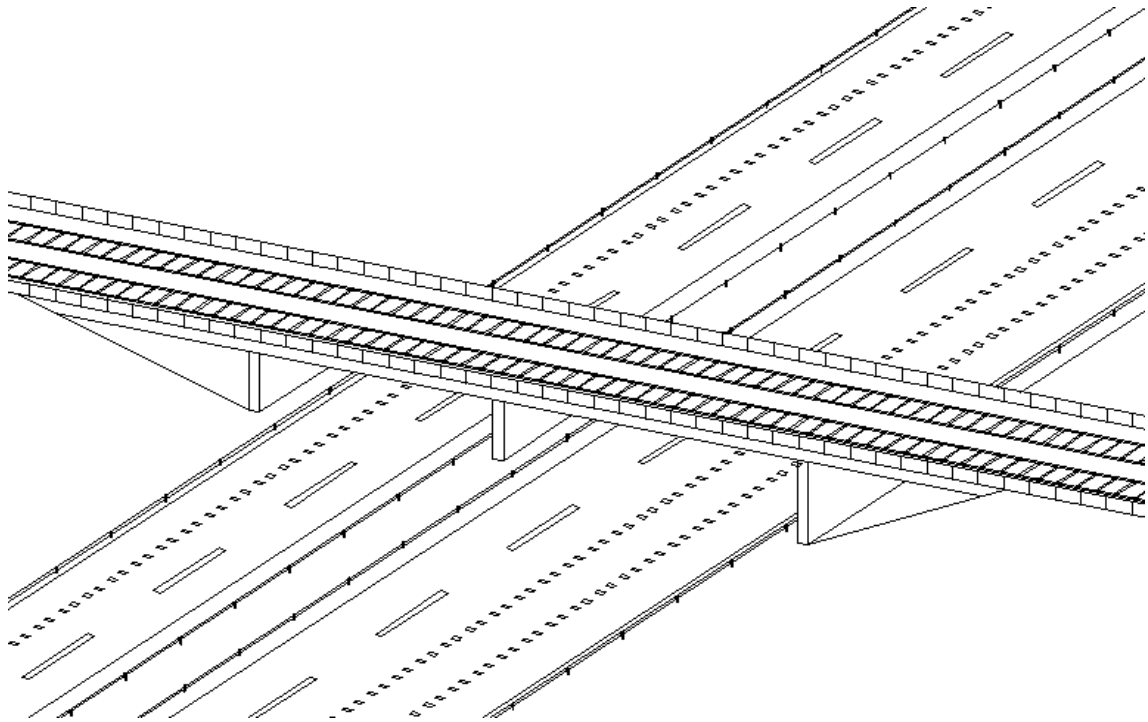


# Projektering af Letbanebro over Djurslandmotorvejen

---

Projektgrundlag



Bachelorprojekt

Diana Mogensen

Aalborg Universitet Esbjerg

Den 7. januar 2016



**AALBORG UNIVERSITY**  
STUDENT REPORT

## Titelblad

**Titel:** Projektering af Letbanebro over Djurslandmotorvejen  
**Tema:** Bachelorprojekt  
**Uddannelse:** Diplomingeniøruddannelsen i Byggeri og anlæg  
**Speciale:** Bygge- og anlægskonstruktion  
**Institution:** Aalborg Universitet Esbjerg  
**Forfatter:** Diana Mogensen  
**Projektperiode:** 15/10/2015 – 7/1/2016  
**Vejleder:** Lisbet T. Pedersen, COWI Esbjerg

### Aflevering:

7. januar 2016

### Udarbejdet af:



Diana Mogensen

### Sideantal:

48

### Synopsis

Projektet omhandler projekteringen af en Letbanebro over Djurslandmotorvejen. Rapporten er opstillet som en statisk dokumentation for bærende konstruktioner, og indeholder således projektgrundlag samt eftervisning af letbanebroens bærende konstruktioner.

Projektgrundlaget eksplicerer de forudsætninger, der ligger til grund for de statiske beregninger. Herunder fastlæggelse af laster og lastkombinationer for de forskellige grænsetilstande. Desuden er der i grundlaget forklaret, hvad der ligger til grund for valg af udformning inklusive materialer og statisk system.

I de statiske beregninger fremgår eftervisningen af konstruktionen for brud og anvendelse. Til bestemmelse af de optrædende snitkræfter og deformationer for udvalgte lastkombinationer er der anvendt håndberegninger og et simpelt bjælkeanalyse program - WinBeam.

## Forord

Dette bachelorprojekt er udarbejdet af studerende Diana Mogensen ved Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet Esbjerg. Projektforløbet strækker sig fra d. 15. oktober 2015 til d. 7. januar 2016.

Baggrunden for rapporten er tidligere semestres tillærte færdigheder, herunder erfaringer gjort under praktikopholdet hos COWI, som også bistår som vejleder på projektet. COWI har endvidere stillet tegningsmateriale, samt rapport over de geotekniske forhold til rådighed.

Rapporten tager udgangspunkt i behovet for en underføring af Djurslandmotorvejen i forbindelse med etableringen af Aarhus Letbane. Der er i forbindelse med udarbejdelsen af rapporten søgt information fra diverse informationskilder – både elektroniske og skriftlige.

## Læsevejledning

Projekteringen af den nye Letbanebro over Djurslandmotorvejen er opdelt i to separate rapporter.

Nærværende rapport - projektgrundlaget beskriver de forudsætninger samt normer og standarder, der går forud for de statiske beregninger af broen. Herunder beskrivelse af den statiske virkemåde og fastsættelse af de laster, som Letbanebroen påvirkes af.

Konstruktionsdelen omhandler de statiske beregninger og altså eftervisningen af de bærende konstruktioner. De forskellige konstruktioner eftervises i overensstemmelse med krav, normer og standarder opstillet i projektgrundlaget.

Vedlagt er en separat appendiksmappe indeholdende blandt andet rapport over de geotekniske forhold samt beregningsudskrifter. Henvisning til appendiks forekommer løbende. Herudover vedlægges en tegningsmappe indeholdende konstruktionstegninger for Letbanebroen.

## Abstract

Aarhus is facing the establishment of Denmark's first light rail, which will create a more efficient public traffic network in East Jutland and help ensure good and direct connections to major destinations, both for the citizens in Aarhus and for the many travelers who commute to and from the hinterland. In Northern Aarhus the light rail is connecting the business district in Skejby with Lisbjerg. This light rail stretch crosses Søftenvej, Djurslandmotorvejen and a nature reserve by Egådal.

This bachelor concerns the design of the light rail bridge over Djurslandmotorvejen and will deal with the technical issues related to the design of a light rail bridge.

The report is set as a static documentation of supporting structures, thus includes project basis and design of the light rail bridge structures.

The project basis sets the design of the bridge as well as the considerations in the choice of this. In order to achieve a satisfying design of the light rail bridge, user's needs and aesthetics is considered in the choice of bridge-type, material, shape and dimension. The bridge is constructed as a massive slab bridge with cantilevers in order to obtain a sufficient ground clearance under the bridge and an aesthetic appearance. The light rail bridge is constructed in concrete, as this is the most economical material for highway bridges with smaller spans. Due to the huge traffic load the bridge is carried over 4 spans.

In addition necessary information for use in the design of individual structural elements is determined in the basis. This includes all influencing loads and load combinations, relevant assumptions and conditions associated with the design of structures. Furthermore used standards are set to ensure that the design meets the applicable norms.

The static calculation includes a general description of the structural system and design of the super- and substructure at ultimate and serviceability limit state. Due to the time scale accidental and fatigue limit state is only considered briefly. For determination of internal forces and deformations hand calculations and a simple beam analysis program - WinBeam - has been used. The construction is designed according to Eurocodes which are the European standards for design and construction of buildings and conventional structures such as bridges.

# Indhold

<b>1. INDLEDNING .....</b>	<b>6</b>
1.1 PROBLEMFORMULERING .....	7
1.2 AFGRÆNSNING .....	7
<b>2. INTRODUKTION OG OVERORDNET BESKRIVELSE .....</b>	<b>8</b>
<b>3. GRUNDLAG .....</b>	<b>10</b>
3.1 NORMER OG STANDARDER .....	10
3.2 PROJEKTFORUDSÆTNINGER .....	11
3.3 FRITRUMSPROFIL .....	11
3.4 SIKKERHED .....	14
3.5 IKT-VÆRKTØJER .....	14
3.6 REFERENCER .....	15
<b>4. BROUDFORMNING .....</b>	<b>16</b>
4.1 VALG AF BYGGEMATERIALE .....	16
4.2 VALG AF BROTYPE .....	16
4.3 VALG AF STATISK SYSTEM .....	17
4.3.1 <i>Betragtning forud for valg af antal fag</i> .....	18
4.3.2 <i>Statisk system</i> .....	18
4.4 KONSTRUKTIONERNES FORMER OG DIMENSIONER .....	20
4.4.1 <i>Tværsnitsudformning</i> .....	20
4.4.2 <i>Bropilleudformning</i> .....	21
4.5 VALG AF UDFØRELSESMETODE .....	22
<b>5. FORUNDERSØGELSER .....</b>	<b>23</b>
5.1 GRUNDEN OG LOKALE FORHOLD .....	23
5.2 GEOTEKNISKE FORHOLD .....	23
<b>6. LASTER .....</b>	<b>26</b>
6.1 LASTKOMBINATIONER .....	26
6.1.1 <i>Brudgrænsetilstand</i> .....	26
6.1.2 <i>Ulykkesgrænsetilstand</i> .....	28
6.1.3 <i>Anvendelsesgrænsetilstand</i> .....	28
6.2 PERMANENTE LASTER .....	29
6.3 VARIABLE LASTER .....	29
6.3.1 <i>Trafiklaster</i> .....	29
6.3.2 <i>Naturlaster</i> .....	35
6.4 ULYKKESLASTER .....	38
6.5 SEISMISK LAST .....	40
6.6 GEOMETRISKE IMPERFEKTIONER .....	40
<b>7. KONSTRUKTIONSMATERIALER .....</b>	<b>42</b>
7.1 GRUND OG JORD .....	42
7.2 BETON OG ARMERING .....	43
7.3 DÆKLAGSKRAV .....	44

<b>8.</b>	<b>KRAV TIL ANVENDELSESGRÆNSETILSTANDEN, SLS .....</b>	<b>45</b>
8.1	KRAV VEDRØRENDE MATERIALER .....	45
8.1.1	<i>Vejledende maksimale spændinger .....</i>	<i>45</i>
8.1.2	<i>Vejledende maksimale deformationer .....</i>	<i>45</i>
8.1.3	<i>Vejledende maksimale revnevidder .....</i>	<i>45</i>
8.2	KRAV TIL DEFORMATIONER OG VIBRATIONER .....	45
<b>9.</b>	<b>ANDRE KRAV .....</b>	<b>46</b>
9.1	LEVETID .....	46
9.2	ROBUSTHED .....	46
<b>10.</b>	<b>OPSUMMERING .....</b>	<b>47</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFI .....</b>	<b>48</b>

## 1. Indledning

Aarhus står over for etableringen af Danmarks første Letbane. Udvidelsen af den kollektive trafik med landets første letbane vil løfte byen fra verdens mindste storby til en metropol. (Aarhus Letbane)

Letbanen vil skabe et mere effektivt kollektivtrafiknet i Østjylland og hjælpe med at sikre gode og direkte forbindelser til de største rejsemål, både inden for Aarhus Kommune og for de mange rejsende, der pendler til og fra oplandet. (Midttrafik)

I det Nordlige Aarhus forbinder Letbanen erhvervsområdet i Skejby med Lisbjerg, hvor der er udviklingsplaner om nyt erhvervs- og boligområde. På denne strækning krydser letbanen Søftenvej, Djurslandsmotorvejen og et fredet naturområde ved Egådalen. (Aarhus Letbane)

Dette bachelorprojekt omhandler Letbanebroen, der skal underføre Djurslandsmotorvejen og vil behandle projektgrundlaget og de statiske beregninger for denne bro.

Projektgrundlagets formål er at danne et entydigt grundlag for projekteringen og skabe en forståelse af konstruktionens virkemåde. Projektgrundlaget omfatter alle relevante forudsætninger og forhold knyttet til de bærende konstruktioners projektering, både generelle og projektspecifikke.

De statiske beregninger fremgår af særskilt rapport. Der vil i denne rapport blive redegjort for broens vandrette og lodrette lastnedføring, og udvalgte konstruktionsdele vil blive eftervist.

## 1.1 Problemformulering

Projektet tager afsæt i behovet for en underføring af Djurslandmotorvejen, hvor Letbanes linjeføring krydser denne. Projektet vil behandle de tekniske problemstillinger i forbindelse med projekteringen af en letbanebro. Hvilket udmunder i følgende problemformulering.

### **Hvordan udformes en konstruktiv og statisk hensigtsmæssig letbanebro over Djurslandmotorvejen, hvor også æstetik overvejes?**

- Hvilke faktorer ligger til grund for broformningen? Herunder valg af brotype, byggematerialer, statisk system mm.
- Hvilke laster påvirkes konstruktionen af, og hvordan videreføres og optages disse?
- Hvordan eftervises konstruktionens lodrette og vandrette lastnedføring?
- Hvordan funderes konstruktionen mest hensigtsmæssig ud fra aktuelle jordbundsforhold?

## 1.2 Afgrænsning

Projektets formål er at give et bredt indblik i emner, der skal behandles i forbindelse med projekteringen af en banebro. Pga. tidshorisonten afgrænser projektet sig helt fra brodstyr som afvanding, rækværk belysning mm. Herudover vil der være emner, der beskrives men ikke eftervises nærmere. Dette tæller eftervisning af robusthed, deformations- og vibrationskrav. Ved en fuldbyrdet projektering foretages mange gentagelser, som følge af de mange mulige laskombinationer. I denne rapport vil lastkombinationerne belyses, men der vil ikke forekomme eftervisning af samtlige kombinationer. Broen understøttes af flere bropiller og fundamenter. Det vælges kun, at eftervise de hårdest belastede, da fremgangsmåde til eftervisning af øvrige vil være identisk. Afgrænsningen beskrives yderligere under de relevante afsnit.



## 2. Introduktion og overordnet beskrivelse

Der er i dag mere end 40.000 studerende og arbejdende, der pendler til Aarhus Kommune fra oplandet. Dette tal forventes at stige i takt med, at Østjylland oplever en kraftig byudvikling. Flere pendlere på det i forvejen overbelastede vejnet i og omkring Aarhus vil forøge luftforurening, støjgener og transporttid for busser og personbiler. For at imødekomme dette problem anlægges Aarhus Letbane. (Midttrafik)

Etableringen af letbaner er yderst aktuel i hele Europa og USA. Letbanen er ligesom sporvognen en byvenlig offentlig transportform på rullende materiel. Letbaner har sine fordele i, at de er hurtigere, mere komfortable og miljøvenlige end både busser og den traditionelle sporvogn. Desuden kan de anlægges mere fleksibelt, hurtigt og billigt end jernbaner og metro. (Letbaner.DK) Udseendemæssigt ligner letbanevogne slanke busser. Designet for Letbanevognene i Aarhus fremgår af figur 2-1.



Figur 2-1 - Letbanevogne (Aarhus Letbane)

Den første etape af Aarhus Letbane omdanner Odderbanen og Grenaa-banen til en eldrebet letbane og forbinder disse med et nyt letbanespor fra Lystrup via Skejby, Randersvej og havnearealerne til Aarhus hovedbanegård. (Aarhus Letbane)

Forud for etableringen af letbanen ligger der en række anlægsarbejder, herunder underføringen af Djurslandmotorvejen. Krydsningspunktet mellem Letbanens linjeføring og motorvejen er placeret i det nordlige Aarhus lige syd for den fremtidige station Klokhøjen. Letbanens linjeføring for etape 1 fremgår af figur 2-2. Figuren illustrerer ligeledes Letbanebroens placering.



**Figur 2-2 - Linjeføring, Aarhus Letbane etape 1 (Aarhus Letbane)**

Djurslandmotorvejen er en 4-sporet motorvej, fremtidigt vil der ved broens placering blive anlagt en tilkørselsrampe. Brokonstruktionen får en længde på ca. 75 m og udføres som en 4-fags pladebro i in-situ beton. Overvejelserne der ligger til grund for dette er beskrevet i afsnit 4 – Broudformning, hvor vejens tværprofil ligeledes er illustreret.

### 3. Grundlag

Forudsætninger og grundlag for den statiske dokumentation er udarbejdet på baggrund af BaneDanmarks banenorm og Eurocodes, som er de europæiske normer for dimensionering og opførelse af bygningsværker.

#### 3.1 Normer og standarder

Generelt dimensioneres den nye sporbærende bro iht. følgende:

Banedanmark	BN1-59-4, Belastnings- og beregningsforskrift for sporbærende broer og jordkonstruktioner, november 2010
-------------	--

I projektet anvendes følgende Eurocodes:

##### **Eurocode 0 – Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner**

DS/EN 1990:2007	Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner
-----------------	--

##### **Eurocode 1 – Last på bygværker**

DS/EN 1991-1-1	Generelle laster – Densiteter, egenlast og nytte-last for bygninger
----------------	---

DS/EN 1991-1-4	Generelle laster – vindlast
----------------	-----------------------------

DS/EN 1991-1-5	Generelle laster – termiske laster
----------------	------------------------------------

DS/EN 1991-1-7	Generelle laster – ulykkeslast
----------------	--------------------------------

DS/EN 1991-2	Trafiklast på broer
--------------	---------------------

##### **Eurocode 2 - Betonkonstruktioner**

DS/EN 1992-1-1	Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner
----------------	---

DS/EN 1992-2	Betonbroer – Dimensionerings- og detaljeringsregler
--------------	---

## **Eurocode 7 – Geoteknik**

DS/EN 1997-1

Generelle regler

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

### **3.2 Projektforudsætninger**

#### **Strækningskategori**

Strækningskategorien fastsættes til lokalbaner.

#### **Strækningshastighed**

Aarhus Letbanes maksimale hastighed er 100 km/h (Aarhus Letbane), strækningshastigheden sættes derfor til dette.

#### **Toglast**

Lasten fra letbanen er væsentlig mindre end for almindelig togtrafik, derfor sættes lastfaktoren  $\alpha$  til 0,75 jf. DS/EN 1991-2.

Belastninger og belastningskombinationer bestemmes i afsnit 6 - Laster.

#### **Komfortklasse**

Komfortklassen sættes til meget god.

Komfortklassen god er også tilladelig for lokalbaner jf. BN1-59-4, her vil en dynamisk analyse dog være påkrævet, se afsnit 6.3.1.

#### **Vedligeholdelsesstandard, spor**

For strækningshastigheder mindre end 160 km/h standard vedligeholdes sporene.

### **3.3 Fritrumsprofil**

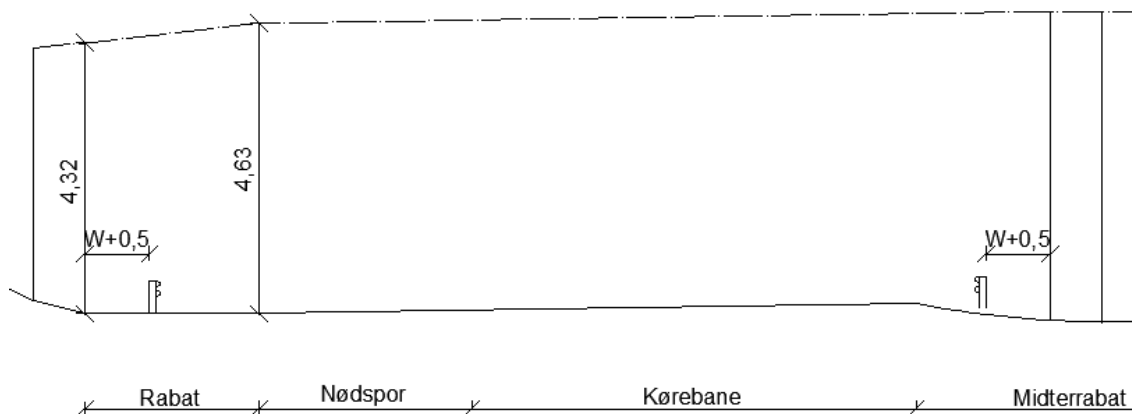
Fritrumsprofilet er det areal, hvor trafikken skal kunne bevæge sig frit indenfor - uden nogen hindrende objekter. Der skal i pågældende projekt både tages højde for underliggende vej og den overførte letbane.

### Frihøjde og friafstand for motorvej under bro

Broen skal overholde krav til mindste frihøjder og fritrumsprofil jf. ”Vejregler for vejes geometri under og over broer”.

Broens frihøjde skal over kørebane og nødspor være 4,5 m. Over rabatten kan frihøjden reduceres til en ret linje fra 4,50 m ved nødsporskant til 4,2 m ved sidebegrænsningen. Disse højder tillægges en tolerance på 0,10 m for sne og fremtidig belægning, samt en udførelsestolerance på 0,03 m.

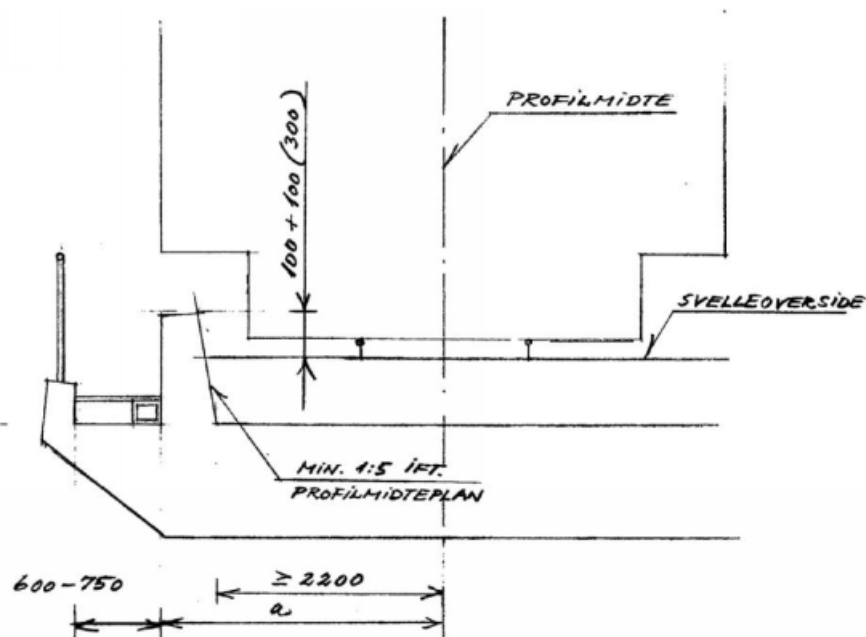
Den fri afstand fra nødsporskant til brounderstøtning skal minimum være autoværnets arbejdsbredde plus 0,5 m. Denne mindsteafstand gælder også for brounderstøtninger i midterrabat. Friafstanden gives ingen tillæg for tolerance.



Figur 3-1 – Frihøjde inkl. tolerancer og fri afstand for underført motorvej

### Fribredde af sporbærende broer

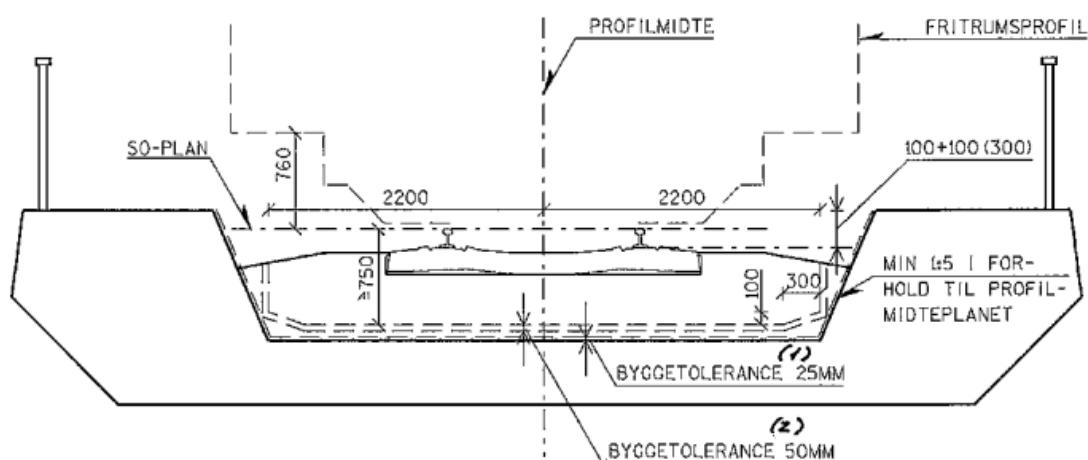
Letbanebroen etableres med langsgående skot, hvilket reducerer broens nødvendige bredde. På figur 3-2 ses kravene til fribredde og fri afstand for tværprofiler med ballastskot. Afstanden  $a$  afhænger af hastigheden. Ved hastigheder mindre end eller lig med 120 km/h, skal  $a$  minimum være 2500 mm jf. BN1-59-4.



Figur 3-2 – Fri bredde og fri afstand fra profilmidte med ballastkot (Banedanmark, 2010)

Skottet skal etableres som en integreret del af brodækket, og til alle mål skal adderes kurvetillæg og tillæg for overhøjde. Et kurvetillæg er et tillæg, sporafstanden øges med, når et eller flere spor er krumme, mens en overhøjde er en forøget højde, som etableres i skarpere kurver på sporets yderste side. Sporene henover broen er rette, og der vil derfor ikke forekomme kurvetillæg eller overhøjde.

Af hensyn til fritrumskrav for ballastrensemaskine skal den fri vandrette afstand fra spormidte til fast genstand være mindst 2200 mm inden for en afstand på +760 mm til -750 mm ift. til SO-planet, se figur 3-3. SO-planet er et plan gennem skinnehovedernes overflade.



Figur 3-3 - Fritrumskrav (Banedanmark, 2010)

### 3.4 Sikkerhed

#### Konsekvensklasse

Alle sporbærende broer og jordkonstruktioner henføres til konsekvensklasse CC3 iht. BN1-59-4.

Konsekvensklasse: CC3

Kombinationsfaktoren:  $K_{FI} = 1,1$

#### Kontrolklasse

For brokonstruktioner anvendes enten normal eller skærpet kontrolklasse.  
For Letbanebroen vælges normal kontrolklasse.

Normal kontrolklasse:  $\gamma_3=1,0$

#### Miljøklasse

Miljøklassen fastlægges for de enkelte konstruktionsdele under hensyntagen til deres placering. Miljøklasserne opdeles i aggressiv og ekstra aggressiv afhængigt af anvendelsesområde. Passiv og moderat miljøklasse anvendes ikke for broer jf. DS/EN 1991-2 DK NA.

Miljøklasse: Specificeres nærmere (Se Afsnit 7.2)

### 3.5 IKT-værktøjer

- Microsoft Office Word 2010
- Maple ver. 17
- WinBeam Ver. 3.30
- Autodesk AutoCad 2013

### 3.6 Referencer

Udgivelsesår	Dokument	Udgave
2009	SBi anvisning 223 Dokumentation af bærende konstruktioner	1
2011	Teknisk Ståbi	21
2012	Betonkonstruktioner efter DS/EN 1992-1-1	2
2012	Lærebog i Geoteknik	2
2006	Concrete Bridges	1



## 4. Broudfornning

Broer og ethvert andet bygværk skal foruden at dække brugerens behov, også være konstruktivt og statisk hensigtsmæssigt, økonomisk rimeligt og æstetisk tilfredsstillende.

For at opnå dette er der en række parametre, der kan varieres og vælges i forbindelse med broudfornningen. Herunder byggemateriale, brotype og statisk system, konstruktionselementernes former og dimensioner samt udførelsesmetode.

I følgende beskrives fordele og ulemper ved forskellige byggematerialer, brotyper, udførelsesmetoder m.m. Ud fra dette fastlægges udfornningen af den pågældende letbanebro.

Overvejelserne omkring broudfornning er gjort på baggrund af broliteratur og vidensdeling omkring tidligere broprojekter fra ingeniører ved COWI.

### 4.1 Valg af byggemateriale

Som byggemateriale for broer anvendes i dag først og fremmest stål og armeret beton. Fordelen ved beton er, at det er et relativt billigt materiale, dog er det karakteriseret ved et stort timeforbrug for in-situ beton, hvor både forskalling og støbning sker på byggepladsen. Derfor kan det ved større spænd være nødvendigt at detailprojektere både beton- og ståløsninger for at finde den økonomisk mest fordelagtige løsning for det pågældende projekt. For broer med mindre spænd er den klare tendens, at betonbroer er billigere end stål. (Mondorf, 2006)

I forbindelse med korrosion har armeret beton den fordel, at betonen danner et beskyttende lag om armeringen. Ubehandlet stål vil, når det udsættes for fugt og ilt korrodere. Derfor vil en overfladebehandling eller anden beskyttelse være nødvendig, hvilket vil være vedligeholdelseskrævende.

På baggrund af ovenstående vælges det at opføre letbanebroen i armeret beton.

### 4.2 Valg af brotype

Typiske brotyper for motorvejsoverføringer er henholdsvis plade- og bjælkebroer over 2, 3 og 4-fag. (Mondorf, 2006)

Konstruktionshøjden er ofte begrænset på motorvejsbroer, derfor er pladeløsninger en fordelagtig løsning. Derudover er det ofte en vigtig faktor, at motorvejsbroer kan udføres hurtigt for at reducere genen for trafikken. Denne betragtning imødekommes også

ved en pladeløsning, idet form- og armeringsarbejdet er stærkt forenklet. (Mondorf, 2006)

For broer over flere fag vil det ofte være en fordel at lave broens overbygning kontinueret over understøtningerne. Dette vil reducere bøjningsmomenterne i overbygningen og medføre en direkte materialebesparelse.

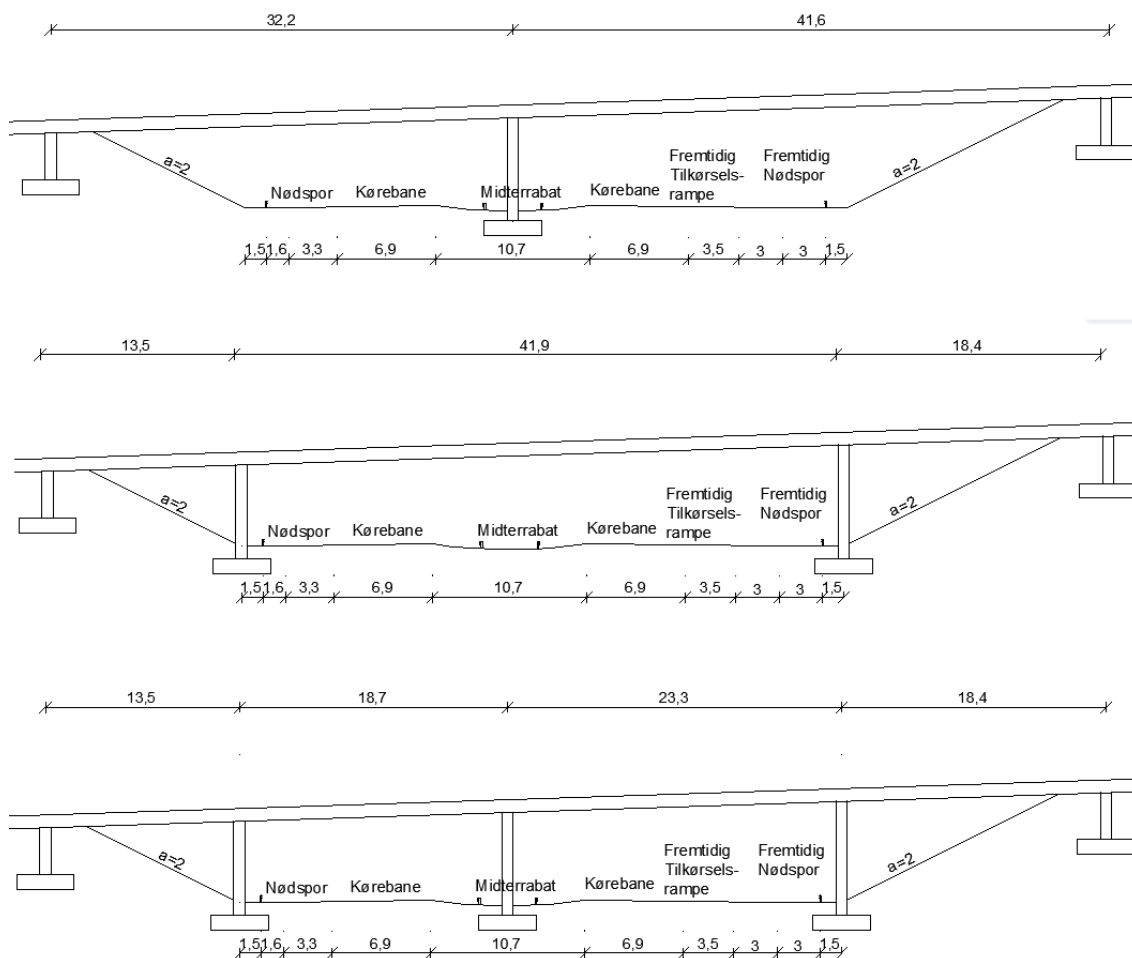
For broer i stål og armeret beton er den kontinuitet forholdsvis nem at opnå. For præfabrikerede beton opnås der dog normalt ikke en økonomisk fordel ved en kontinuerlig overbygning. (Mondorf, 2006)

De forhold der især peger mod kontinuitet er økonomi, begrænset disponibel konstruktionshøjde, hvor som tidligere nævnt pladebroer har en klar fordel, da disse udformes naturligt kontinuerlige. Herudover kan der være et ønske om at reducere fugeantal af udseendes-, vedligeholdelses- eller komfortmæssige årsager. Desuden kan æstetiske hensyn i visse tilfælde gøre kontinuerlige løsninger mere fordelagtige. (Mondorf, 2006)

### **4.3 Valg af statisk system**

På baggrund af ovenstående vælges det, at broen udformes som en kontinuert pladebro. Spændvidden for en bro med henholdsvis 2, 3 og 4 fag betragtes forud for valget af antal fag. Broens geometri fastlægges ud fra Letbanens længdeprofil, underliggende vejs tværprofil og ønsket om at skjule yderste bropiller i skråninger.

Den underførte vej er en 4-sporret motorvej med midterrabat og nødspor. I den ene side etableres en tilkørselsrampe. Tværprofilet ses af figur 4-1, der ligeledes giver et billede af bropillernes omtrentlige placering for henholdsvis 2, 3 og 4 fag.



Figur 4-1 - Pladebroer i 2, 3 og 4 fag og tværprofil af underliggende vej

#### 4.3.1 Betragtning forud for valg af antal fag

Belastningen fra jernbanetrafik er høj, derfor vil det ofte være hensigtsmæssigt at placere bropiller i alle rabatter for at opnå mindre spænd. Flere fag vil naturligvis medføre flere bropiller, men snitkræfterne reduceres væsentligt ved mindre spænd, eftersom momentet afhænger af længden opløftet i anden potens for jævnt fordelt linjelast. Mindre snitkræfter vil altså give en materialebesparelse i brodækket. Det fremgår af afsnit 5 - forundersøgelser, at jordbundsforholdene er meget varierende og med stedvis ringe vingestyrke, hvilket også taler for at reducere lasten i de enkelte fundamenter. Derfor vælges det at opdele broen i 4 fag.

#### 4.3.2 Statisk system

Broen er nu bestemt til at være en kontinuert pladebro over 4 fag.

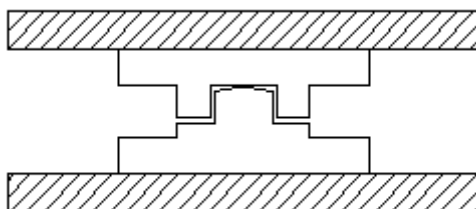
Pillernes forbindelse mellem brodæk og fundament fastlægges for et fuldstændigt statisk system. Forbindelserne kan f.eks. udføres som betoncharnier, lejer eller sammenstøbninger.

Valget af forbindelse afhænger af, hvordan kræfterne ønskes optaget.

Den vandrette last kan med fordel koncentreres til de piller, der optager en væsentlig del af den lodrette belastning, da vægten vil have en gunstig virkning ift. stabilitet.

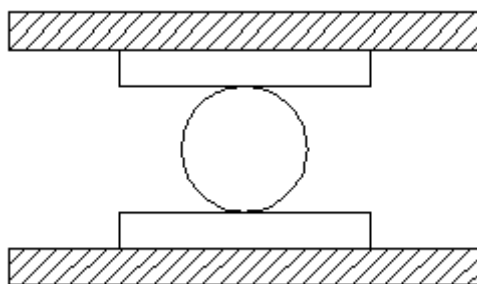
Ved at etablere fastholdelse af brodækket på den centrale bropille, udnyttes den gunstige last, og der opnås relative ens dilatationer i begge broender.

Fastholdelsen af den midterste bropille kan f.eks. opnås med et fast stålleje. Lejet kan udformes som på figur 4-2. Her er den nedre del monteret med en kant, hvorpå den øvre del kan understøttes og vippe omkring. Dette sikrer overførelsen af vandrette og lodrette kræfter, samtidig med at optagelse af moment forhindres. På den måde opnås en fast simpel understøtning.



**Figur 4-2 - fast leje**

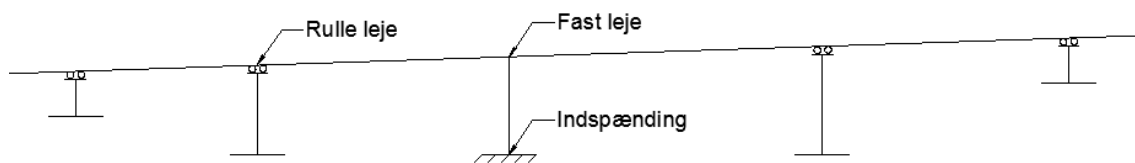
Ved at udføre resterende understøtninger af brodækket som rullelejer sikres det, at de vandrette kræfter kun optages af den centrale bropille som ønsket, samtidig sikres det, at konstruktionselementernes deformation fra temperatur, svind og krybning kan ske uhindret, når der foruden rullelejer etableres dilatationsfuger i broens ender. Rullelejet består af en eller flere cylindre mellem en nedre og en øvre lejedel, som vist på figur 4-3.



**Figur 4-3 – Rulleleje**

Forbindelsen mellem bropiller og fundament udføres som en sammenstøbning. Sammenstøbningen mellem den midterste bropille og fundament skal pga. den vandrette kraft virke som en indspænding, for at kunne optage det optrædende moment.

Ovenstående valg fremgår af det statiske system på figur 4-4.



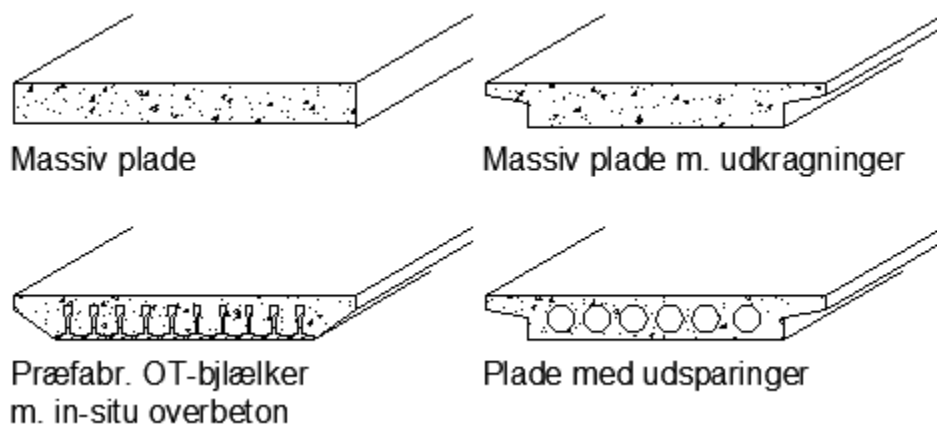
Figur 4-4 - Statisk system

## 4.4 Konstruktionernes former og dimensioner

Valget af konstruktionens dimensioner træffes i store træk ved skitseringen, for at kunne lave en realistisk skitse. Man vil gøre brug af erfaringer til at vurdere de omtrentlige størrelser. (Mondorf, 2006)

### 4.4.1 Tværsnitsudformning

Som tidligere nævnt er konstruktionens højde ofte begrænset på motorvejsbroer, hvorfor kasse- og T-profiler hurtigt kan udelukkes. Figur 4-5 illustrerer 4 forskellige plade tværsnit.



Figur 4-5 - Plade tværsnit

Det massive tværsnit giver anledning til en meget nem udførelse. Pga. den simple form er forbruget af forskallingen lille, og både slap og spændt armering er nemt at ligge. Den massive plade er velegnet ved kontinuerlige flerfagsbroer, idet tværsnittet egner sig til at optage både negative og positive momenter. For store spændvidder bliver den massive plade ofte uøkonomisk pga. den store egenvægt. Ved store spændvidder kan det være fordelagtigt at anvende plader med udsparinger, der reducerer pladens egenvægt. Udførelsen besværliggøres i forhold til den massive plade, idet udsparingerne skal fastholdes mod opdrift, og eventuelle spændkabler skal placeres i smalle ribber mellem udsparringsrørene. Derfor er den økonomiske besparelse sjældent overvældende.

En anden løsning ved små spændvidder er en plade sammensat af præfabrikerede strengbetonbjælker med in-situ overbeton. Løsningen gør at man kan undgå stillads. Ved bygværker med større spænd, kompliceret geometri eller hvor æstetik vægtes er dette tværsnit ikke hensigtsmæssigt. (Mondorf, 2006)

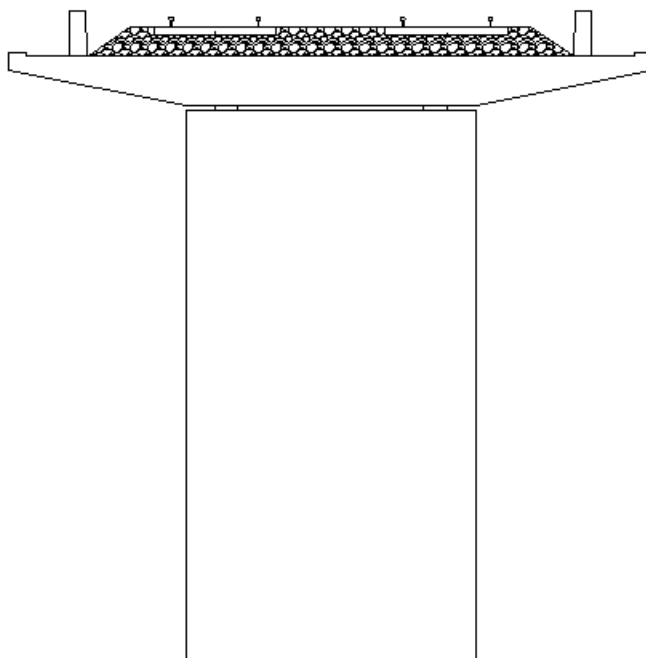
Der vælges for broen et massivt tværsnit med udkragninger. Udkragninger er med til at give et æstetisk udseende, og samtidig reducerer det egenvægten.

#### 4.4.2 Bropilleudformning

Bropillerne danner understøtning af brodækket. For at kunne gøre dette hensigtsmæssigt, skal de udformes, så der kan ske en forsvarlig placering af lejekonstruktioner og med plads til montage.

Bropillernes udformning har stor æstetisk betydning. De udformninger der oftest benyttes er brede vægformede piller, enkeltpiller med udkraget pillehoved, dobbeltpiller med overligger, søjlerækker med overligger og ved lave piller evt. vifteudformninger, skrå afskæringer eller lignende. (Mondorf, 2006)

Det vælges at anvende vægformede bropiller. Udformning af brodækkets tværsnit og bropillerne fremgår af figur 4-6.



Figur 4-6 – Udformning

## 4.5 Valg af udførelsesmetode

Danske motorvejsbroer støbes oftest på stedet, hvor man anvender stålrørsstilladser og standardiseret forskallingsfelter som form til den færdigblandede beton. (Mondorf, 2006)

Som omtalt tidligere har formen af bropillerne stor indflydelse på æstetikken. Netop broernes forskellighed, kan være en af de faktorer, der gør at in-situ betons anvendelse er størst inden for dansk brobygning. (Mondorf, 2006)

Præfabrikeret beton har primært sin anvendelse, når det pågældende område ikke muliggør opstilling af stillads, eller i tilfælde hvor arbejdstiden på pladsen skal begrænses. (Mondorf, 2006)

For det pågældende projekt er muligheden for opstilling af stillads åben. Placeres stilladset sådan, at kravene til vejes geometri under broer er overholdt, kan trafikken afvikles mens brodækket støbes, hvilket mindsker genen ved den længere arbejdstid på pladsen.

På baggrund af ovenstående samt ønsket om at drage økonomisk fordel af kontinuiteten vælges det at støbe broen på stedet.

## 5. Forundersøgelser

I følgende afsnit beskrives de geotekniske forundersøgelser af projektgrunden. Forundersøgelsen opdeles i to afsnit henholdsvis de lokale forhold og geotekniske forhold.

### 5.1 Grunden og lokale forhold

Letbanebroen er placeret i det Nordlige Aarhus. Underføringen af Djurslandmotorvejen er oprindeligt en del af en samlet entreprise for anlægsarbejder på strækningen mellem Herredsvej og Lisbjerg Bygade. Broen er i entreprisen og derfor også i den geotekniske rapport benævnt bro 4.



Figur 5-1 - Placering af konstruktionen (Google Earth, 2015)

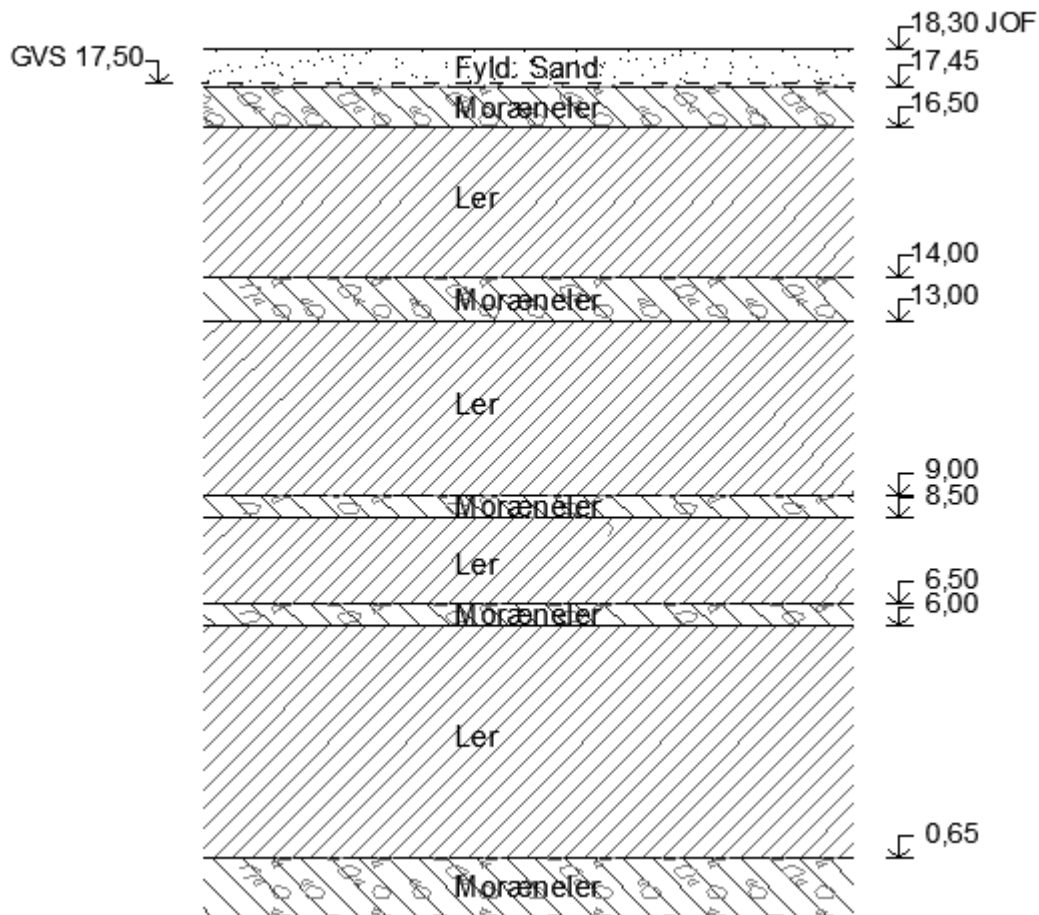
### 5.2 Geotekniske forhold

COWI har i perioden april til august 2012 udført geotekniske undersøgelser for hele entreprisen. I den forbindelse er der udført et geoteknisk notat på baggrund af 10 boringer for bro 4 og 5. Dette notat er stillet til rådighed af COWI og vedlægges som Appendiks A.



Der er udført 5 boringer for bro 4, placeringen og forsøgsresultaterne ses af bilagene til det geotekniske notat.

For projektet vælges det at eftervise det hårdst belastede fundament, som er fundamentet under den midterste bropille. På figur 5-2 ses laginddelingen for det pågældende sted jf. boring B4.131. For styrke- og klassifikationsparametre henvises til afsnit 7.1 - Grund og jord.



Figur 5-2 - Jordbundsforhold

Det fremgår af det geotekniske notat, at aflejringerne er meget afvekslende, og stedvis er der konstateret ringe vingestyrke. På baggrund af disse forhold vil det være nødvendigt at udskifte store dele af aflejringerne omkring broens fundamenter, for at kunne fundere direkte. Selv efter udskiftningen vil der kunne forekomme sætninger på op til 5 cm, jf. den geotekniske rapport.

Der kræves endvidere en nærmere undersøgelse for at konstatere, hvorvidt jordudskiftningen i motorvejens midterrabat kan udføres ved fri afgravning, eller om etablering af byggegrube med spuns eller lignende vil være nødvendig for at opnå et tilstrækkeligt arbejdsareal.

På baggrund af oplyste forhold og anbefalinger vælges det at pælefundere.

Grundvandsspejlet er beliggende i kote 17,50, hvorfor en midlertidig sænkning af grundvandet er nødvendig for udførelse af geotekniske konstruktioner.

Grundvandsænkningen kan f.eks. udføres med et sugespidsanlæg, men behandles ikke nærmere i denne rapport.

Projektet kan behandles i geoteknisk kategori 2 jf. DS/EN 1997-1. Idet broen er en pælefunderet konstruktion uden usædvanlige eller særligt vanskelige belastnings- eller jordbundsforhold.

For konstruktioner i geoteknisk kategori 2 kræves geotekniske undersøgelser og beregninger for at sikre, at de grundlæggende krav overholdes.

## 6. Laster

Følgende afsnit vil belyse hvilke laster, der optræder på letbanebroen - permanente såvel som variable. Det vil desuden fremgå, hvordan lasterne skal kombineres.

### 6.1 Lastkombinationer

#### 6.1.1 Brudgrænsetilstand

Lastkombinationer og lastsidens partialkoefficienter til eftervisning af bæreevne iht. DS/EN 1990/A1 DK NA fremgår af figur 6-1.

Regningsmæssige lastværdier for vedvarende og midlertidige dimensionerinstilfælde					
Grænsetilstand			STR/GEO		
Lastkombination			1	2	
Referenceformel			(6.10a)	(6.10b)	
Partialkoefficienter for laster					
Permanent last	Tyngde generelt	Ugunstig	$\gamma_{G_i, \text{sup}} \cdot K_{Fi}$	$1,25 \cdot K_{Fi}$	$1,0 \cdot K_{Fi}$
		Gunstig	$\gamma_{G_i, \text{inf}}$	1,0	0,9
	Tyngde af jord (grund)vand, geotekniske konstruktioner	Ugunstig	$\gamma_{G_i, \text{sup}}$	1,0	1,0
		Gunstig	$\gamma_{G_i, \text{inf}}$	1,0	1,0
Forspænding	P		1,0	1,0	
Variabel last	Dominerende, $Q_{k,1}$	Ugunstig		0	$\gamma_{Q1} \cdot K_{Fi}$
	Øvrige, $Q_{k,i}$	Ugunstig		0	$\gamma_{Qi} \cdot \psi_{0,i} \cdot K_{Fi}$

Figur 6-1 – Lastkombinationsskema - ULS

$\gamma_Q = 1,40$  for trafiklast på broer

$\gamma_Q = 1,20$  for tunge særtransporter på spor (SW2)

$\gamma_Q = 1,50$  for variable laster (naturlaster m.v.)

#### Vurdering af lastgrupper for togtrafik

Den vertikale last fra togtrafik er defineret ved hjælp af lastmodeller. Sammen med de vertikale laster fra acceleration, bremsning, sidestød og centrifugalkraft udgøres den samlede belastning fra togtrafik.

Flere trafikale laster kan virke samtidig, for at tage dette i regning, er der i DS/EN 1991-2 defineret en række lastgrupper. Grupperne indikerer, hvordan de trafikale laster skal kombineres sammen. Figur 6-2 viser, hvordan de trafikale laster kombineres. Hver lastgruppe skal betragtes som en enkelt variabel karakteristisk last, som så kombineres med ikke-trafikale belastninger.

Antal spor på konstruktion			Laster			Vertikale laster			Horisontale laster		
1	2	≥3	Antal belastet spor	Last-gruppe	Belastet spor	LM71 SW/0 HSLM	SW/2	Ulastet tog	Acceleration, bremsning	Centrifugal-kraft	Sidestød
1	2	≥3	1	gr11	T <sub>1</sub>	1			1	0,5	0,5
			1	gr12	T <sub>1</sub>	1			0,5	1	1
			1	gr13	T <sub>1</sub>	1			1	0,5	0,5
			1	gr14	T <sub>1</sub>	1			0,5	1	1
			1	gr15	T <sub>1</sub>			1		1	1
	2	≥3	1	gr16	T <sub>1</sub>		1		1	0,5	0,5
			1	gr17	T <sub>1</sub>		1		0,5	1	1
			2	gr21	T <sub>1</sub>	1			1	0,5	0,5
					T <sub>2</sub>	1			1	0,5	0,5
			2	gr22	T <sub>1</sub>	1			0,5	1	1
					T <sub>2</sub>	1			0,5	1	1
			2	gr23	T <sub>1</sub>	1			1	0,5	0,5
					T <sub>2</sub>	1			1	0,5	0,5
			2	gr24	T <sub>1</sub>	1			0,5	1	1
					T <sub>2</sub>	1			0,5	1	1
2	≥3	2	gr26	T <sub>1</sub>		1		1	0,5	0,5	
				T <sub>2</sub>	1		1	0,5	0,5		
		2	gr27	T <sub>1</sub>		1		0,5	1	1	
		T <sub>2</sub>	1		1	0,5	1	1			
		≥3	gr31	T <sub>i</sub>		0,75			0,75	0,75	

- (1) Alle relevante faktorer ( $\alpha$ ,  $\Phi$ ...) skal indgå
- (2) SW/0 skal kun betragtes ved kontinuerte bjælkekonstruktioner
- (3) SW/2 skal kun betragtes, når der er tung trafik på strækningen
- (4) Faktoren reduceres til 0,5 ved gunstig effekt
- (5) Faktoren reduceres til 0 ved gunstig effekt
- (6) HSLM betragtes kun hvor dette er relevant

	Dominerende lastkomponent
	skal betragtes i design situationer af konstruktioner med 1 spor
	skal betragtes i design situationer af konstruktioner med 2 spor
	skal betragtes i design situationer af konstruktioner med 3 eller flere spor

**Figur 6-2 – Lastgrupper**

Da broen er en kontinuert pladekonstruktion, belastet af 2 spor, udelukkende med letbanetrafik skal følgende lastgrupper betragtes:

- gr11-14
- gr21-24
- gr26

Principielt skal alle 10 lastgrupper eftervises. Det ønskes at vise principperne af et bredt omfang af projekteringen, derfor udvælges én lastkombination til eftervisningen for at undgå gentagelser.

Det vælges at eftervise lastgruppe 21, med dominerende toglast fra LM71.

### 6.1.2 Ulykkesgrænsetilstand

Lastkombinationer og lastsidens partialkoefficienter til eftervisning af bæreevne iht. DS/EN 1990/A1 DK NA fremgår af figur 6-3.

Regningsmæssige lastværdier for ulykkes- og seismiske dimensioneringstilfælde						
Dimensi- onerings- tilfælde	Permanente laster		Forspænding	Ulykkes- eller seis- misk last	Øvrige variable laster	
	Ugunstig	Gunstig			Domine- rende	Øvrige
Ulykke (6.11a/b)	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	P	$A_d$	$\Psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
Seismisk (6.12a/b)	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	P	$A_{Ed}$	$\Psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

Figur 6-3 - Lastkombinationsskema - ALS

Der anvendes følgende værdi for  $\Psi_{2,1}$  for ulykkesdimensioneringstilfælde:

$\Psi_{2,1} = \Psi_{1,1}$  for  $Q_{k,1}$  svarende til LM71 inkl.  $\alpha$ -faktor. I tilfælde med afsporing, hvor  $A_d$  udgør det afsporede tog, anvendes  $\Psi_{1,i}$  for øvrige spor på broen.

### 6.1.3 Anvendelsesgrænsetilstand

Lastkombinationer og lastsidens partialkoefficienter til eftervisning af bæreevne iht. DS/EN 1990/A1 DK NA fremgår af figur 6-4.

Regningsmæssige lastværdier for anvendelsesgrænsetilstanden					
Kombination	Permanente laster		Forspænding	Variable laster	
	Ugunstige	Gunstige		Dominerende	Øvrige
Karakteristisk	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	P	$Q_{k,1}$	$\Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
Hyppig	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	P	$\Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
Kvasi- permanent	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	P	$\Psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

Figur 6-4 - Lastkombinationsskema - SLS

I projekteringen er der draget nytte af hjælpeskemaer i BN1-59-4, hvor partialkoefficienter multipliceret med lastkombinationfaktorer  $\psi$ , fremgår i mere detaljerede skemaer end i eurocoden. Skemaerne er baseret på DS/EN 1990/A1.

## 6.2 Permanente laster

Broen påvirkes af permanente laster fra de bærende konstruktioner, opbygget af armeret beton, samt banetekniske installationer.

Bærende konstruktioner	Egenlast
Armeret beton	25 kN/m <sup>3</sup>

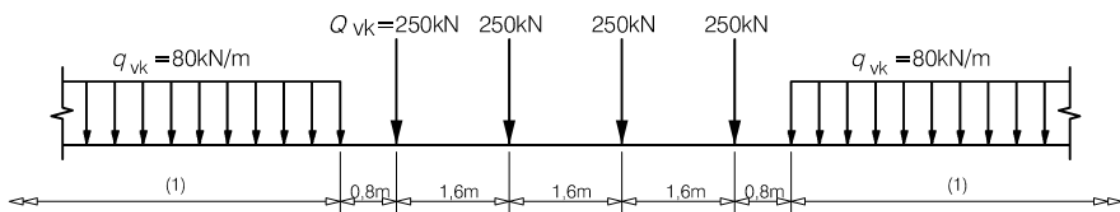
Banetekniske installationer	Egenlast
Ballast, nedre værdi af rumvægt	16 kN/m <sup>3</sup>
Ballast øvre værdi af rumvægt	20 kN/m <sup>3</sup>
Betonsveller	3,9 kN/m pr. spor
Skinner, UIC 60	1,2 kN/m pr. spor
Elektriske installationer, i alt	1,0 kN/m pr. spor
Rækværk, pr. stk.	1,0 kN/m
Andet udstyr, pr. brooverbygning	3,0 kN/m

## 6.3 Variable laster

### 6.3.1 Trafiklaster

#### Last Model 71

LM71 repræsenterer den statiske effekt af lodret last ved normal togtrafik. Lastarrangementet er som angivet på figur 6-5.



Figur 6-5 - Lastarrangement for LM71 (Banedanmark, 2010)

De karakteristiske værdier angivet på figur 6-5 skal multipliceres med faktoren  $\alpha$ , på strækninger med togtrafik tungere eller lettere end normal togtrafik.

Faktoren  $\alpha$  skal være en af værdierne angivet i tabel 6-6. Når lasterne er multipliceret med faktoren  $\alpha$ , kaldes disse klassificeret vertikale laster.

$\alpha$	0,75	0,83	0,91	1,00	1,10	1,21	1,33	1,46
----------	------	------	------	------	------	------	------	------

Figur 6-6 - Korrektionsfaktorer for togtrafikkens vægt

$\alpha$ -faktoren skal ligeledes ganges på følgende laster:

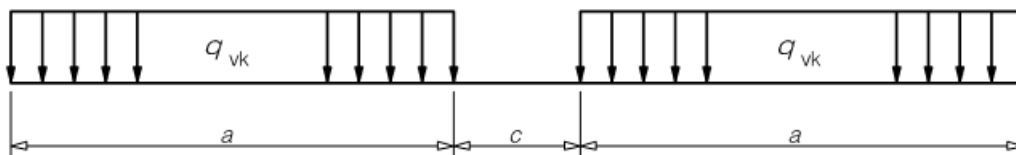
- Ækvivalente vertikale laster fra jordarbejder og jordtryk
- Centrifugalkræfter
- Sideværtskræfter - multipliceres kun med  $\alpha$  når  $\alpha > 1$
- Træk- og bremsekræfter
- Kombineret respons mellem konstruktion og spor ved variable laster
- Afsporingslaste for ulykkesgrænsetilfælde
- Last Model SW/0 for kontinuerte broer.

### SW0 og SW2

Last Model SW/0 repræsenterer den statiske effekt af den lodrette last ved normal togtrafik på kontinuerte bjælker.

Last Model SW/2 repræsenterer den statiske effekt af den lodrette last ved tung togtrafik på kontinuerte bjælker.

Lastarrangementet ses af figur 6-7. De karakteristiske lodrette laster for henholdsvis SW/0 og SW/2 fremgår af figur 6-8.



Figur 6-7 - Lastarrangement SW/0 og SW/2 (Banedanmark, 2010)

Load Model	$q_{vk}$ [kN/m]	a [m]	c [m]
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Figur 6-8 - Lastværdier for SW/0 og SW/2

Lastmodel SW/0 skal multipliceres med faktoren  $\alpha$ . Der kører ikke tung trafik på broen, derfor undersøges lastmodel SW/2 ikke.

## **HSLM**

HSLM repræsenterer last fra højhastighedstog, altså toge hvis hastighed er 200 km/h eller højere. Hastigheden på letbanen bliver maksimal 100 km/h. Derfor skal broen ikke eftervises for denne lastmodel.

## **Ikke-lastet tog**

Ikke-lastet tog repræsenteres af en vertikal jævnt fordelt last på 10,0 kN/m. Lastmodellen gør sig kun gældende i lastgruppe 15, som ikke er aktuel, når der er flere end et spor.

## **Virkelige tog**

Det virkelige tog repræsenterer det eller de togtyper, der er tilladt på strækningen.

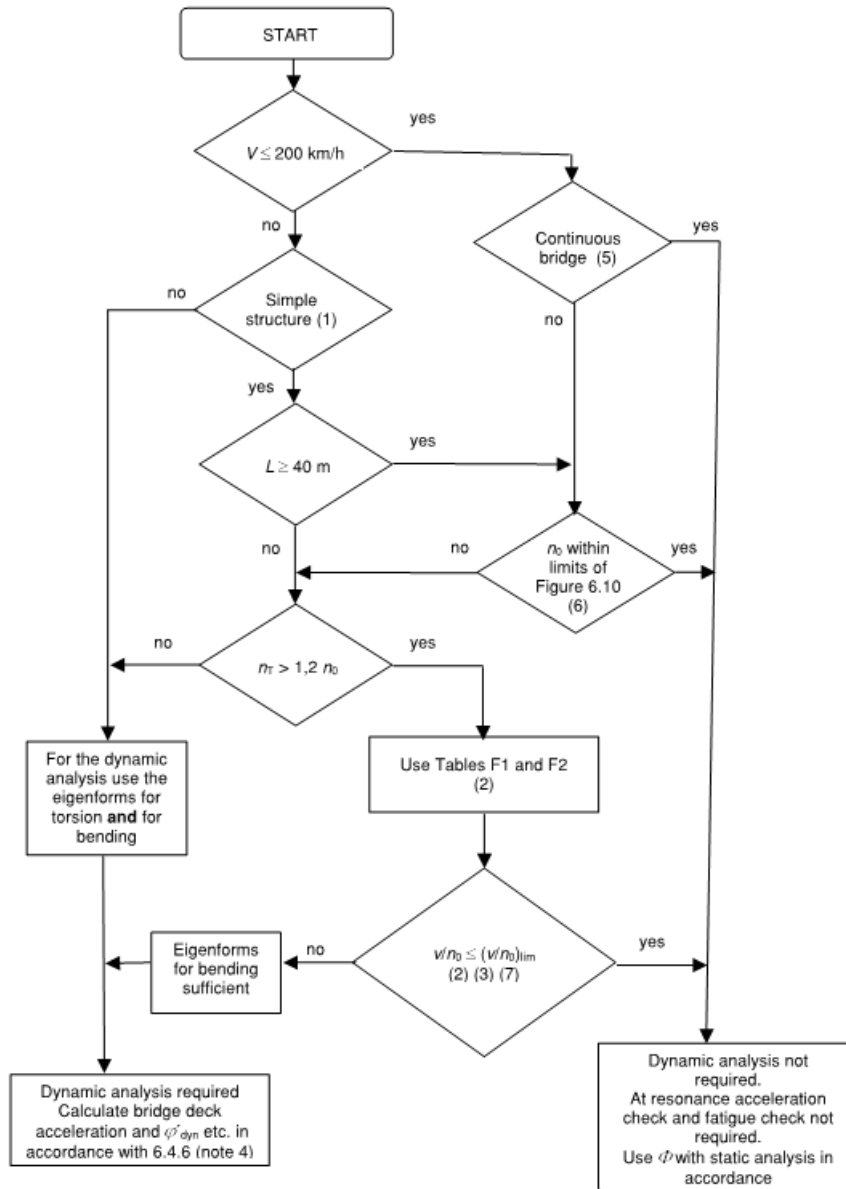
## **Dynamiske effekter (herunder resonans)**

Der er flere faktorer, der spiller ind på en konstruktions dynamiske opførsel blandt andet hastigheden af den krydsende trafik, elementernes spændvidde, konstruktionens egenvægt, egenfrekvens og dæmpning.

For broer er en statisk analyse altid påkrævet for lastmodellerne anført i DS/EN 1991-2. Lastresultanterne skal foruden faktoren  $\alpha$  også multipliceres med en dynamisk faktor  $\phi$ .

Den dynamiske faktor tager hensyn til den dynamiske indflydelse på spændinger og vibrationer i konstruktionen, men den tager ikke hensyn til resonanseffekter, som er de effekter, der optræder, når lastfrekvensen rammer konstruktionens egenfrekvens. Derfor er der i nogle tilfælde foruden den statiske analyse også påkrævet en dynamisk analyse. Hvorvidt en dynamisk analyse er påkrævet iht. DS/EN 1991-2, fremgår af figur 6-9.





Figur 6-9 - Flow Chart til bestemmelse af om dynamisk analyse påkræves (DS/EN1991-2, 2003)

Da letbanens hastighed er under 200 km/h og broen er en kontinuert bro, er en dynamisk analyse ikke påkrævet, når kravene til modstand og deformationsgrænser givet i DS/EN 1990 A2.4.4 samt accelerationskravet tilhørende komfortklassen meget god er opfyldt. Disse krav knytter sig til anvendelsesgrænsetilstanden.

### Dynamisk faktor

Den dynamiske faktor,  $\phi$ , der forøger de statiske lasteffekter for Last model 71, SW/0 og SW/2, bestemmes iht. DS/EN 1991-2 og afhænger generelt af sporenes vedligeholdelse.

Sporenes vedligeholdelse er defineret til standard, hvorfor den dynamiske faktor  $\phi_3$  bestemmes ud fra følgende:

$$\phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\phi} - 0,2} + 0,73$$

Hvor:

$L_\phi$  er determinantlængden der ved kontinuerte dæk over n fag bestemmes af:

$$L_\phi = k \cdot L_m$$

Hvor:

$k$  er en faktor, der varierer med antallet af fag. For 4 fag sættes  $k$  til 1,4 jf. DS/EN 1991-2

$L_m$  er den gennemsnitlige faglængde, som bestemmes af:

$$L_m = \frac{1}{n} \cdot (L_1 + L_2 + \dots + L_n)$$

$$L_m = \frac{1}{4} \cdot (13,51m + 18,66m + 23,26m + 18,26m) = 18,42m$$

Determinantlængden bliver herved:

$$L_\phi = 1,4 \cdot 18,42m = 25,79 m$$

Den dynamiske faktor bestemmes:

$$\phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{25,79} - 0,2} + 0,73 = 1,2$$

### **Bremsekræfter/acceleration**

Accelerations- og bremsekræfternes angrebspunkt er i toppen af skinnen langs med sporret.

Kræfterne skal betragtes som jævnt fordelt over den relevante længde,  $L_{a,b}$ , for det betragtede konstruktionselement. For brodækket er denne værdi 75 m.

Karakteristiske lastværdier

Accelerations kraft:  $Q_{tak} = 33 \frac{kN}{m} \cdot L_{a,b} \leq 1000kN$

For LM71, SW/0, SW/2 og HSLM

Bremsekræft:  $Q_{lbk} = 20 \frac{kN}{m} \cdot L_{a,b} \leq 6000 kN$

for LM71, SW/0 og HSLM

$$Q_{lbk} = 35 \frac{kN}{m} \cdot L_{a,b}$$

for lastmodel SW/2

Acceleration- og bremsekræfterne skal ikke multipliceres med den dynamiske faktor. For lastmodel LM71 og SW/0 skal lasterne multipliceres med faktoren  $\alpha$ .

Da broen bærer to spor, skal tilfældet med bremsekræfter på det ene spor og accelerationskræfter på det andet spor betragtes.

Da sporene forstætter ind på skråninger, er det kun en del af de langsgående accelerations- og bremsekræfter, der overføres mellem brodæk og lejer. Resten overføres mellem sporet og skråningen. Erfaringsmæssigt kan 50 % af lasten optages i skråningen. For en mere eksakt værdi kan samvirkningen mellem konstruktion og spor betragtes.

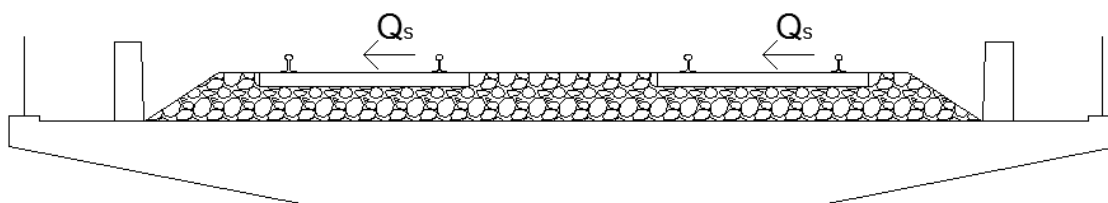
Konstruktionen dimensioneres, så den kan optage 50 % af bremse/accelerationskræfterne.

### Centrifugalkræfter

Centrifugalkræfter optræder kun, hvor sporrenes linjeføring er buet. Hvilket ikke er aktuelt for pågældende bro.

### Sidestød (nosing)

Sidestødskraften skal ses som en horisontal enkeltkraft virkende i toppen af skinnerne, vinkleret på sporets centerlinje.



Figur 6-10 – Sidestødskræfter

Den karakteristiske sidestødslast er jf. DS/EN 1991-2  $Q_{sk} = 100\text{kN}$ .

Denne værdi multipliceres ikke med den dynamiske faktor og kun med faktoren  $\alpha$ , når  $\alpha \geq 1$ , hvilket ikke gør sig gældende for letbanen.

### 6.3.2 Naturlaster

#### Vindlast

Vindlasten på konstruktionen fastsættes iht. DS/EN 1991-1-4 inkl. DK NA samt Tillæg broer: Afsnit 8. Der ses bort fra vindlasten på toget.

Vindtrykket der virker på udvendige overflader bestemmes af følgende:

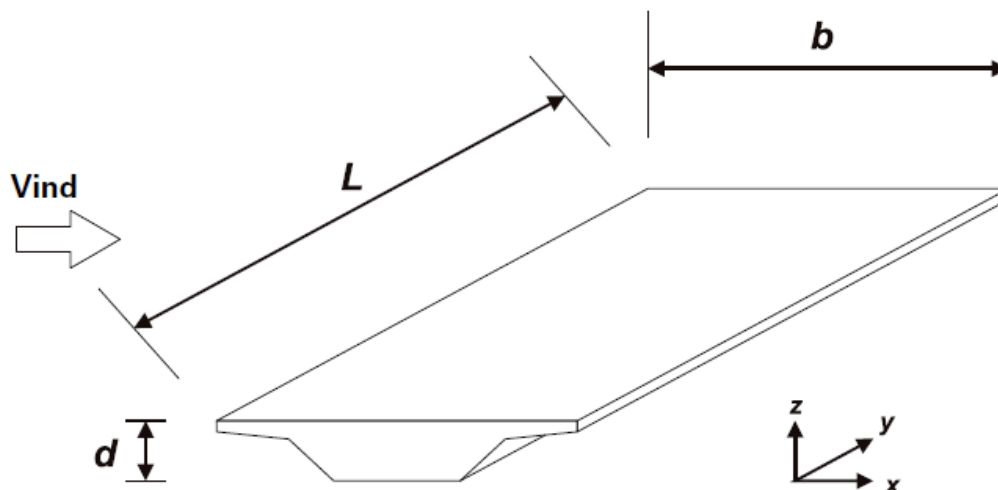
$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

Hvor:

$q_p(z_e)$  er peakhastighedstrykket i referencehøjde  $z_e$

$c_{pe}$  er formfaktoren for det udvendige vindtryk

Vindlast på broer frembringer kræfter i x-, y- og z-retningen, se figur 6-11.



Figur 6-11 - Vindretninger

Når last fra togtrafik antages at virke samtidigt med vindlasten, begrænses den kombinerede værdi  $\psi_0 \cdot F_{wk}$  af vindlasten på broen og på togene til en værdi  $F_w^{**}$ . Denne bestemmes ved at erstatte grundværdien  $v_{0}^{**}$  med en værdi  $v_{b,0}$ . Det fremgår af det nationale annex for DS/EN 1991-1-4 at  $v_{0}^{**} = v_{b,0}$ , hvorfor vindlasten  $F_{wk}$  er uændret.

Basisvindhastigheden,  $v_{b,0}$ , sættes til 24 m/s, da det pågældende sted ikke ligger i randzonen i Jylland.

### Dynamisk respons

Pga. broens korte spænd vurderes det ikke nødvendigt at medtage dynamisk tillæg for respons i vindens retning jf. DS/EN 1991-1-4 DK NA:2010.

### Hastighedstryk

Hastighedstryk					
Vindretning		Nord	Øst	Syd	Vest
Terrænkategori		II	I	II	I
Højde over terræn [m]	$z =$	10	10	10	10
Ruhedslængde [m]	$z_0 =$	0,05	0,05	0,05	0,05
Årstidsfaktorens kvadrat	$c_{season}^2 =$	1	1	1	1
Grundværdi for basisvindhastighed [m/s]	$v_{b,0} =$	24	24	24	24
Retningfaktorens kvadrat	$c_{dir}^2 =$	0,8	0,8	0,8	1
Terrænfaktor	$k_r =$	0,19	0,17	0,19	0,17
Orografifaktor	$c_0(z) =$	1	1	1	1
Turbulensintensitet	$I_v(z) =$	0,19	0,15	0,19	0,15
Turbulensfaktor	$k_1 =$	1	1	1	1
Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]	$\rho =$	1,25	1,25	1,25	1,25
Ruhedsfaktor	$c_r(z) =$	1,01	1,17	1,01	1,17
Middelvind [m/s]	$v_m(z) =$	21,61	25,17	21,61	28,14
Basisvindhastighed [m/s]	$v_b =$	22,4	22,4	22,4	25,1
Peakhastighedstryk [ $\text{kN/m}^2$ ]	$q_p(z) =$	0,68	0,80	0,68	1,00
Basishastighedstryk [ $\text{kN/m}^2$ ]	$q_b =$	0,29	0,29	0,29	0,36
Eksponeringsfaktor	$c_e(z) =$	2,35	2,77	2,35	2,77

Figur 6-12 – Opsamling af værdier for vindlast

### Formfaktorer

Formfaktorerne for broens overbygning i henholdsvis x-, y- og z-retningen bestemmes iht. DS/EN 1991-1-4 kapitel 8.

Formfaktorer – overbygning	
$c_{f,x}$	1,3
$c_{f,z}$	0,9
$c_{f,y}$	0,3

Figur 6-13 - Formfaktorer for overbygning

Når fladen i vindsiden skrån timer mod lodret, kan formfaktoren reduceres med 0,5 % pr. hældningsgrad fra lodret dog maksimalt 30 %.

En del af brodækket skrån timer med 80 grader, og formfaktoren for vind i x-retningen vil derfor kunne reduceres til  $c_{f,x} = \frac{1,3}{100} \cdot 70 = 0,91$  på dette stykke.

Formfaktoren på bropillerne afhænger af pillens tværsnitsform og højde/bredde forholdet. Formfaktorerne kan aflæses i DS/EN 1991-1-4 DK NA: 2010 tabel DK NA 2.

Formfaktorer $C_{fp}$ for bropiller			
	Pille 2	Pille 3	Pille 4
Vind i x-retningen	0,85	0,86	0,87
Vind i y-retningen	1,32	1,33	1,33

Figur 6-14 - Formfaktorer for bropiller

## Vindfriktion

For vindfriktion gælder følgende formel:

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

Hvor:

$c_{fr}$  er formfaktoren for friktion. Denne sættes for glatte overflader til 0,01  
 $A_{fr}$  er arealet af den udvendige overflade parallel med vinden

Lasterne fra vind vil være minimale ift. konstruktionens øvrige belastning, for at overskueliggøre beregningerne medtages de ikke.

## Islast

I vandområder fastlægges islasten iht. DS/EN 1991-1 tillæg til nationalt anneks. Islasten er ikke aktuel for dette projekt.

## Bølge- og strømlast

Konstruktionen påvirkes ikke af bølge- og strømlaster.

## Temperatur

Temperaturpåvirkningen fastlægges iht. DS/EN 1991-1-5 Kapitel 6 inkl. DK NA.

Der er to termiske effekter, der kan introducere spændinger i broen. Den første er en ensartet temperaturændring, som resulterer i en aksial udvidelse eller sammentrækning af broen. Hvis broen er fastholdt mod denne udvidelse/sammentrækning, vil det medføre betydelige spændinger. For at imødekomme dette konstrueres broen med dilatationsfuger i begge ender for at sikre fri bevægelse.

Den anden effekt vedrører differentielle temperaturændringer. Hvis f.eks. toppen af bropladen varmes hurtigere op end bunden, vil der være tendens til bøjning.

De optrædende spændinger afhænger af minimums- og maksimumslufttemperaturer. Spændingerne fra temperaturændringerne medtages ikke i de statiske beregninger.

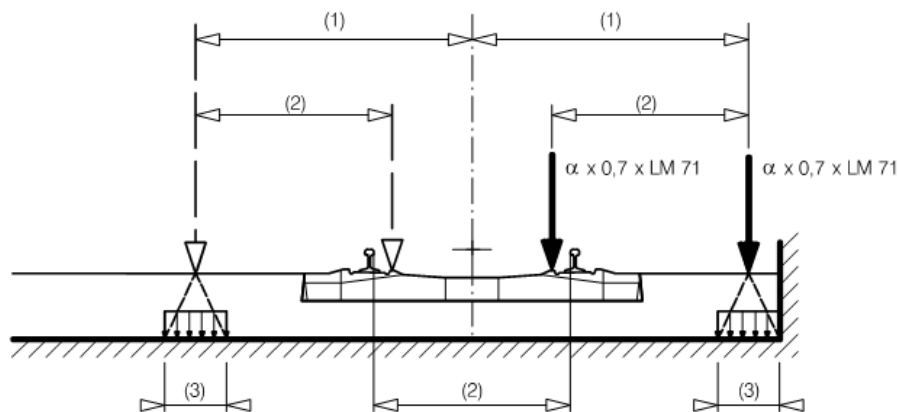
## 6.4 Ulykkeslaster

Ved ulykkeslast forstås påvirkninger, som konstruktioner kan blive udsat for i forbindelse med hændelser, som skyldes menneskelige eller tekniske svigt uden for konstruktionen.

For banebroer skal afsporing betragtes i ulykkesgrænsetilfældet for følgende to situationer:

- Design situation I: Afsporing af jernbane hvor det afsporede køretøj forbliver i sporarealet på brodækket, tilbageholdt af tilstødende jernbane eller en opstående væg
- Design situation II: Afsporing af jernbane hvor det afsporede køretøj balancerer på kanten af broen og laster kanten af overbygningen.

For design situation I skal kollaps af store dele af konstruktionen undgås. Lokale skader tolereres dog. De berørte dele af konstruktionen skal designes for følgende regningsmæssige laster i ulykkesgrænsetilstanden:  $\alpha \cdot 1,4 \cdot LM71$  både for punkt og linjelast parallelt med sporret i den mest ugunstige situation. Figur 6-15 illustrerer scenariet.

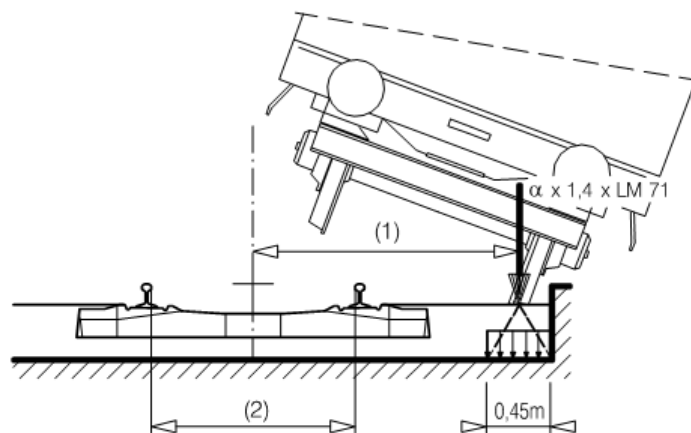


**Key**

- (1) max. 1,5s or less if against wall
- (2) Track gauge  $s$
- (3) For ballasted decks the point forces may be assumed to be distributed on a square of side 450mm at the top of the deck.

**Figur 6-15 - Lastarrangement ALS design situation I (DS/EN1991-2, 2003)**

For design situation II må broen ikke vælte eller kollapse. For bestemmelse af den overordnede stabilitet, betragtes en længde på 20 m belastet med en jævnt fordelt linjelast  $q_{A2d} = \alpha \cdot 1,4 \cdot LM71$  virkende på kanten af konstruktionen som vist på figur 6-16.



**Key**

- (1) Load acting on edge of structure
- (2) Track gauge  $s$

**Figur 6-16 - Lastarrangement ALS design situation II (DS/EN1991-2, 2003)**

Design situation I og II skal ikke betragtes samtidig. Anden togtrafik negligeres og der påføres ingen dynamisk faktor til lasterne.

Påkørsel af bropiller undersøges ikke, da disse er beskyttet af autoværn.



## 6.5 Seismisk last

Seismisk last inkluderes for at sikre konstruktionens styrke og stabilitet over for små jordrustelser. Den seismiske last beregnes iht. DS/EN 1990/A1 DK NA.

For broer fastsættes den regningsmæssige værdi af den seismiske last  $A_{Ed}$  på grundlag af den lodrette last som:

$$A_{Ed} = 1,5 \% \cdot \left( \sum G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right)$$

$\psi_2 = 0,40$  for LM71.

Den seismiske last regnes kun at optræde samtidig med den tilhørende lodrette last og har angrebepunkt i den lodrette lasts tyngdepunkt.

## 6.6 Geometriske imperfektioner

Mulige afvigelser i konstruktioners geometri og placering skal tages i betragtning ved beregningen af konstruktionsdele og konstruktioner iht. DS/EN 1991. Der skal tages hensyn til imperfektioner i brud- og ulykkesgrænsetilstande.

Imperfektioner repræsenteres ved en hældning,  $\theta_i$  givet ved:

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

Hvor:

$\theta_0$  er basisværdien  $\theta_0 = \left( \frac{1}{200} \right)$

$\alpha_h$  er reduktionsfaktoren for længde eller højde  $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} ; \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$

$\alpha_m$  er reduktionsfaktoren for antallet af konstruktionsdele  $\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left( 1 + \frac{1}{m} \right)}$

$l$  er længden eller højden [m]

$m$  er antallet af lodrette konstruktionsdele, der bidrager til den samlede virkning

Definitionen af  $l$  og  $m$  afhænger af den betragtede virkning, hvor der skelnes mellem 3 hovedtilfælde:

- Virkning på enkeltstående konstruktionsdele:  $l$ =faktiske længde,  $m=1$ .

- Virkninger på det afstivende system:  $l$ =konstruktionens højde,  $m$ =antallet af lodrette konstruktionsdele, der bidrager til den vandrette kraft på det afstivende system.
- Virkninger på dæk eller tagskiver, der fordeler vandrette laster:  $l$ =etage højde,  $m$ =antallet af lodrette konstruktionsdele i etagen, der bidrager til den samlede vandrette kraft på dækket.

Imperfektionernes virkning på bropillerne kan betragtes enten som en excentricitet eller en tværgående kraft  $H_i$  i den position, der giver det største moment. Excentriciteten og den tværgående kraft for afstivede konstruktionsdele kan bestemmes af følgende:

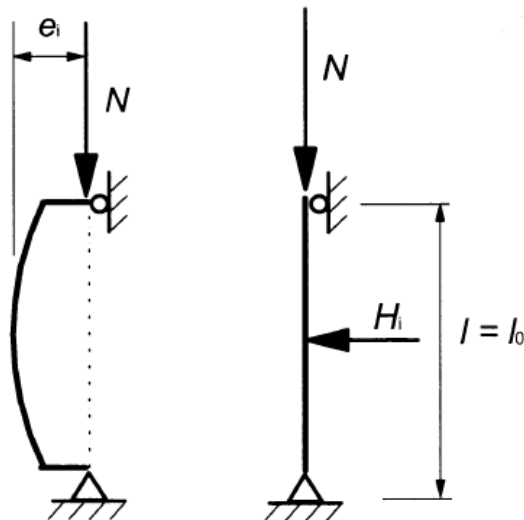
$$e_i = \theta_i \cdot \frac{l_0}{2}$$

$$H_i = \theta_i \cdot N$$

Hvor:

$l_0$  er den effektive længde

$N$  er normalkraften



Figur 6-17 - Geometriske imperfektioner

## 7. Konstruktionsmaterialer

### 7.1 Grund og jord

For at beregne fundamenternes bæreevne skal jordens klassifikations- og styrkeparametre kendes. Parametrene for hvert jordlag fremgår af figur 7-1. Hvor styrken er varierende i samme lag, er det den mindste styrke, der fremgår i tabellen.

#### B4.131

Dybde	Kote	Jordart	$c_v$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
0-0,85	18,30-17,45	Fyld	-	18
0,85-1,8	17,45-16,50	Moræneler	80	21
0,85-4,30	16,50-14,00	Ler	70	21
4,30-5,30	14,00-13,00	Moræneler	140	21
5,30-9,30	13,00-9,00	Ler	120	21
9,30-9,80	9,00-8,50	Moræneler	250	21
9,80-11,80	8,50-6,50	Ler	210	21
11,80-12,30	6,50-6,00	Moræneler	250	21
12,30-17,65	6,00-0,65	Ler	210	21
17,65-19,00	0,65-(-0,70)	Moræneler	435	21

Figur 7-1 - Styrke- og klassifikationsparametre

Partialkoefficienterne for pæles modstandsevne fremgår af figur 7-2.

Grænsetilstande	Pæle
Spids	$\gamma_b=1,3$
Overflade (tryk)	$\gamma_s=1,3$
Total/kombineret (tryk)	$\gamma_t=1,3$
Overflade (træk)	$\gamma_{s,t}=1,3$

Figur 7-2 - Partialkoefficienter for pæles modstandsevne

## 7.2 Beton og Armering

Betonkonstruktionerne udføres i henhold til DS/EN 1992. På figur 7-3 fremgår de valgte karakteristiske betonstyrker.

Konstruktionsdel	Betonklasse	Miljøklasse	Kontrolklasse	Karakteristisk betonstyrke $f_{ck}$ [MPa]
Fundament	Beton C35	Aggressiv	Normal	35
Bropiller	Beton C35	Aggressiv	Normal	35
Brodæk	Beton C35	Aggressiv	Normal	35
Kantbjælker	Beton C40	Ekstra aggressiv	Normal	40

Figur 7-3 - Karakteristiske betonstyrker

I tabel 7-4 er partialkoefficienter for in-situ beton og armering i brudgrænsetilstanden ved vedvarende og midlertidige dimensioneringstilfælde angivet.

Kontrolklasse:		Normal ( $\gamma_3 = 1,0$ )
Betons trykstyrke og E-modul i armeret beton	$\gamma_c = 1,45\gamma_3$	1,45
Slaparmeringsstyrke	$\gamma_s = 1,20\gamma_3$	1,20
Spændarmeringsstyrke	$\gamma_s = 1,20\gamma_3$	1,20

Figur 7-4 - Partialkoefficienter for in-situ beton og armering

Ved ulykkesdimensioneringstilfælde benyttes partialkoefficienten  $\gamma_M = 1,0$ . Mens der for udmattelse benyttes  $\gamma_{c, fat} = \gamma_3 \cdot 1,1$  og  $\gamma_{s, fat} = \gamma_3 \cdot 1,1$ .

Figur 7-5 og 7-6 angiver anvendte armeringsdimensioner samt styrke.

Armerings-type	Klasse	Kontrol-klasse	d [mm]	Karakteristisk flydespænding $f_{yk}$ [MPa]	Regningsmæssig flydespænding $f_{yd}$ [MPa]
Tentor	B	Normal	10-25	550	458

Figur 7-5 – Armeringsparametre

Kabel	Ø (rør) [mm]	Kontrol-klasse	d [mm]	Karakteristisk flydespænding $f_{yk}$ [MPa]	Regningsmæssig flydespænding $f_{yd}$ [MPa]
19C15	45	Normal	15,7	1860	1550

Figur 7-6- Armeringsparametre - spændarmering

### 7.3 Dæklagskrav

Minimumskravet til dæklaget afhænger af den pågældende konstruktionsdels miljøklasse, kontrolklasse og hvorvidt der er tale om slap armeringsstål eller spændarmering. Kravene er fastsat i DS/EN 1992-2 DK NA:2015 og fremgår af figur 7-7.

<b>Miljøklasse</b>	<b>Dæklag for slap armering</b>	<b>Dæklag for efterspændt armering</b>
Ekstra aggressiv	50 mm + 5 mm tolerancetillæg	60 mm + 5 mm tolerancetillæg
Aggressiv	40 mm + 5 mm tolerancetillæg	50 mm + 5 mm tolerancetillæg

Figur 7-7 - Dæklagstykkelser

## 8. Krav til anvendelsesgrænsetilstanden, SLS

Brokonstruktioner skal opfylde kravene angivet i materialenormerne for anvendelsesgrænsetilstanden. Idet broen udføres i beton, skal kravene til spændinger, nedbøjninger og revnevidder overholdes. Herudover er der for sporbærende broer en række krav til deformationer og vibrationer, der ligeledes skal eftervises.

### 8.1 Krav vedrørende materialer

Broen skal opfylde kravene for anvendelsesgrænsetilstanden angivet i DS/EN 1992-1-1 Betonkonstruktioner - Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner.

#### 8.1.1 Vejledende maksimale spændinger

De maksimale spændinger for den karakteristiske last bør ikke overstige 60 % af den karakteristiske trykstyrke.

#### 8.1.2 Vejledende maksimale deformationer

Maksimale udbøjninger på baggrund af karakteristiske kvasipermanente laster

- $L/500$  for konstruktioner med et højt stivhedskrav
- $L/250$  for øvrige konstruktioner

#### 8.1.3 Vejledende maksimale revnevidder

Armering anvendes normalt i betonkonstruktioner for at optage trækkræfter. Når armeringsspændinger bliver af betydelig størrelse, skal de opståede revnevidder undersøges. De anbefalede maksimale beregnede revnevidder  $w_{\max}$  for sporbærende broer iht. DS/EN 1992-2 DK NA fremgår af figur 8-1.

Miljøklasse	Slap armering	Spændarmering
Ekstra aggressiv	0,2 mm	0,1 mm
Aggressiv	0,3 mm	0,1 mm

Figur 8-1 - Anbefalede maksimale revnevidder

### 8.2 Krav til deformationer og vibrationer

I anvendelsesgrænsetilstanden skal de i DS/EN 1990/A1 angivne krav til deformationer og vibrationer af hensyn til trafiksikkerhed og passagerkomfort eftervises for de anførte lastkombinationer i anvendelsesgrænsetilstanden. Kravene og eftervisningen af disse behandles ikke nærmere i dette projekt.

## 9. Andre krav

Udover at konstruktionen skal opfylde kravene vedrørende de forskellige dimensioneringstilstande, stilles der også krav til konstruktionens levetid og robusthed.

### 9.1 Levetid

Sporbærende broer og jordkonstruktioner skal dimensioneres på basis af en forventet levetid på 120 år, hvoraf de første 25 år skal være uden reparationer af betydning.

Konstruktionsdele, der erfaringsmæssigt ikke kan påregnes en levetid på 120 år, skal kunne udskiftes/forstærkes uden væsentlige indgreb i konstruktionen og på en måde så generne for togtrafikken minimeres.

Konstruktionerne skal udformes således, at alle væsentlige konstruktionselementer er tilgængelige og inspicerbare med mulighed for reparation og udskiftning.

### 9.2 Robusthed

Bygværket er henført til konsekvensklasse CC3, hvorfor der stilles krav til dokumentation af robustheden.

For at opfylde dette krav skal mindst én af nedenstående betingelser dokumenteres i en teknisk-faglig-redegørelse:

- De sikkerhedsmæssige vigtige konstruktioner er kun lidt følsomme over for utilsigtede påvirkninger og defekter.
- Der sker ikke et omfattende svigt, hvis en begrænset del af konstruktionen svigter

Udover eftervisningen skal redegørelsen indeholde en kritisk gennemgang af den konstruktive opbygning med identificering af nøgleelementer og lastscenarier.

Der vil i de statiske beregninger blive redegjort for konstruktionens lastnedføring og evne til at videreføre og optage de pågældende laster. På grund af tidshorizonten udledes en videre dokumentation af robustheden.

## 10. Opsummering

I dette projektgrundlag er broens udformning samt overvejelserne i forbindelse med valg af denne beskrevet. Herudover er de nødvendige oplysninger til brug i dimensioneringen af de enkelte konstruktionsdele fastlagt. Dette omfatter bl.a. påvirkende laster samt diverse relevante forudsætninger og forhold tilknyttet projekteringen af bærende konstruktioner. Samtidig er anvendte normer og standarder angivet for at sikre, at projekteringen lever op til det gældende regelsæt. De statiske beregninger kan nu udføres på et ensartet grundlag, hvilket er hensigten med denne rapportdel.



## 11. Bibliografi

Banedanmark. (2010). BN1-59-4.

DS/EN1991-2. (2003). Eurocode 1 del 2.

Google Earth. (1. November 2015).

Letbaner.DK. (u.d.). *Hvad er letbaner*. Hentede 3. Januar 2016 fra Letbaner.DK:  
<http://www.letbaner.dk/hvaderdet/hvorfor/>

Midttrafik. (u.d.). *Hvorfor en letbane?* Hentede 3. Januar 2016 fra Midttrafik.dk.

Midttrafik. (u.d.). *Letbanen*. Hentede 3. Januar 2016 fra Midttrafik.dk:  
<https://www.midttrafik.dk/letbanen/hvorfor-skal-vi-have-en-letbane.aspx>

Mondorf, P. E. (2006). *Concrete Bridges*. Polyteknisk forlag.

Aarhus Letbane. (u.d.). Hentet fra Letbanen.dk:  
<http://www.letbanen.dk/media/134340/Aarhus-togene.jpg?mode=crop-up&cropUpAlias=frontpageSlider>

Aarhus Letbane. (u.d.). *Byggeri*. Hentede 3. Januar 2016 fra Letbanen.dk:  
<http://www.letbanen.dk/byggeri/bro-over-egaadalen/>

Aarhus Letbane. (u.d.). *faq*. Hentede 3. Januar 2016 fra Letbanen.dk:  
<http://www.letbanen.dk/faq/hvor-hurtigt-kan-letbanevogne-koere/>

Aarhus Letbane. (u.d.). *Om Letbanen*. Hentede 3. Januar 2016 fra Letbanen.dk:  
<http://www.letbanen.dk/om-letbanen/>