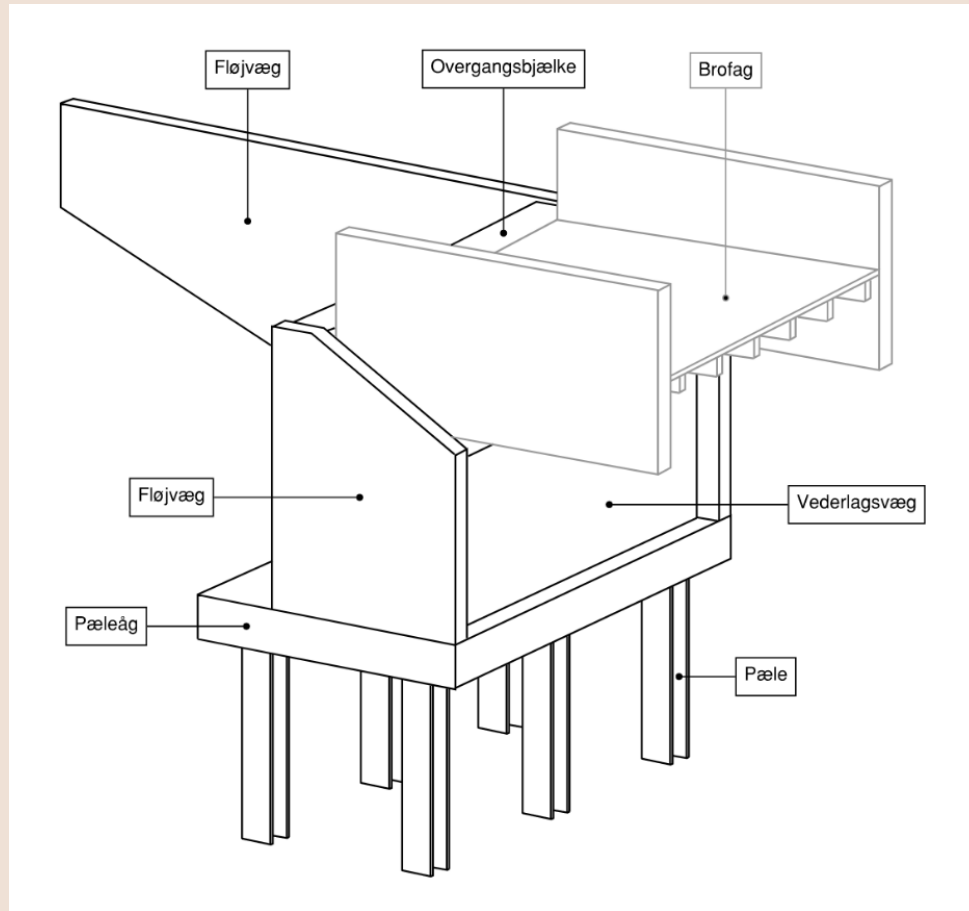
# Underbygning i fase 4

## Beton

Søjle  
Pladefundament  
Pæleåg  
Fløjvægge  
Vederlagsvæg  
Overgangsbjælke

## Stål

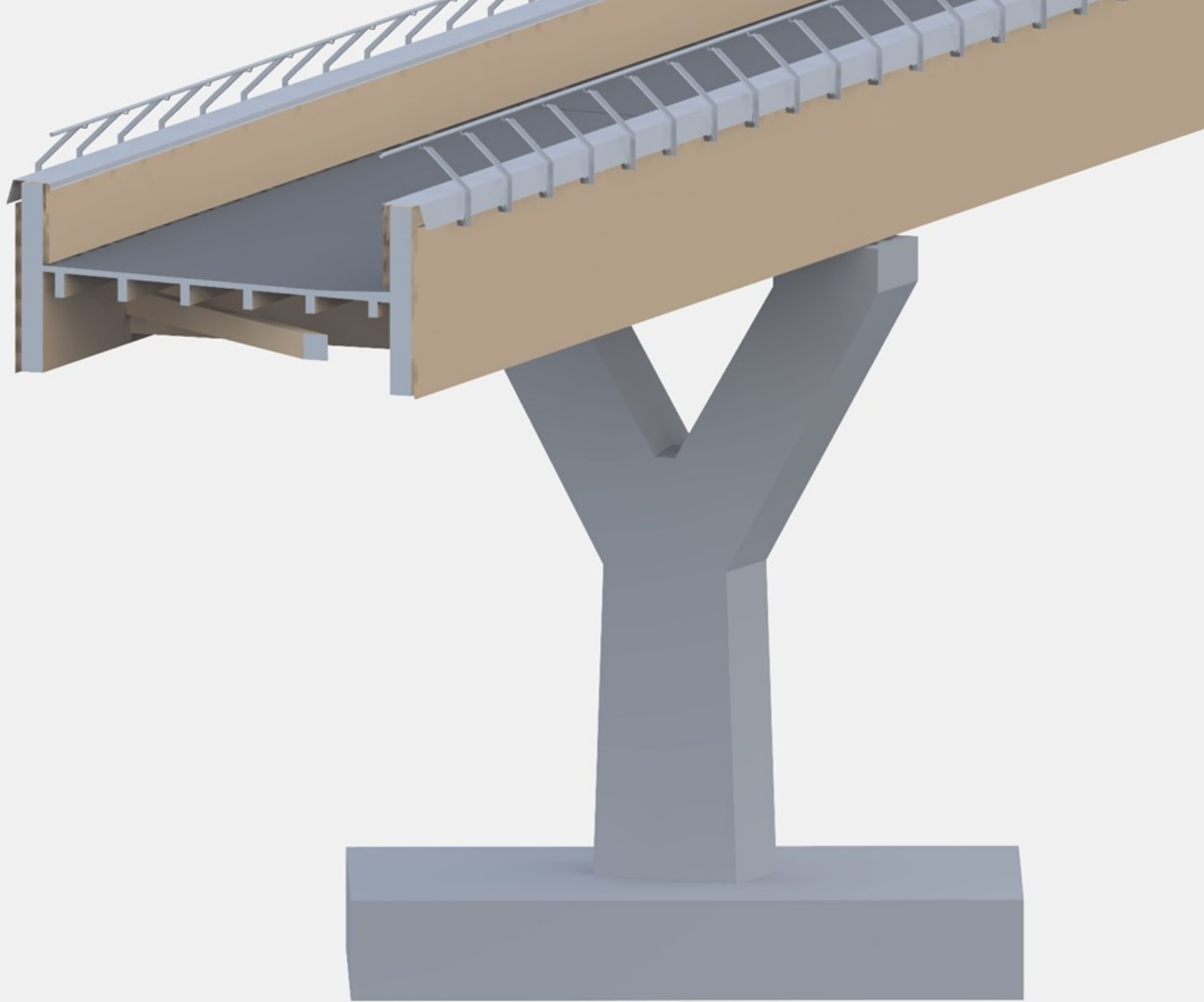
Pæle



A man wearing a dark jacket and a cap is leaning over, showing something to a young girl with blonde hair in a bun. They are in a forest with sunlight filtering through the trees. The man is holding a small object in his hand, and the girl is looking at it with interest. The background is a soft-focus forest scene.

# Læring fra projektet





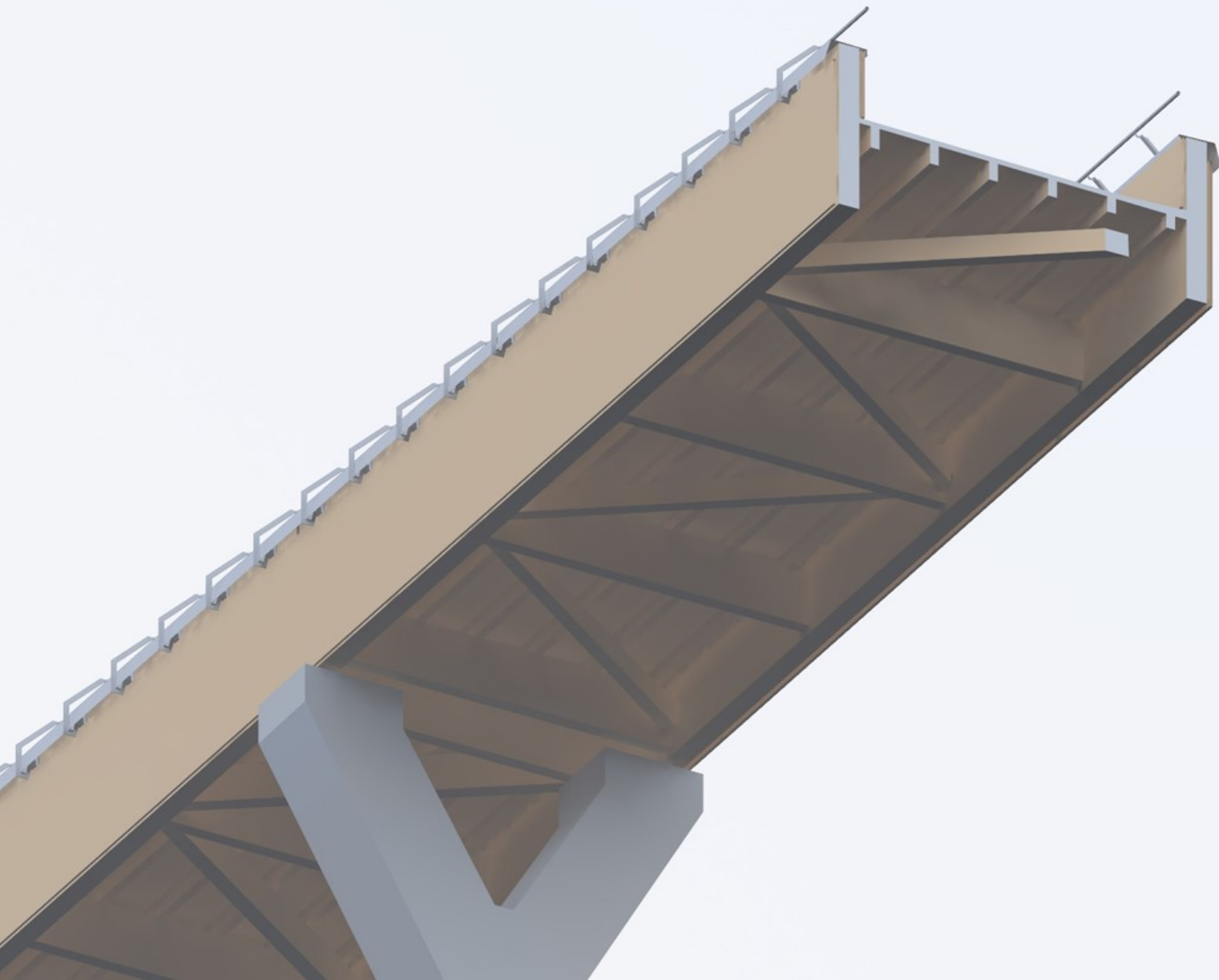
Træbro og valg af nye bæredygtige løsninger –  
VD/COWI oplæg på Vejforum 2024

# Ikke træ for enhver pris

- Samlinger mellem skrå træ søjler og hovedbjælker udnytter ikke træets ortotrope egenskaber
- Kræver uforholdsmæssigt store stålelementer for at overføre påkørselslasten til underbygningen

Underbygning	kgCO <sub>2</sub> e
Træ og beton	4075*
Stål og beton	3782
Beton	1846

\* ~1800 kg-CO<sub>2</sub>-e for fase 3 design



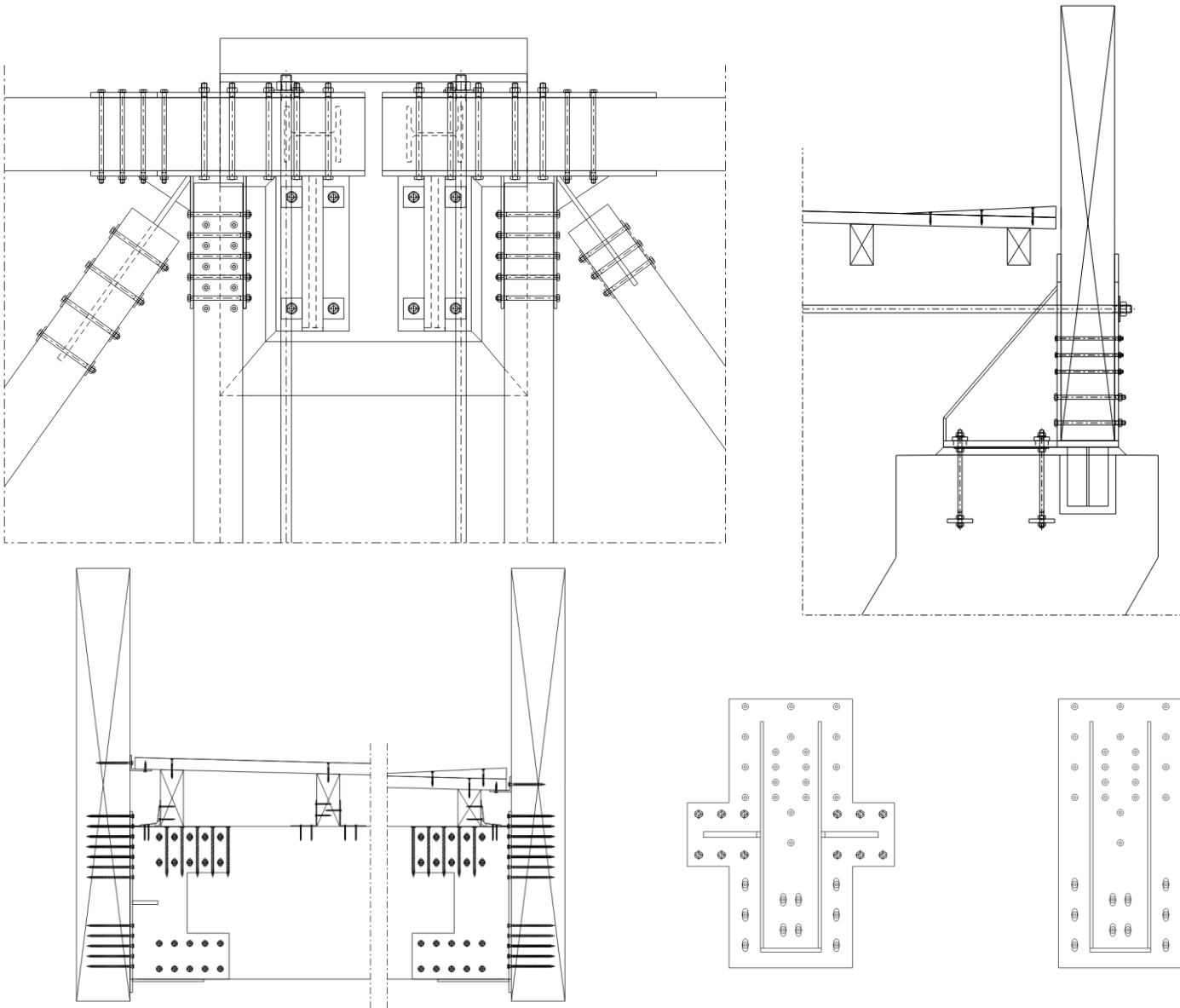
Træbro og valg af nye bæredygtige løsninger –  
VD/COWI oplæg på Vejforum 2024

# Påkørselslast og service

- En påkørselslast på 500 kN er ikke let at optage i en trækonstruktion
- Rampernes kote medfører at stibroen ikke kunne løftes eller krummes for at undgå lasten
- Robusthedsstrategi mod progressivt kollaps
- H-profil ved gitter forbindelse i tværsystemmet
- Tværsystemmet er opdimensioneret i vestligt brofag
- Servicekøretøj på brodæk
  - Default = 80\*1,5 kN ULS / 80 kN ALS
  - Projektloft = 30\*1,5 kN ULS / 80 kN ALS

# Stålsamlinger, en blind vinkel?

- Den største beregningsbyrde
- Let at underestimere behovet i fase 2/3
- Estimeret ~5 tons stål (fase 4)  
(1 m<sup>3</sup> stål vejer 7,8 ton)
- Estimeret ~7 tonCO<sub>2</sub>e (fase 4)
- Enormt afhængigt af antallet af komponenter
- Fase 5 – forarbejdet skal lønne sig
  - Mindske kompleksitet
  - Designe for arbejdsgange



---

# Thank you

---