

Vejdirektoratet

Udbygning af Brande Omfartsvej 6751 - Rådgivning, Projekt og Arealerhvervelse

Beregnings-, Belastnings- og Dimensioneringsforudsætninger (BBD)

Marts 2011

COWI A/S

Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

Telefon 45 97 22 11
Telefax 45 97 22 12
www.cowi.dk

Vejdirektoratet

Udbygning af Brande Omfartsvej 6751 - Rådgivning, Projekt og Arealerhvervelse

Beregnings-, Belastnings- og
Dimensioneringsforudsætninger (BBD)

Marts 2011

Dokument nr. xxxx
Version xx
Udgivelsesdato 14. marts. 2011

Udarbejdet xxx
Kontrolleret xxx
Godkendt xxx

Indholdsfortegnelse

1	Indroduktion	3
1.1	Generelt	3
1.2	Forudsætninger, normer og kravspecifikationer	3
1.3	Fritrumsprofil	5
2	Belastninger	7
2.1	Permanent last (G)	7
2.2	Variabel last (P)	7
2.3	Tvangspåvirkninger	8
2.4	Differenssætninger	9
2.5	Lejefriktion	9
2.6	Vandspejl	9
2.7	Ulykkesgrænsetilstanden	9
2.8	Øvrige variable laster	10
3	Lastkombinationer og partialkoefficienter	11
3.1	Lastkombinationer	11
3.2	Partialkoefficienter på materialer	11
3.3	Efterspænding	13
4	Materialer og eftervisning	15
4.1	Beton	15
4.2	Slap armering	15
4.3	Spændarmering	16
4.4	Dæklag	16
4.5	Tilladelig revnevidde, spænding og deformation	17
4.6	Fundering	18
5	Beskrivelse af beregningsmodel	20
5.1	Enheder	20
5.2	Pladebroer	20
5.3	Rammebroer	21

Udbygning af Brande Omfartsvej		2
6751 - Rådgivning, Projekt og Arealhvervelse		
Beregnings-, Belastnings- og Dimensioneringsforudsætninger (BBD)		
5.4	Elementtyper i bromodeller	22
5.5	Snitkraftsdefinition	24
6	Eftervisning	25
6.1	Generelt	25
7	Bilag 1	33

1 Introduktion

1.1 Generelt

Denne rapport indeholder projekteringsforudsætninger for følgende konstruktioner:

- Bro 344-2005, OF af landevej 556, Ejstrupholmvej
- Bro 344-3005, UF af k-vandløb nr. 4 Goldbækken
- Bro 344-4005, UF af kommunevej 119, Dørslundvej
- Bro 344-6004, OF af kommunevej 306, forlagt Thyregodvej
- Bro 344-6005, UF af kommunevej 206, Højmarksvej
- Bro 344-8004, UF af Bane Syd
- Bro 344-8005, UF af banen Vejle-Herning, Bane Nord
- Bro 344-9004, UF af sti og faunapassage, Gormosen

Ovenstående konstruktioner indgår i motorvejen Holstebro – Vejle, delstrækning Brande Omfartsvej.

Nærværende dokument beskriver Beregnings-, Belastnings og Dimensioneringsforudsætningerne ved projektering af ovenstående broer.

1.2 Forudsætninger, normer og kravspecifikationer

1.2.1 Forudsætninger

Generelt dimensioneres nye vej- og stibroer iht. følgende vejregler:

- [1] Vejledning til Belastnings- og beregningsgrundlag for vej- og stibroer
Vejdirektoratet - Vejregelrådet, juli 2010

- [2] Vejregler for vejes geometri over og under broer
Vejdirektoratet - Vejregeludvalget, november 1998
- [3] Vejregler for opsætning af broautoværn og –rækværker
Vejdirektoratet – Vejregeludvalget, juli 2006
- [4] Belastnings- og beregningsforskrift for sporbærende broer og
jordkonstruktioner BN1-59-4
Banedanmark, 01.11.2010
- [5] DSB infrastruktur, Frirumsprofiler, 1995

1.2.2 Normer

Der regnes iht. gældende normer jf. implementering af Eurocodes pr. 1. april 2010:

- DS/EN 1990/A1 Eurocode – Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner
- DS/EN 1991-1-4 Eurocode 1: Last på bygværker - Generelle laster - Vindlast
- DS/EN 1991-1-5 Eurocode 1: Last på bygværker - Generelle laster - Termiske laster
- DS/EN 1991-1-7 Eurocode 1: Last på bygværker - Generelle laster - Ulykkeslast
- DS/EN 1991-2 Eurocode 1: Last på bygværker – Del 2: Trafiklast på broer
- DS/EN 1992-1-1 Eurocode 2: Betonkonstruktioner – Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner
- DS/EN 1992-2 Eurocode 2: Betonkonstruktioner – Betonbroer – Dimensionerings- og detaljeringsregler
- DS/EN 1997-1 Eurocode 7: Geoteknik – Del 1: Generelle regler

For alle ovenstående Eurocodes inkluderes gældende Nationale Annekser (DK NA) samt tillæg til disse.

1.2.3 Kravspecifikationer

Konstruktionerne dimensioneres således, at de lever op til de krav om robusthed og holdbarhed, som er beskrevet i indeværende dokument, og som der er tradition for i Danmark.

Vejbroer dimensioneres på basis af en forventet levetid på 100 år, hvoraf de første 25 år skal være uden reparationer af betydning.

Levetiden på 100 år skal gælde for alle primære konstruktionsdele:

- overbygning (eksklusiv belægning, fugtisolering og fuger)
- underbygning

For visse sekundære konstruktionsdele, der kan udskiftes, tillades levetiden reduceret, dog ikke til mindre end 50 år.

Ved konstruktionens levetid forstås, at der inden for denne periode kun foregår almindelige vedligeholdsarbejder og kun reparationsarbejder i begrænset omfang.

1.3 Fritrumsprofil

1.3.1 Veje

Der henvises til [2]: "Vejregler for vejes geometri over og under broer".

1.3.2 Underført jerbane

Der henvises til [4]: Belastnings- og beregningsforeskrift for sporbærende broer og jordkonstruktioner, afsnit 9.2 - Geometriske forudsætninger, idet der benyttes fritrumsprofil EBa. I øvrigt gælder det, at afstanden mellem centerlinie spor og nærmeste søjlefacader ikke må forringes i forhold til eksisterende forhold. Hvis den frie afstand er forskellig på de to sider af sporet tages der udgangspunkt i den mindste af de frie afstande. Den frie afstand behøver dog på intet tidspunkt at være større en svarende til fritrumsprofil EBa

1.4 Symbolliste

ULS	- brudgrænsetilstanden
FLS	- udmattelsesgrænsetilstanden
SLS	- anvendelsesgrænsetilstanden
ALS	- ulykkesgrænsetilstanden
f_y	- armeringens trækflydespænding
f_{yc}	- armeringens trykflydespænding
f_t	- armeringens trækstyrke
ϵ_y	- armeringens flydetøjning
ϵ_{su}	- armeringens brudtøjning (v. trækbrud)
f_c	- betons trykbrudspænding
E	- elasticitetsmodul
ν	- poisson's forhold
T	- temperatur
K	- jordtrykskoefficient
ϕ	- friktionsvinkel
c	- kohæsion
γ	- partialkoefficient, tyngde af materiale
w	- revnevidde
u	- udbøjning
P_0	- brudlast for spændarmering
$P_{0,1}$	- last ved 0,1 % tøjning af spændarmering
indices:	
d	- design værdi
k	- karakteristisk værdi
S	- lastvirkning, påvirkning
R	- bæreevne
u	- udrænet

2 Belastninger

2.1 Permanent last (G)

Specifik tyngde af armeret beton:	$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
Specifik tyngde af isolering og belægning:	$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
Specifik tyngde af polystyren:	$\gamma = 1 \text{ kN/m}^3$
Specifik tyngde broautoværn på vejbroer:	$\gamma = 1 \text{ kN/m}$

Ved beregning af konstruktionsdele med jordtryk kan der regnes med:

Hviletrykskoefficient:	$K_0 = 0,43$
Friktionsvinkel friktionsfyld:	$\phi_{p,k} = 38^\circ$
Specifik tyngde af friktionsfyld:	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Ved beregning af jordtryk tages hensyn til eventuel komprimering af friktionsfyld.

2.2 Variabel last (P)

2.2.1 Vejbroer

Den variable last beregnes i henhold til EN 1991-2 Eurocode 1: Last på bygværker – Del 2: Trafiklast på broer, afsnit 4.

Vejbroerne henregnes under Brogruppe I jf. [1]afsnit.3.

Vejbroer i Brogruppe I dimensioneres for tunge transportere jf. [1] afsnit 5.3.2.

I normalpassage skal minimum opnås Klasse 150.

Dimensionering for tungtransportkøretøj:

- Brudundersøgelse, ULS: Stødfaktor $K_s = 1,25$ for $v \geq 45 \text{ km/t}$
- Anvendelsesundersøgelse, SLS: Stødfaktor $K_s = 1,1$

Trafiklast på dæmning med kørebane: $p = 20 \text{ kN/m}^2$

2.3 Tvangspåvirkninger

2.3.1 Temperaturændringer, årstidsvariation

Broer beregnes for temperaturlast i henhold til EN 1991-1-5 kapitel 6 inkl. DK NA.

Temperaturlasten består dels af en ensartet årstidsvariation, $\Delta T_{N,neg}$ og $\Delta T_{N,pos}$, som betegner opvarmning hhv. nedkøling af tværsnittet i forhold til en referencetemperatur på 10 °C. De anvendte værdier af parametrene i henhold til er givet i **Tabel 1**.

Karakteristiske værdier for minimum- og maksimumlufttemperaturer i skygge er henholdsvis $\theta_{min} = -31$ °C og $\theta_{max} = 36$ °C.

$T_{N,pos}$ [°C]	$T_{N,neg}$ [°C]	$\Delta T_{N,pos}$ [°C]	$\Delta T_{N,neg}$ [°C]
+38	-24	+28	-34

Tabel 1: Parametre for ensartet temperaturlast

2.3.2 Temperaturforskelle over tværsnittet

Udover den ensartede temperaturpåvirkning beregnes broer for en temperaturbelastning, som er lineært varierende henover tværsnittet, og som er givet ved temperaturforskellen mellem top og bund. Der skelnes mellem situationen, hvor underside er varmere end overside, $\Delta T_{M,neg}$, og hvor overside er varmere end underside, $\Delta T_{M,pos}$. De anvendte værdier af parametrene er angivet i **Tabel 2**.

Korrektionsfaktorer iht. EN 1991-1-5 Tabel 6.2 anvendes for at tage højde for den aktuelle belægningstykkelse.

$\Delta T_{M,pos}$ [°C]	$\Delta T_{M,neg}$ [°C]
+15	-8

Tabel 2: Temperaturforskelle¹

2.3.3 Samtidighed af ensartet og lineær temperaturvariation

Årstidsvariationen og variationen over tværsnittet kombineres efter følgende udtryk jf. EN 1991-1-5:

$$\Delta T_M + \omega_N \cdot \Delta T_N$$

eller

$$\omega_M \cdot \Delta T_M + \Delta T_N$$

¹ De angivne værdier er for en belægningstykkelse på 50 mm. For andre tykkelser af belægningen multipliceres værdierne med faktorer som angivet i EN1991-1-5, Tabel 6.2. Ved 115 mm brobelægning er $k_{sur} = 0,64$ for $\Delta T_{M,pos}$ og 1,0 for $\Delta T_{M,neg}$.

hvor $\omega_N = 0,35$ og $\omega_M = 0,75$.

2.3.4 Svind og krybning

Svind og krybning beregnes iht. CEB-FIP Model Code 1990 samt EN 1992-1-1 Eurocode 2: betonkonstruktioner - Betonbroer - Dimensionerings- og detaljeringsregler.

2.4 Differenssætninger

Længdeudvidelse på alle overføringerne funderes på pæle, og brooverbygningerne dimensioneres for differenssætninger svarende til de beregnede sætninger af understøtningerne dog mindst ± 10 mm indbyrdes mellem adskilte fundamenter. Der regnes med mest ugunstige opstilling.

Sætninger i ler regnes som en langtidslast.

Beregnete sætninger baseres på de supplerende geotekniske undersøgelser og tilhørende fastlæggelser af pælenes spidskoter.

2.5 Lejefriktion

Broerne forsynes ikke med lejer, hvorfor lejefriktion ikke er aktuell.

2.6 Vandspejl

Dimensionsgivende vandspejl på konstruktionerne antages som værende i terrænniveau.

Der skal for hver konstruktion foretages en vurdering af de aktuelle drænveje, således at muligheden for opbygning af højere liggende vandspejl tages i regning.

Der forudsættes dræn i niveau med fundamentet og friktionsfyldt bag endevederlag. Det vurderes, at i værste tilfælde, hvor drænet er ude af funktion, at der kan være et sekundært vandspejl svarende til maksimalt 1,0 m over det underliggende terrænniveau. Denne situation betragtes som et ulykkestilfælde.

2.7 Ulykkesgrænsetilstanden

Påkørselslaster 1000 kN parallelt med, henholdsvis 500 kN vinkelret på den underførte vej og svarende til trafik på motorvej. Påkørselslasten angriber i en højde på 1,2 m over terræn.

For overbygningen benyttes reglerne for fastsættelsen af kollisionskræfter som angivet i EN 1991-1-7 inkl. DK NA, idet der ligeledes antages en last svarende til trafik på motorvej. På overbygningen påsættes således en horisontalt virken-

de last på 500 kN, idet den angivne belastning antages at angribe med en hældning på 10 ° opad i forhold til horisontal.

2.8 Øvrige variable laster

Bremsekraft beregnes jf. EN 1991-2, afsnit 4.4.1.

Snelaste udelades, da de er ubetydelige for konstruktionen.

Laste fra is, bølger, strøm og vandstande (bortset fra grundvand) er uaktuelle.

For broerne påsættes vindlast i henhold til EN 1991-1-4 inkl. DK NA, og højden af trafikens vindflade regnes på kørebanearealerne til 2,0 m.

3 Lastkombinationer og partialkoefficienter

Partialkoefficienter på laste og materialer samt aktuelle lastkombinationer fremgår af det følgende.

3.1 Lastkombinationer

Lastkombinering sker ved anvendelse af de i [1] angivne lastkombinationer.

Udmattelse anses dog ikke været relevant.

Faktoren K_{FI} påsættes særskilt de i [1] angivne lastkombinationer, idet broerne henregnes til:

Høj Konsekvensklasse CC3 $\rightarrow K_{FI} = 1,10$

3.2 Partialkoefficienter på materialer

3.2.1 Generelt

- Høj Konsekvensklasse CC3 $\rightarrow K_{FI} = 1,10$ (Geo)
- Skærpet Kontrolklasse (Execution Class 3) $\rightarrow \gamma_c = 0,95$
- Geoteknisk Kategori 3.

3.2.2 Brokonstruktioner

Brudgrænsetilstanden (ULS)

Betons trykstyrke og E-modul i armeret beton	$\gamma_c = 1,45 \times 0,95 = 1,38$
Betons trykstyrke og E-modul i uarmeret beton	$\gamma_c = 1,60 \times 0,95 = 1,52$
Betons trækstyrke	$\gamma_c = 1,70 \times 0,95 = 1,62$
Armeringsstyrke	$\gamma_s = 1,20 \times 0,95 = 1,14$

Anvendelsesgrænsetilstanden (SLS)

Betons trykstyrke og E-modul i armeret beton	$\gamma_c = 1,00$
Betons trykstyrke og E-modul i uarmeret beton	$\gamma_c = 1,00$
Betons trækstyrke	$\gamma_c = 1,00$
Armeringsstyrke	$\gamma_s = 1,00$

Ulykkesgrænsetilstanden (ALS)

Betons trykstyrke og E-modul i armeret beton	$\gamma_c = 1,00$
Betons trykstyrke og E-modul i uarmeret beton	$\gamma_c = 1,00$
Betons trækstyrke	$\gamma_c = 1,00$
Armeringsstyrke	$\gamma_s = 1,00$

3.2.3 Fundering

Brudgrænsetilstanden (ULS)

Jordtryk og stabilitet

Tangens til friktionsvinkel (gælder for $\tan \phi'$)	$\gamma_{\phi'} = 1,2 \times 1,1 = 1,32$
Effektiv kohæsion	$\gamma_{c'} = 1,2 \times 1,1 = 1,32$
Udrænet forskydningsstyrke	$\gamma_{cu} = 1,8 \times 1,1 = 1,98$
Simpel trykstyrke	$\gamma_{qu} = 1,8 \times 1,1 = 1,98$
Rumvægt	$\gamma_r = 1,0 \times 1,1 = 1,00$

Bæreevne for rammede pæle

Spids	$\gamma_b = 1,30$
Overflade (tryk)	$\gamma_s = 1,30$
Total/kombineret (tryk)	$\gamma_t = 1,30$
Overflade (træk)	$\gamma_{s,t} = 1,30$

For pæle, hvor bæreevnen er fastlagt ud fra rammemodstand, bestemmes den regningsmæssige bæreevne af: $R_{c;k} = R_{c,m} / (\gamma_b \times \xi)$, hvor $\xi = 1,5$ gælder for bæreevnen baseret på geostatisk beregning og/eller en rammeformel, $\xi = 1,25$ hvor bæreevnen for den betragtede pæl desuden er analyseret ved stødbølgemålinger og $\xi = 1,4$ for de pæle, hvor stødbølgemålingen er repræsentativ.

Anvendelsesgrænsetilstanden (SLS)

Jordtryk og stabilitet

Tangens til friktionsvinkel (gælder for $\tan \phi'$)	$\gamma_{\phi'} = 1,00$
Effektiv kohæsion	$\gamma_{c'} = 1,00$
Udrænet forskydningsstyrke	$\gamma_{cu} = 1,00$
Simpel trykstyrke	$\gamma_{qu} = 1,00$
Rumvægt	$\gamma_r = 1,00$

Bæreevne for rammede pæle

Spids	$\gamma_b = 1,00$
Overflade (tryk)	$\gamma_s = 1,00$
Total/kombineret (tryk)	$\gamma_t = 1,00$
Overflade (træk)	$\gamma_{s,t} = 1,00$

For pæle, hvor bæreevnen er fastlagt ud fra rammemodstand, bestemmes den regningsmæssige bæreevne af: $R_{c;k} = R_{c,m} / (\gamma_b \times \xi)$, hvor $\xi = 1,0$ for selve den

prøvebelastede pæl og $\xi = 1,0$ for øvrige hvor prøvebelastningen er repræsentativ.

Ulykkesgrænsetilstanden (ALS)

Jordtryk og stabilitet

Tangens til friktionsvinkel (gælder for $\tan \varphi'$)	$\gamma_{\varphi'} = 1,00$
Effektiv kohæsion	$\gamma_c = 1,00$
Udrænet forskydningsstyrke	$\gamma_{cu} = 1,00$
Simpel trykstyrke	$\gamma_{qu} = 1,00$
Rumvægt	$\gamma_r = 1,00$

Bæreevne for rammede pæle

Spids	$\gamma_b = 1,00$
Overflade (tryk)	$\gamma_s = 1,00$
Total/kombineret (tryk)	$\gamma_t = 1,00$
Overflade (træk)	$\gamma_{s,t} = 1,00$

For pæle, hvor bæreevnen er fastlagt ud fra rammemodstand, bestemmes den regningsmæssige bæreevne af: $R_{c,k} = R_{c,m} / (\gamma_b \times \xi)$, hvor $\xi = 1,0$ for selve den prøvebelastede pæl og $\xi = 1,0$ for øvrige hvor prøvebelastningen er repræsentativ.

3.3 Efterspænding

For efterspændte broer beregnes betonspændinger i konstruktionen i tre tilfælde; stadium 1, stadium 2 og stadium 3.

3.3.1 Stadium 1

Stadium 1 er en anvendelsesgrænsetilstand svarende til et tidspunkt umiddelbart efter opspændingen af kablerne (14 dage efter støbning) og før udførelse af belægning samt uden last fra sætningsplade og autoværn. Der regnes med, at der på dette stadium ikke er foregået noget svind og krybning af betonen (hvilket er en tilnærmelse). Der regnes ikke med nogen variabel last i stadium 1.

Lastkombination SLS:

$$1,0 \times \text{Egenvægt} + 1,0 \times \text{Forspænding (ekskl. relaksation)}$$

Ved beregning i stadium 1 tillades ikke trækspændinger i betonen. Samtidig tilstræbes, at den maksimale betonspænding i overbygningen, når den slappe armering endnu ikke er inddraget, ikke overskrider 21 MPa, svarende til ca. 50 % af betonens aktuelle karakteristiske trykstyrke.

3.3.2 Stadium 2

Dette er en anvendelsesgrænsetilstand efter et længere forløb (20 år efter støbning), hvor betonens svind og krybning samt spændarmeringens relaksation er tilnærmelsesvis afsluttet.

Lastkombination SLS:

- 1,0 Total egenvægt + forspænding + svind, krybning og relaksation
- 1,0/0,0 Egenvægt sætningsplade
- 1,0/0,0 Lodret Trafiklast
- 1,0/0,0 Trafiklast på sætningsplade

1,0/0,0 betyder, at i tilfælde af at lasten er til ugunst, medtages denne med partialkoefficienten 1,0; ellers udelades lasten.

Ved beregning i stadium 2 tilstræbes, at følgende maksimale betonspændinger i overbygningen, når den slappe armering endnu ikke er inddraget, ikke overskrides. Dette er erfaringsmæssige spændingsniveauer, der tilstræbes ved indledende dimensionering af forspændingen før de endelige revnevidde- og brudberegninger.

Træk Mindre end 4,0 - 5,0 MPa (sikrer normalt, at det ikke er vanskeligt at overholde krav til revnevidder i anvendelsesgrænsetilstanden og krav til udnyttelsesgrader for beton og armering i brudgrænsetilstanden).

Tryk 21 MPa svarende til ca. 100 % af betonens regningsmæssige trykstyrke.

3.3.3 Stadium 3

Dette er anvendelsesgrænsetilstanden efter et længere forløb (20 år), hvor betonens svind og krybning samt spændarmeringens relaksation er tilnærmelsesvis afsluttet.

Lastkombination SLS:

- 1,0 Total egenvægt + forspænding + svind, krybning og relaksation
- 1,0/0,0 Egenvægt sætningsplade
- 1,0/0,0 Differenssætninger

1,0/0,0 betyder, at i tilfælde af at lasten er til ugunst, medtages denne med partialkoefficienten 1,0; ellers udelades lasten.

Der må ikke optræde trækspændinger i forspændte dele af broen.

4 Materialer og eftervisning

4.1 Beton

Betonstyrkerne for de bærende konstruktioner fastlægges ud fra de relevante miljøklasser.

Brodæk:	$f_{ck} =$	35 MPa / A
Kantbjælker:	$f_{ck} =$	40 MPa / E
Vægge, fløje og søjler (mere end 3 m fra kanten af nærmeste kørebane):	$f_{ck} =$	35 MPa / A
Vægge, fløje og søjler (indenfor 3 m fra kanten af nærmeste kørebane):	$f_{ck} =$	40 MPa / E
Sætningsplader:	$f_{ck} =$	35 MPa / A
Fundamenter (frost):	$f_{ck} =$	35 MPa / A
Fundamenter (ikke frost):	$f_{ck} =$	35 MPa / M
Renselag / ekstra fundering:	$f_{ck} =$	15 MPa / P
Pæle:	$f_{ck} =$	40 MPa / M

Varmeudvidelseskoefficient:	$\beta =$	10^{-5} m/(m °C)
Poisson's forhold:	$\nu =$	0,15 -

4.2 Slap armering

Der anvendes armering jf. DS/INF 165, symbol Y.

Duktilitet klasse:	B	
Flydespænding, træk:	$f_{yk} =$	550 MPa
Flydespænding, tryk:	$f_{yck} =$	550 MPa
E-modul:	$E =$	200000 MPa
Varmeudvidelseskoefficient:	$\beta =$	10^{-5} m/(m °C)
Flydetøjning:	$\epsilon_{sy} =$	2,75 ‰

4.3 Spændarmering

I broer med spændarmering anvendes data svarende til System Freyssinet 13C15 og liner med lav relaxsation.

Areal pr. tråd:	A =	150 mm ²
Karakteristisk flydespænding:	f _{yk} =	1860 MPa
Elasticitetsmodul:	E =	200000 MPa
Varmeudvidelseskoefficient:	β =	10 ⁻⁵ m/(m °C)
Låsetab 13C15:	L =	4 mm
Kabelfriktion:	μ =	0,20 -
Wobble faktor	k =	0,0025 m ⁻¹

Freysinet 13C15

- Trækbrudstyrke pr. tråd P₀ ≥ 279 kN
- Prøvespænding pr. tråd ved 1 % forlængelse P_{0,1} ≥ 240 kN.

Maksimal opspændingsgrad sættes til 75 % af den karakteristiske flydespænding.

4.4 Dæklag

Dæklagstykkelsen for de bærende konstruktioner fastlægges ud fra de relevante miljøklasser iht. EN 1992-2 DK NA, der angiver C_{min, dur}.

Tolerancen på foreskrevet dæklag er ±5 mm, hvorved de nominelle dæklag i beregningerne er som følger:

Slap armering

Brodæk:	50 mm
Kantbjælker og tilsvarende uisolerede overflader:	60 mm
Vægge, fløje og søjler:	50 mm
Sætningsplader:	50 mm
Fundamenter (frost):	50 mm
Fundamenter (ikke frost):	40 mm
Renselag / ekstra fundering:	-

Spændt armering i foringsrør

Brodæk:	60 mm
Kantbjælker og tilsvarende uisolerede overflader:	70 mm

4.5 Tilladelig revnevidde, spænding og deformation

4.5.1 Generelle krav

Revnevidde

I alle interimstilfælde med egenvægt og initialforspænding er maksimal tilladelig revnevidde 0,30 mm.

Spænding

Under opspænding er der følgende spændingskrav:

- Forspændt armering: $\sigma_{p,max} \leq \min\{0,8f_{pk} ; 0,9f_{p0,1k}\}$
- Betontrykspændinger: $\sigma_c \leq 0,60f_{ck}(t)$

For den *karakteristiske lastkombination* er der følgende spændingskrav:

- Betontrykspændinger: $\sigma_c \leq 0,60f_{ck}$
- Armeringstrækspændinger: $\sigma_s \leq 0,8f_{yk}$
- Armeringstrækspændinger: $\sigma_s \leq 1,0f_{yk}$, hvis pga. tvangsdeformationer
- Forspændt armering: $\sigma_s \leq 0,75f_{pk}$

For den *kvasi-permanente lastkombination* er overholdes følgende spændingskrav, hvorved lineær krybning kan antages:

- Betontrykspændinger: $\sigma_c \leq 0,45f_{ck}$
- Betontrækspændinger: Forspændte betonkonstruktioner skal være fri for trækspændinger nær overflader i snit vinkelret på forspændingen

Deformation

Nedbøjningerne fra bevægelig last bør højst andrage 1/400 af spændvidden.

4.5.2 Overbygning - tilladelige revnevidder og trækspændinger

I det følgende angives tilladelige revnevidder w_{max} og tilladelige trækspændinger for overbygningen for hhv. hyppige og kvasi-permanente lastkombinationer. Nedenstående tabeller er illustreret i Bilag 1.

Forspændte dele (se Note)			
Hyppige lastkombinationer			
For revnedannelse på tværs af forspændingsretning	Dækoverside, hvor forspænding er nær overflade	Dækunderside, hvor forspænding er nær overflade	Kantbjælker

w_{max}	0,20 mm	0,20 mm	0,10 mm
For revnedannelse på langs af forspændingsretning	Dækunderside og dækoverside, hvor forspænding er langt fra overflade	Dækunderside og dækoverside, hvor forspænding er nær overflade	Kantbjælker
w_{max}	0,30 mm	0,20 mm	0,20 mm
Kvasi-permanente lastkombinationer			
Tværsnittet skal være trækspændingsfri nær overflader			
Note:			
Forspændte dele defineres som de dele af tværsnittet, der ligger indenfor en afstand på 400 mm fra kabelrørets center, og således betyder:			
"Nær" = center af kabelrøret ligger <i>under</i> 400 mm fra den betragtede overflade.			
"Langt fra" = center af kabelrøret ligger <i>over eller lig</i> 400 mm fra den betragtede overflade.			

Tabel 3: Overbygning - Forspændte dele - Tilladelige revnevidder og trækspændinger

Slapt armerede dele			
Hyppe lastkombinationer			
In situ støbt brodæk	Dækoverside under isolering	Dækunderside	Kantbjælker
w_{max}	0,30 mm	0,30 mm	0,20 mm

Tabel 4: Overbygning - Slapt armerede dele - Tilladelige revnevidder

4.5.3 Underbygning - tilladelige revnevidder

I det følgende angives tilladelige revnevidder w_{max} for underbygningen for hyppe lastkombinationer

Slapt armerede dele (Søjler, endevederlag, fløjvægge og fundamenter)		
Hyppe lastkombinationer		
In situ støbt underbygning	Søjler, vægge og fundamenter mod jord eller mod vejrummet	Fundamenter, der ikke er udsat for aggressivt miljø
w_{max}	0,30 mm	0,40 mm

Tabel 5: Underbygning - Slapt armerede dele - Tilladelige revnevidder

4.6 Fundering

De geotekniske data for dimensionering af fundamenter og bæreevne af pæle henvises til den nedenstående tabel, som skal opdateres når den endelige geotekniske rapport er forelagt. Der anvendes en stort set normal direkte fundering på intakte jordlag. Der regnes på to funderingstilfælde, et ler- og et sandtilfælde. Der regnes med vandspejl over funderingskoten, da afvandingen dimensio-

neres for et 25års scenarie. Der anbefales filterboringer inden udgravning. Der etableres dræn ved broender for dræning af vægge og sporopbygning.

Skemaet forneden udfyldes senere når den endelige geotekniske rapport er udarbejdet.

Bro	Dybde af overside bæredygtigt lag under eksisterende terræn [m]	Jordtype	Φ' [°]	c_u [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	γ/γ' [kN/m ³]	K [kN/m ²]
344-2005							
344-3005							
344-4005							
344-6004							
344-6005							
344-8004							
344-8005							
344-9004							

Tabel 6: Geotekniske data

Sætninger regnes til en dybde til 20 m under FUK. Under nederste lag regnes der med samme K-værdi som for nederste lag.

For fremtidigt udgravningsniveau regnes der med en ensidig afgravning på 1 m under fremtidig JOF på forsiden af understøtningerne.

5 Beskrivelse af beregningsmodel

Hovedparten af beregninger og analyser gennemføres med COWI's Integrerede Bro Design og Analyse System (IBDAS). IBDAS er et af COWI udviklet system, som integrerer geometriske, statiske og dynamiske analyser med tegningsproduktion og dokumentation. Eurocodes og banenormen er indarbejdet i IBDAS database systemet, hvorved alle beregningsresultater og dokumentation automatisk foregår i henhold til det danske norm- og belastningssystem.

Vha. IBDAS genereres en 3-dimensional (3-D) geometrisk model af vejsystemet og den aktuelle bro. Den geometriske 3-D model omformes af IBDAS til en analysemodel (FE-model), der bruges til statiske beregninger. Den geometriske 3-D model bruges i forbindelse med kontrol af systemlinier, generering af tegninger samt til beregning af mængder.

For trafiklast og anden bevægelig last kan der vha. IBDAS analyseres den mest kritiske lastopstilling for enhver snitkraft i ethvert punkt. Den kritiske lastopstilling kan rapporteres med tilhørende værdier af snitkræfter.

IBDAS systemet er opbygget parametrisk, således at ændringer i geometri, last eller materialeegenskaber hurtigt og konsekvent lader sig dokumentere for det samlede projekt hvad angår tegninger og sammenhørende beregninger.

5.1 Enheder

Enheder for input og output i IBDAS angives som vist i nedenstående Tabel 4:

Længder	Kræfter	Momenter	Spændinger
m	MN	MNm	MPa

Tabel 7: Enheder i IBDAS

5.2 Pladebroer

Modellen, som anvendes til pladebroer, kaldes BRIDGE.

Pladebroer kan regnes understøttet på søjler, vægge og kombinationer heraf. Alle typer understøtningsforhold kan modelleres.

5.2.1 Statisk system

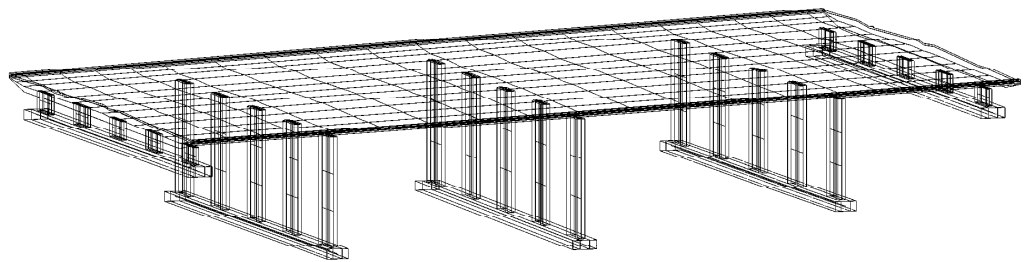
Der benyttes nedenstående statiske system til beregning af overføringerne. Generelt er søjlerne fastinspændt i fundamentene og med betoncharnier i toppen, svarende til deteksisterende forhold.



Figur 1: Statisk system for overføringerne.

5.2.2 FEM-modellering af broer

Selve pladen bygges op af skalelementer. Kantbjælker opbygges som bjælkeelementer. For et eksempel på en FEM-model, se nedenstående figur 2:

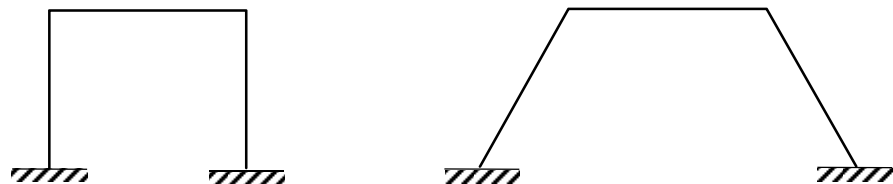


Figur 2: FEM-model

5.3 Rammebroer

Modellen, som anvendes til rammebroer, kaldes FRAME.

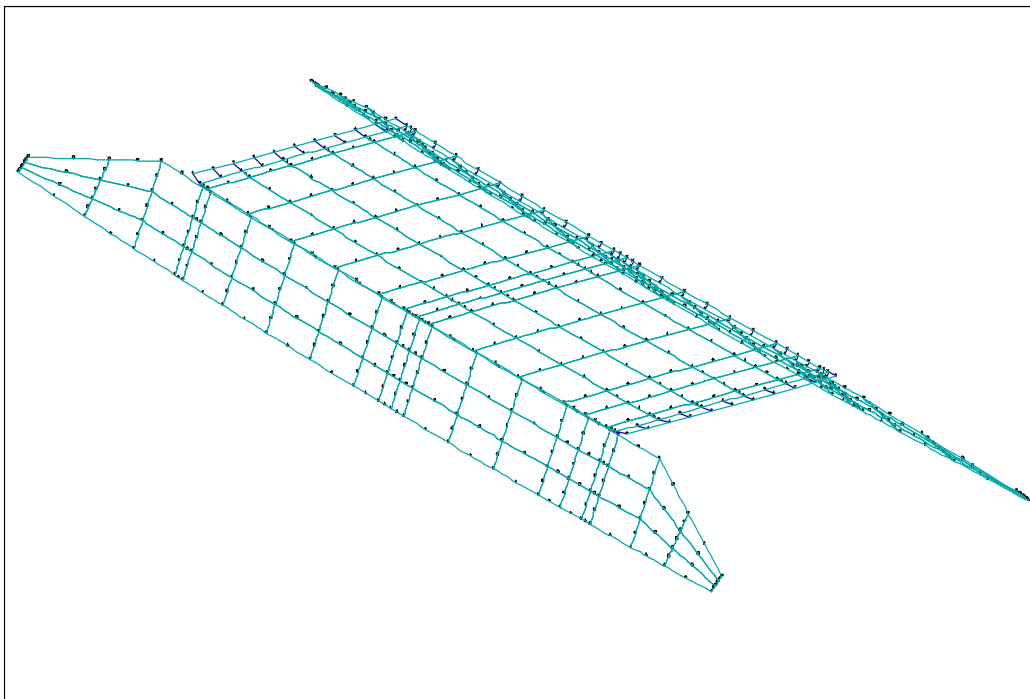
Konstruktionen regnes som fastinspændt ved foden af vægge, svarende til de eksisterende forhold.



Figur 3: Statisk system

5.3.1 FEM-modellering af broer

Selve rammen bygges op af skalelementer. Kantbjælker opbygges som bjælkeelementer. For et eksempel på en FEM-model, se nedenstående figur 4:



Figur 4: FEM-model

5.4 Elementtyper i bromodeller

Bromodellerne er som nævnt opbygget af bjælke- og skalelementer. Selve elementerne er beskrevet i det efterfølgende.

Elementer er defineret ved deres knuder, hvor reaktioner og deformationer beregnes.

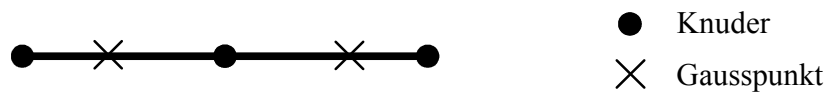
Snitkræfter beregnes i de såkaldte gausspunkter.

Beregningsresultater kan rapporteres i gausspunkterne eller på randen af elementerne. Resultaterne på randen af elementerne er ekstrapoleret ud fra gausspunkterne. Se afsnit 6.1.1.

For plade- og rammebroer skal armeringen i den kombinerede bjælke-skalmmodel indlægges i analysemodellen, så udnyttelsesgraderne for revner og brud kan beregnes.

Bjælkeelementer

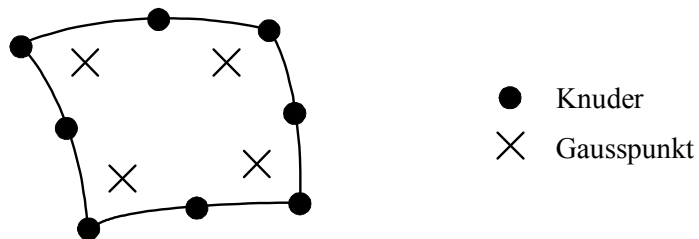
Et bjælkeelement består af 3 knuder og 2 gausspunkter, se nedenstående figur 5:



Figur 5: Bjælkeelement med knuder og gausspunkter

Skalelementer

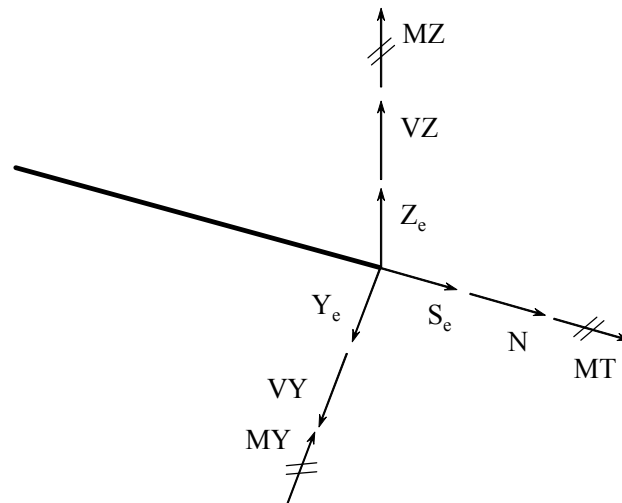
Et skalelement består af 8 knuder og 4 gausspunkter, se nedenstående figur 6:



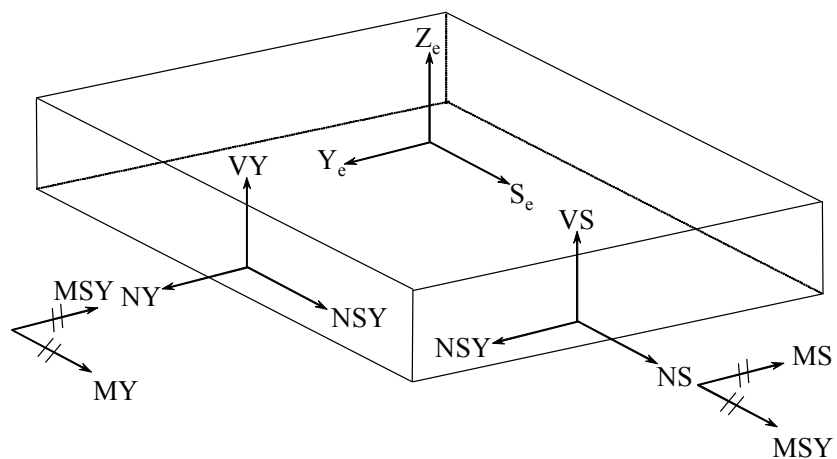
Figur 6: Skalelement med knuder og gausspunkter

5.5 Snitkraftsdefinition

For bjælke- og skalelementer gælder fortegn, se nedenstående figur 7 og 8:



Figur 7: Venstre-hånds koordinatsystem i bjælkeelementer



Figur 8: Venstre-hånds koordinatsystem i skalelementer

6 Eftervisning

Resultaterne fra de forskellige statiske undersøgelser rapporteres ved hjælp af plot af konstruktionsdelen, hvorpå de søgte deformationer, spændinger, kræfter eller udnyttelsesgrader er vist. Endvidere kan tabeller udskrives.

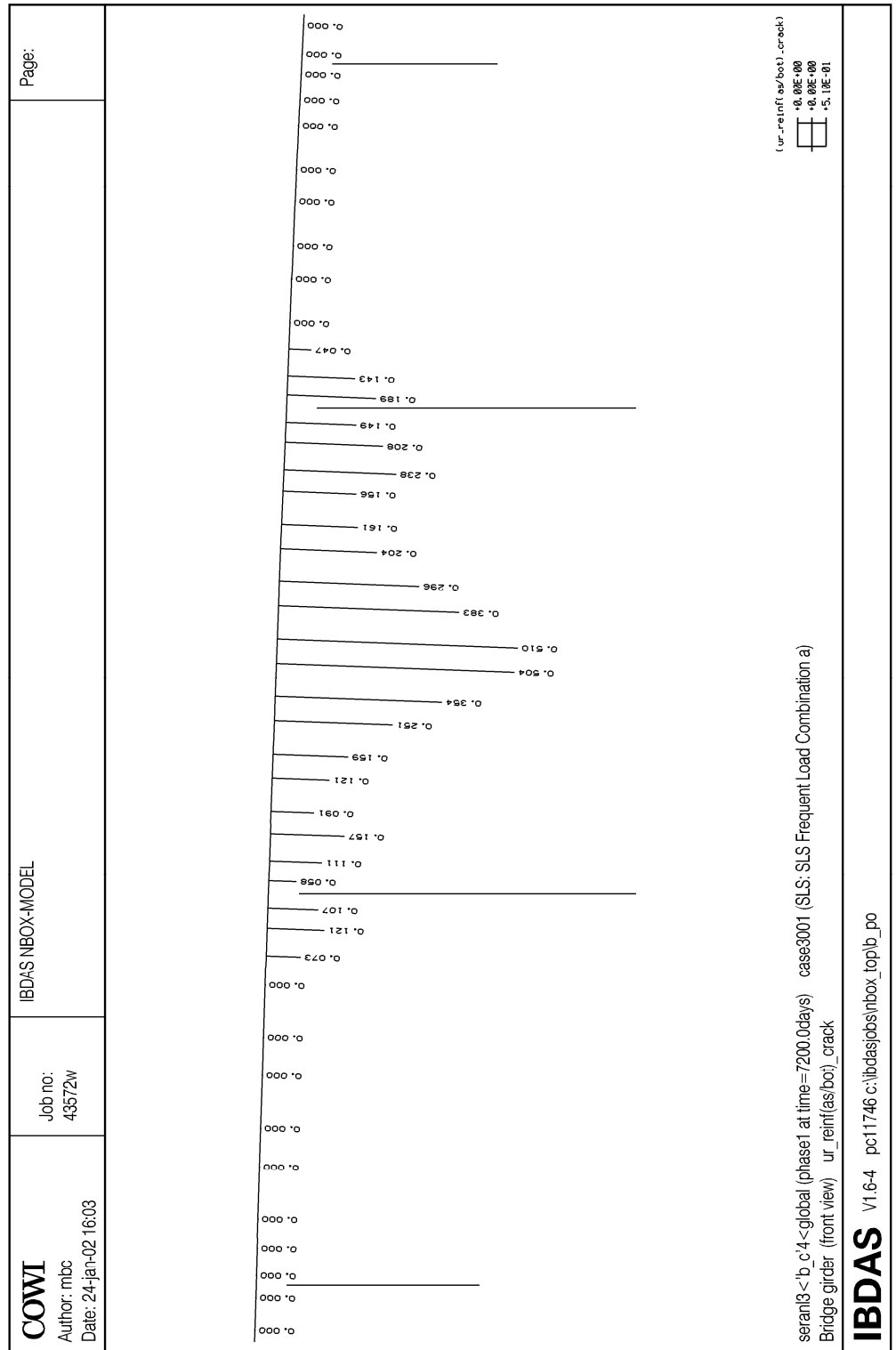
6.1 Generelt

6.1.1 Overbygning

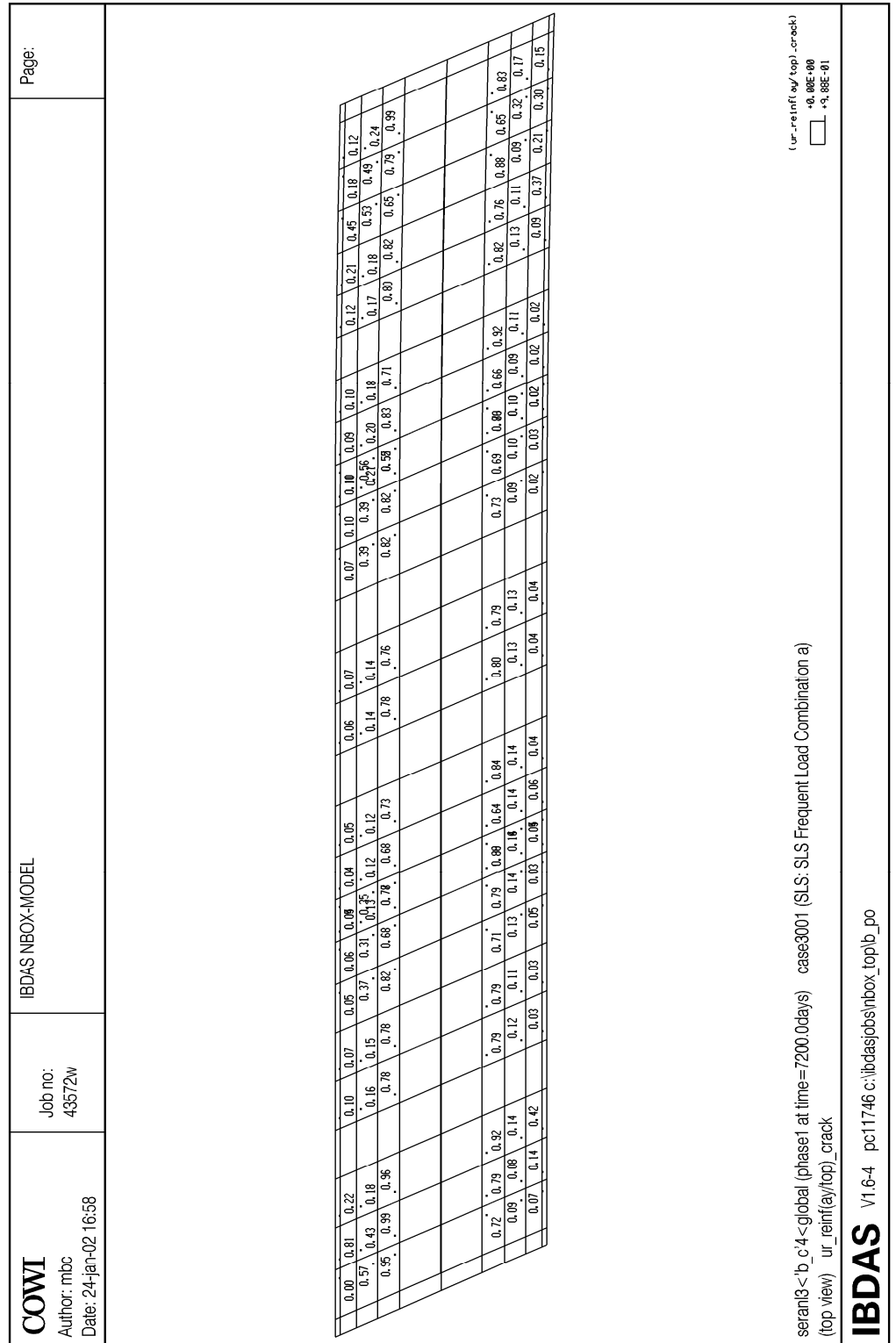
Som beskrevet tidligere kan overbygningen betragtes som en kombineret bjælke-skalmodel.

På nedenstående figur 9 og 10 er der vist henholdsvis en bjælke-model og en kombineret bjælke-skalmodel. På hvert plot findes der oplysninger om hvad plottet viser:

- programnavn
- dato
- klokkeslæt
- broens navn
- hvilken lastkombination der er regnet med
- konstruktionens alder ved beregningen
- hvilken konstruktionsdel der er undersøgt
- hvilket fag der er undersøgt
- hvilken effekt der er undersøgt



Figur 9: Effektplot for bjælke model



Figur 10: Effektplot for skalmodel

Der analyseres følgende effekter :

Brudgrænsetilstanden ULS :

Undersøgelse af beton- og armeringsspændinger

Anvendelsesgrænsetilstanden SLS :

Undersøgelse af nedbøjninger u_z , revnevidder w og beton- og armeringsspændinger.

Ulykkesgrænsetilstanden ALS :

Undersøgelse af beton- og armeringsspændinger

Rapportering

Effekterne bestemmes som udnyttelsesgrader, dvs. den fundne spænding eller revnevidde sættes i forhold til den maksimalt tilladelige. Der kan i de to elementtyper (bjælker og skaller) vælges mellem de i det følgende angivne effekter.

Effekter i bjælkeelementer :

Snitkræfter:

totalt (se figur 8): $t_{ns}/t_{my}/t_{mz}/t_{vy}/t_{vz}/t_{mt}$

Spændinger:

sss: normalspænding i bjælkeaksens retning (kan vælges i et vilkårligt punkt i tværsnittet)

Udnyttelsesgrader (ur), svarende til ULS-krav (regningsmæssige materialeleværdier):

ur_stirrup:	ur for forskydningsarmering
ur_conc_dcomp:	ur for diagonaltryk i beton
ur_conc_comp:	ur for beton, tryk fra normalkraft og bøjning
ur_reinf_tens:	ur for langsgående armering, træk, resumé
ur_reinf(as/bot)_tens:	ur for langsgående armering i underside, træk
ur_reinf(as/top)_tens:	ur for langsgående armering i overside, træk
ur_reinf(as/prest)_tens:	ur for spændt armering, træk

Udnyttelsesgrader (ur), svarende til SLS-krav (karakteristiske materialeleværdier):

ur_conc_comp_char:	ur for beton, tryk fra normalkraft og bøjning
ur_reinf(as/bot)_tens_char:	ur for langsgående armering i underside, træk
ur_reinf(as/top)_tens_char:	ur for langsgående armering i overside, træk
ur_reinf(as/prest)_tens_char:	ur for spændt armering, træk
ur_reinf_crack:	ur for langsgående armering, revner, resumé
ur_reinf(as/bot)_crack:	ur for langsgående armering i underside, revner
ur_reinf(as/top)_crack:	ur for langsgående armering i overside, revner

Deformationer:

uz: Deformationer i lodret retning

Effekter i skalelementer

Snitkræfter:

totalt (se figur 9): $t_{ns}/t_{ny}/t_{nsy}/t_{ms}/t_{my}/t_{msy}/t_{vy}/t_{vz}$

Spændinger:

sss_bot/syy_bot: normalspænding i underside i s/y-aksens retning

sss_top/syy_top: normalspænding i overside i s/y-aksens retning

Udnyttelsesgrader (ur), svarende til ULS-krav:

ur_stirrup: ur for forskydningsarmering
ur_conc_dcomp: ur for diagonaltryk i beton
ur_conc_dtens: ur for træk i beton, ikke-forskydningsarmeret plade
ur_conc_comp: ur for tryk i beton
ur_reinf_tens: ur for armering, træk, resumé
ur_reinf(as/bot)_tens: ur for armering i s-aksens retning i underside, træk
ur_reinf(ay/bot)_tens: ur for armering i y-aksens retning i underside, træk
ur_reinf(as/top)_tens: ur for armering i s-aksens retning i overside, træk
ur_reinf(ay/top)_tens: ur for armering i y-aksens retning i overside, træk

Udnyttelsesgrader (ur), svarende til SLS-krav:

ur_conc_comp_char: ur for tryk i beton
ur_reinf(as/bot)_tens: ur for armering i s-aksens retning i underside, træk
ur_reinf(ay/bot)_tens: ur for armering i y-aksens retning i underside, træk
ur_reinf(as/top)_tens: ur for armering i s-aksens retning i overside, træk
ur_reinf(ay/top)_tens: ur for armering i y-aksens retning i overside, træk
ur_reinf_crack: ur for armering, revner, resumé
ur_reinf(as/bot)_crack : ur for armering i s-aksens retn. i underside, revner
ur_reinf(ay/bot)_crack: ur for armering i y-aksens retn. i underside, revner
ur_reinf(as/top)_crack: ur for armering i s-aksens retn. i overside, revner
ur_reinf(ay/top)_crack: ur for armering i y-aksens retn. i overside, revner

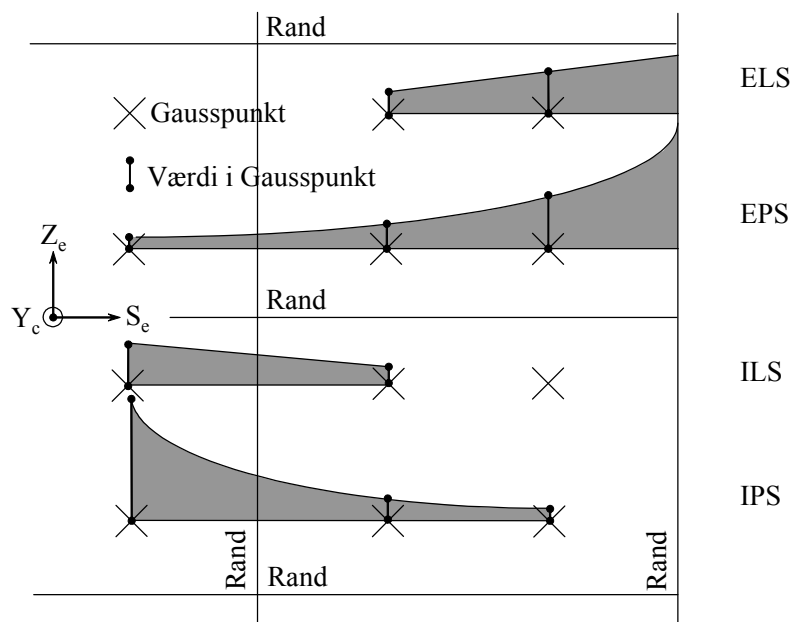
Deformationer:

uz: Deformationer i lodret retning

Ekstrapolation af effekter

Efter en række af effekterne ses følgende forkortelser, se nedenstående figur 11:

- eps: den angivne effekt er fundet ved ekstrapolation parabolisk til elementets rand i s-aksens retning.
- epy: den angivne effekt er fundet ved ekstrapolation parabolisk til elementets rand i y-aksens retning (kun skalelementer).
- els: den angivne effekt er fundet ved ekstrapolation lineært til elementets rand i s-aksens retning.
- ely: den angivne effekt er fundet ved ekstrapolation lineært til elementets rand i y-aksens retning (kun skalelementer).
- ips: den angivne effekt er fundet ved interpolation parabolisk til elementets rand i s-aksens retning.
- rly: afrundet momentkurve over understøtningen, anvendes kun i forbindelse med forspænding.
- etc.

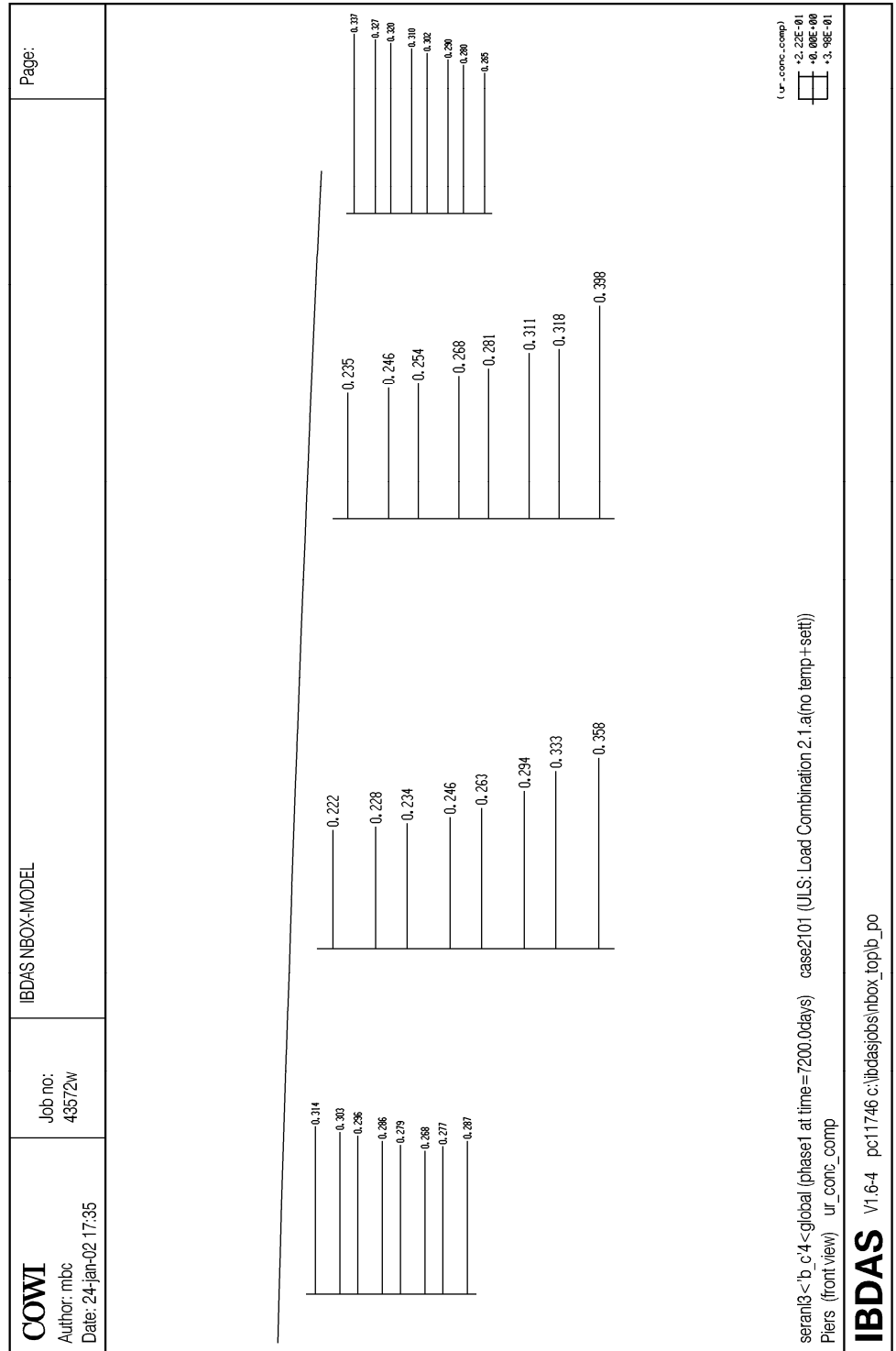


Figur 11: Ekstrapolation/interpolation af værdierne i gausspunkterne vist for skalelementer i S-aksens retning

Hvor intet er markeret, er effekten angivet i gausspunktet.

6.1.2 Underbygningen

Da søjlerne er modelleret som bjælker, kan de samme effekter som angivet for overbygningen beregnes. Se nedenstående figur 12:



Figur 12: Effektplot for søjler

Fundamenter

Analysemodellens nederste knude er beliggende umiddelbart over fundamentsoversiden. Derfor udføres fundamentsberegningerne ved hjælp af et applikationsprogram, som er tilknyttet IBDAS. Fra fundamentsoversiden ekstrapoleres snitkræfterne ned til fundamentsunderside. Endvidere medtages tyngden for det over fundamentene liggende jordvolumen.

For broer med to eller flere rækker søjler kan der foretages beregninger med separate fundamenter under søjlerne, eller der kan foretages beregninger med ét sammenhængende fundament under søjler, der står overfor hinanden.

Beregningerne udføres som brudberegninger på den underliggende jord.

Hvor forholdende tillader det, kan der anvendes parametre i henhold til COWI notat, "Bæreevne af fundamenter i sandskrånninger med endelig højde", af juli 1993, såfremt dette ønskes.

Resultaterne fra beregning af jordens bæreevne rapporteres i form af rapporter, som angiver:

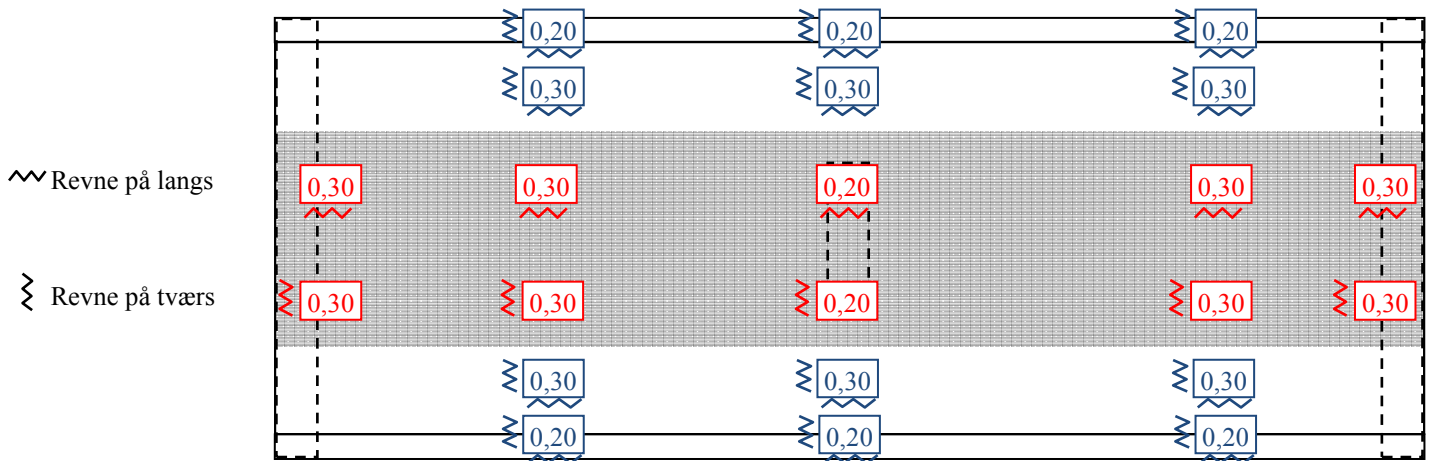
- lodret last
- vandret last
- effektiv bredde
- effektiv længde
- den aktuelle spænding i jorden
- jordens bæreevne
- udnyttelsesgrader

Resultater rapporteres for hvert enkelt fundament i form af tabeller, hvoraf søgte deformationer, spændinger, kræfter eller udnyttelsesgrader er angivet.

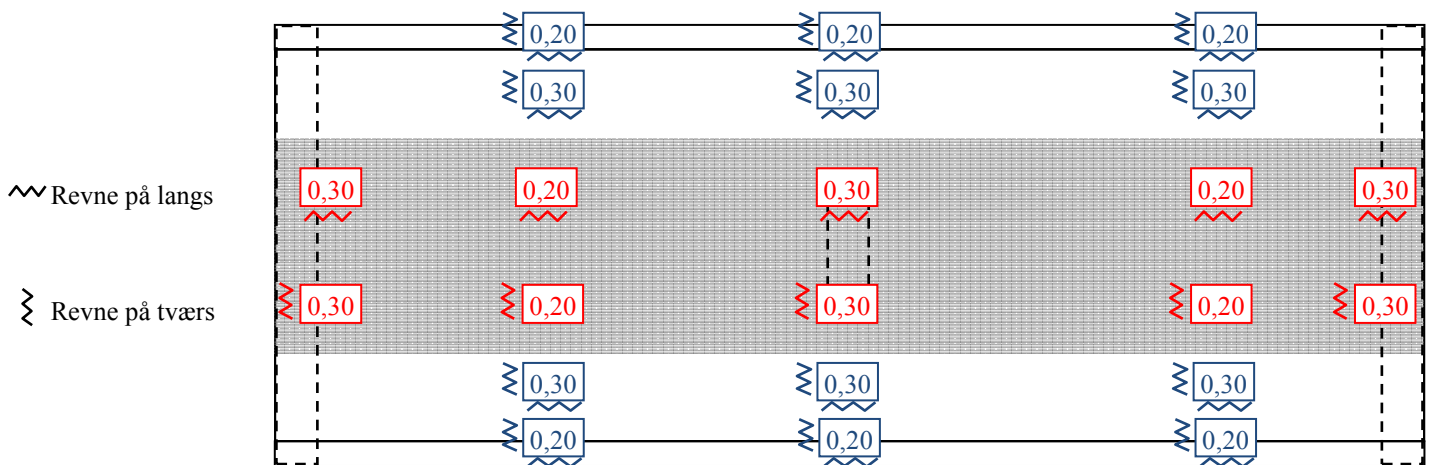
Ved andre funderingsmetoder end direkte fundering eller rammede pæle skal anvendes andre designværktøjer.

7 Bilag 1

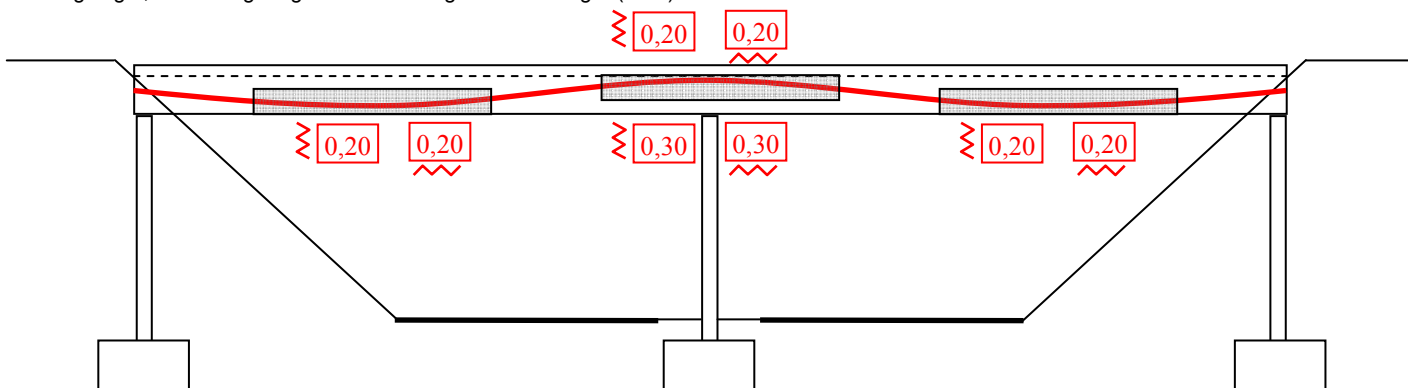
Nedenstående figurer illustrerer krav til w_{\max} (mm) for overbygning med spændt og slap armering.



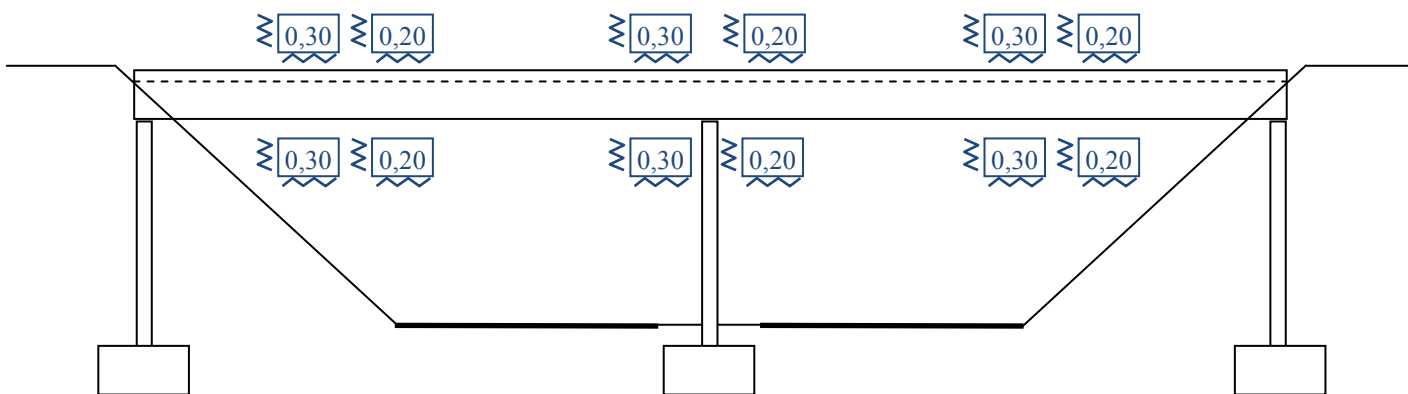
Plan - Dækoverside



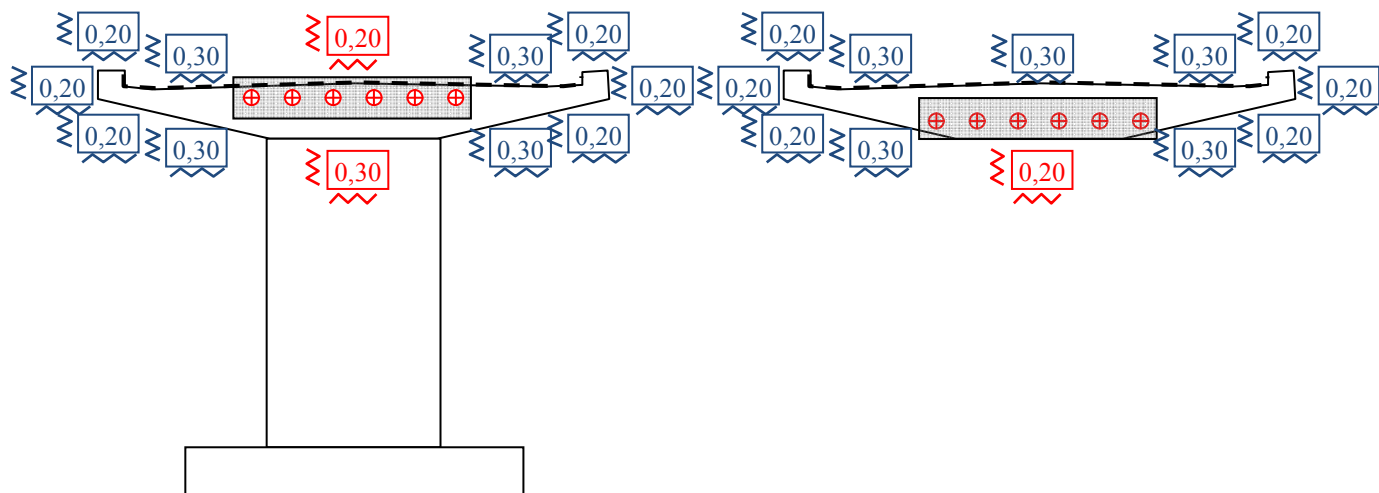
Plan - Dækunderside



Længdesnit ved forspænding



Længdesnit ved slap armering (dæk hhv. kantbjælke)



Tværsnit ved mellemunderstøtning

Tværsnit i fag