

Vejdirektoratet

**Bro 70-0-171 - OF af  
Nørresundbygrenen**

**Teknisk undersøgelse af  
stilladskollaps den 25. april 2006**

**Sammenfattende rapport**

Juni 2006

Vejdirektoratet

**Bro 70-0-171 - OF af  
Nørresundbygrenen**

**Teknisk undersøgelse af  
stilladskollaps den 25. april 2006**

**Sammenfattende rapport**

Juni 2006

Dokument nr. 63917-RAP-002  
Revision nr. 0  
Udgivelsesdato 22. juni 2006

Udarbejdet HPO, SOLA  
Kontrolleret HRA  
Godkendt TP/HRA

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sammenfatning</b>	<b>4</b>
2.1	Vurdering af sandsynlig årsag til kollaps	4
2.2	Projektet og anvendt terminologi	5
2.3	Øjenvidneberetning	6
2.4	Vurdering af udbudsmateriale	7
2.5	Vurdering af stilladsprojektets overholdelse af krav i udbudsmaterialet	7
2.6	Beregning af reaktioner fra interimsdæk	8
2.7	Projektering af forskallingsdragere og søjleåg	8
2.8	Projektering af overgangskonstruktion mellem søjleåg og tårne	9
2.9	Projektering af stilladstårne	10
2.10	Projektering af fundamenter	10
2.11	Godkendelse af tegninger og beregninger for stilladserne	11
2.12	Udførelse af stilladskonstruktioner	11

## 1 Indledning

Tirsdag den 25. april 2006 kollapsede stilladset under brodækket på en ny motorvejsbro nord for Limfjordstunnelen i Aalborg. Brodækket var under udstøbning, da ulykken skete.

Den 26. april 2006 anmodede Vejdirektoratet COWI om at foretage en teknisk undersøgelse af årsagen til sammenstyrtningen af stilladset. Efter aftale med Vejdirektoratet omfatter den tekniske undersøgelse følgende hovedaktiviteter:

- Besigtigelse på brostedet med registrering af stilladsarbejdet
- Beskrivelse af hændelsen efter samtaler med Politi, tilsyn og entreprenør
- Gennemgang af udbudsmaterialet og sammenligning med gældende krav og paradigmaer
- Gennemgang af projektdokumentation og korrespondance for beskrivelse af projektet
- Udføre supplerende beregninger af stilladskonstruktionen

Følgende parter deltager i projektet:

Bygherre:	Vejdirektoratet
Vejprojektering:	Vejdirektoratet
Broprojektering:	Rambøll
Byggeledelse:	Vejdirektoratet
Fagtilsyn med vejarbejdet:	Vejdirektoratet
Fagtilsyn med broarbejdet:	Rambøll
Broentreprenør:	Norvin & Larsen
Underentreprenører/rådgivere til Norvin & Larsen:	
Vejentreprenør:	Colas-Novejfa
Geotekniske undersøgelser:	GEO

Ramning af pæle:	Per Aarsleff
Projektering af forskallingsdragere og søjleåg:	Broconsult
Projektering af direkte funderinger:	Broconsult
Projektering af pæle, tårne og tårntop:	Norvin & Larsen

I rapporten anvendes følgende begreber for de i broarbejdet deltagende parter:

- **"Bygherre"** anvendes for Vejdirektoratet, som er bygherre og byggeleder på broarbejdet
- **"Brotilsyn"** anvendes for Rambøll, som står for fagtilsynet på broarbejdet
- **"Entreprenør"** anvendes for Norvin & Larsen, dennes rådgivere og underentreprenører, som står for udførelsen af broentreprisen

COWI har modtaget diverse materiale og korrespondance udarbejdet af bygherre, brotilsyn og entreprenør.

Nærværende rapport er udarbejdet på grundlag af disse oplysninger samt oplysninger og materiale fra besøg på brostedet og oplysninger fra Politiet.

Undersøgelsen fokuserer udelukkende på stilladskonstruktionerne for gennemkørselsfagene over motorvejens kørebaner.

## 2 Sammenfatning

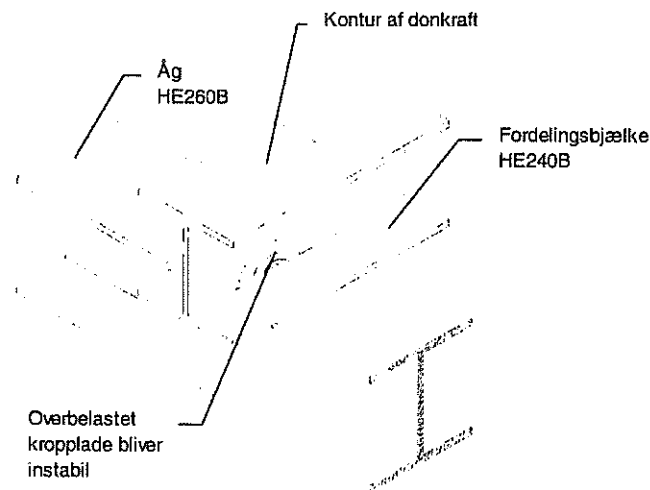
COWIs tekniske undersøgelse af mulige årsager til kollaps af stilladset er baseret på det foreliggende dokumentationsmateriale, samtaler med Politiet samt besøg på brostedet.

I det følgende er resultaterne af COWIs tekniske undersøgelse sammenfattet.

### 2.1 Vurdering af sandsynlig årsag til kollaps

Den tekniske undersøgelse af beregning og konstruktion af forskallingssystemet viser, at bæreevnen af understøtningskonstruktionen mellem hoveddragere i forskallingssystemet og tårnene er utilstrækkelig.

Sammenstyrningen blev initieret ved tårn K (se Figur 4) i den østlige understøtningslinie, langs motorvejens nordgående spor. Bæreevnesvigtet er indtrådt i krydsningspunktet mellem to bjælker under donkraftene, der bærer forskallingssystemet - se Figur 1. Belastningen har medført overbelastning af fordelingsbjælken kropplade.



Figur 1 Detalje af krydsende bjælker

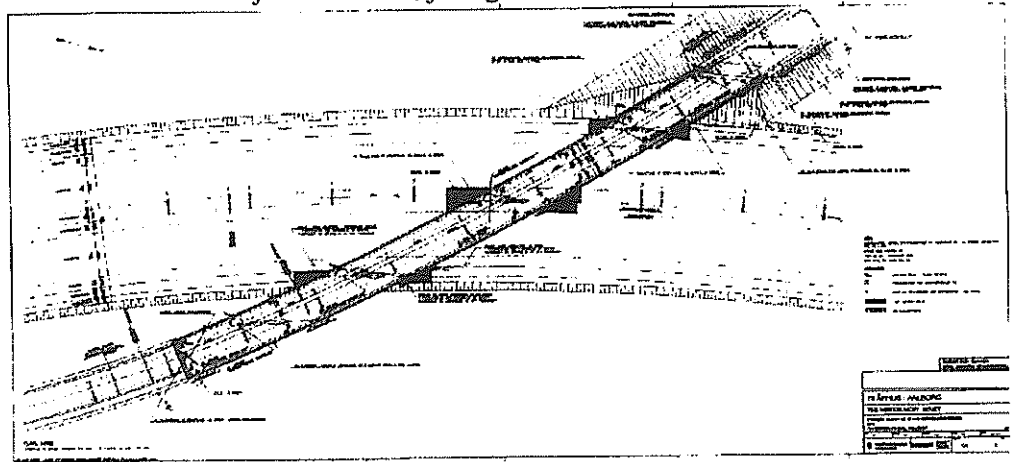
Søjleåget HE500B mistede derved sin understøtning på tårn K og skulle nu spænde fra tårn J til tårn L - se Figur 4. De herved øgede belastninger på de i

forvejen hårdt udnyttede søjleåg, tårne J og L og øvrige understøttelselementer resulterede i udviklingen af det totale kollaps.

Andre forhold som rotation af HE500B søjleåg fremkaldt af den hældende forskallingsdrager HE400B og eventuelle excentriske belastninger kan have forstærket sammenbrudet.

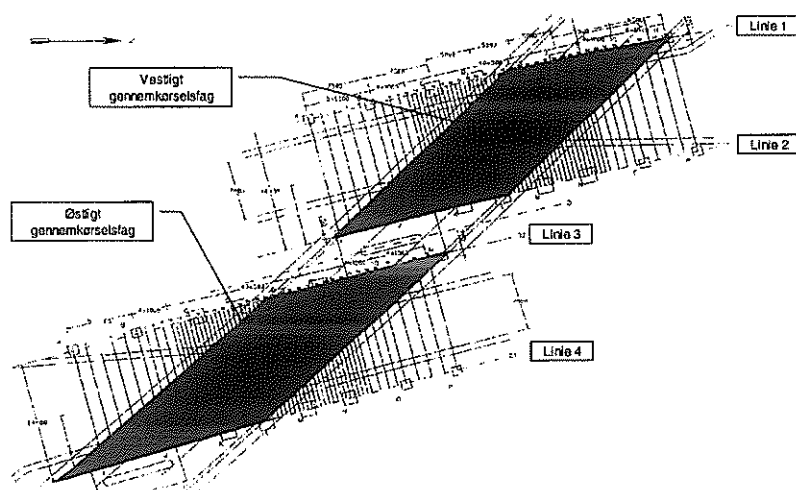
## 2.2 Projektet og anvendt terminologi

Projektet involverer byggeri af en ca. 160 m lang bro over motorvejen umiddelbart nord for Limfjordstunnelen, jf. Figur 2.



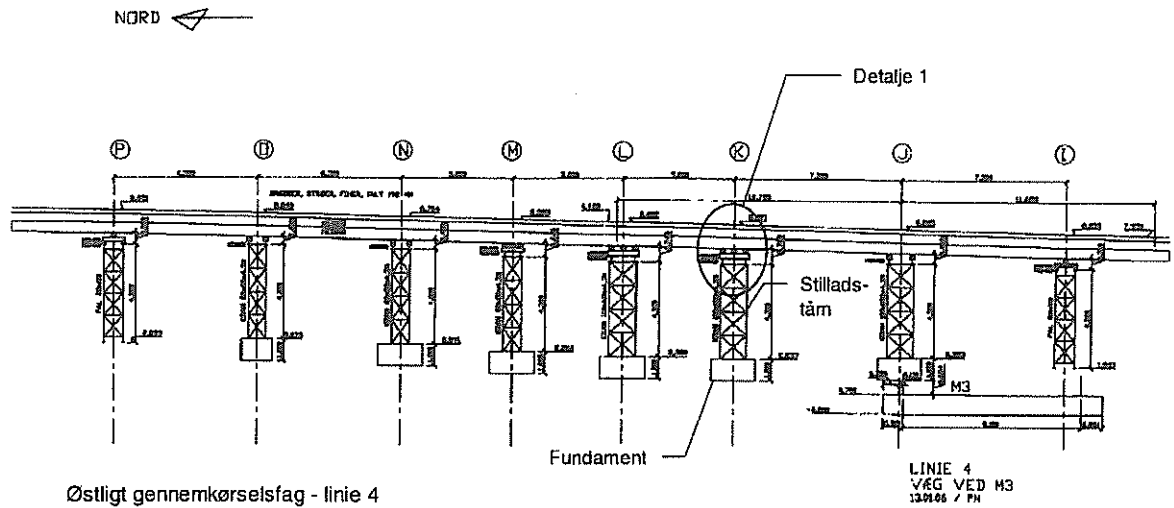
Figur 2 Overblik over broen

På figuren nedenfor er angivet betegnelsen for understøttelseslinierne, som er anvendt i nærværende dokument.

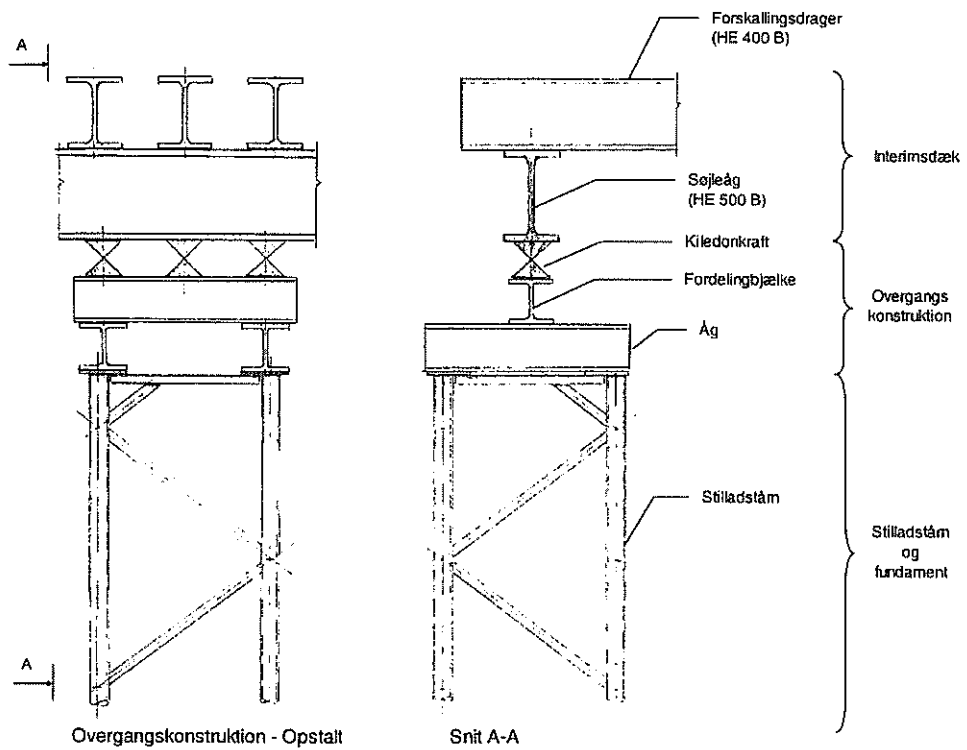


Figur 3 Betegnelser for understøttelseslinier

Betegnelser for de vigtigste strukturelle elementer, der indgår i stilladskonstruktionen, er endvidere vist nedenfor.



Figur 4 Oversigt over strukturelle elementer



Figur 5 Detalje 1 - top af stilladstårn

### 2.3 Øjenvidneberetning

COWI har af Aalborg Politi ved vicekriminalinspektør Ole Jensen samt entreprenøren fået oplyst et hændelsesforløb, som kan beskrives således:



Entreprenøren konstaterede et problem med stillads og form i området omkring tårn K i understøtningslinie 4, dvs. understøtningslinien langs den østlige side af motorvejen.

Tre af entreprenørens medarbejdere undersøgte dette område under stilladset og konstaterede, at en stålbjælke under de mekaniske donkrafte var vredet. Entreprenøren besluttede, at fejlen skulle rettes. Den ene person gik herefter tilbage til den igangværende støbning, den anden hentede det nødvendige værktøj, mens den tredje forblev under stilladset. Umiddelbart efter sker kollapset.

## 2.4 Vurdering af udbudsmateriale

Udbudsmaterialet indeholder direkte eller indirekte via normhenvisninger et antal krav relateret til projektering og udførelse af interimskonstruktionerne.

COWI har ved gennemgang af diverse udbudsdokumenter og normer ikke fundet mangler i de stillede krav til projektering og udførelse af interimskonstruktionerne.

## 2.5 Vurdering af stilladsprojektets overholdelse af krav i udbudsmaterialet

Specifikke forhold angående projektering og udførelse af stilladskonstruktionerne er adresseret særskilt. Nedenfor er den modtagne dokumentation gennemgået med henblik på at konstatere, om de væsentlige overordnede krav er overholdt i projektet. Her skal fremhæves:

SAB s 90

Under stillads og form, projektering angives, at *"stilladskonstruktioner og form over den underførte motorvej skal henføres til høj sikkerhedsklasse jf. DS 409"*.

Den fremsendte dokumentationen viser, at høj sikkerhedsklasse er anvendt ved eftervisningen af HE400B forskallingsdragere samt HE500B søjleåg. Derimod fremgår det af dokumentationen, at fundering og tårne ikke er projekteret i høj sikkerhedsklasse. Fordelingsbjælker og åg mellem tårne og søjleåg synes at være projekteret med partialkoefficienter for normal sikkerhedsklasse fra den tidligere udgave af DS 412. Dette svarer dog tilnærmelsesvis til høj sikkerhedsklasse efter den nu gældende DS 412.

DS 409 s16

Under sikkerhed angives, at *"en konstruktions robusthed skal stå i relation til konsekvenserne af et svigt af konstruktionen. Der stilles kun krav til robusthed, se 1.2.7 (1)P, for konstruktioner i høj sikkerhedsklasse"*.

Der foreligger ikke dokumentation for, at konstruktionen er projekteret under særlig hensyntagen til robusthed.

SAB s 92

Under udførelse, stillads er anført, at *"entreprenøren skal ved stilladsberegninger - især ved stilladser højere end 4 m - gøre nøje rede for placeringen af stød og afsværtning"*.

Der foreligger ikke dokumentation for, hvorledes de horisontale kræfter overføres fra stilladsoverbygning til fundering.

AAB betonbroer s5-6 Under stillads og form, projektering angives, at "*entreprenøren skal i sit stilladsprojekt specificere tolerancer for udførelsen. Der skal i stilladsberegningerne være taget højde for de angivne tolerancer*".

Ved gennemgang af stilladsberegninger og tilhørende tegninger er der ikke fundet specifikation af tolerancer for udførelsen, og der er ikke medtaget tolerancer i beregningerne.

## 2.6 Beregning af reaktioner fra interimisdæk

De væsentligste kommentarer til beregninger af belastninger fra interimisdækket er:

- Entreprenørens udførte analyse af interimisdækket er foretaget for det vestlige fag. COWIs tekniske undersøgelse viser, at det østlige fag er mere kritisk som følge af, at både motorvejen og den overførte vej ligger i kurve. Egenvægten af det østlige fag vurderes 10-15% større end egenvægten af det vestlige fag. Som følge af broens geometri vil denne ekstra vægt hovedsagelig skulle understøttes af de yderste stilladstårne. Det er fundet, at lasten typisk øges med ca. 20%, samt at lasten på et enkelt af de yderste tårne (I) øges med mere end 100%.
- Entreprenørens tegning 28.125-01 opsummerer reaktionerne på de enkelte tårne. Tegningen angiver, at reaktionerne langs de to understøtningslinier er ens. COWIs tekniske undersøgelse viser, at dette ikke er tilfældet og at reaktionerne på tårnene og bøjningsmomenterne i søjleågene derfor i visse tilfælde undervurderes med op til 25%.
- Søjleåg for henholdsvis østlig og vestlig understøtningslinie er placeret i forskellig koter, således at forskallingsdragerne ikke forløber vandret. Dette resulterer i, at forskallingsdragerne vil "ride" på kanten af søjleågets overflange, som herved påvirkes excentrisk.
- Entreprenørens tegning 28.125-01 angiver endvidere de totale vandrette reaktioner samt specificerer, at kræfterne skal optages af de permanente fundamenter. Der er i stilladsprojektet ikke redegjort for, hvorledes disse vandrette kræfter skal overføres fra interimisdæk til den permanente fundering.

## 2.7 Projektering af forskallingsdrager og søjleåg

Forskallingsdragerne bærer formen på tværs af motorvejen, og søjleågene er de langsgående bjælker placeret på stilladstårnene på langs af motorvejen.

De væsentligste kommentarer til projekteringen af forskallingsdrager og søjleåg er:

- Bæreevnen af forskallingsdragerne er generelt vurderet tilstrækkelig, dog er der fundet en enkelt mindre overudnyttelse.
- For søjleågene er der fundet en overudnyttelse både i situationen, hvor hele dækket ville være udstøbt samt på det stade støbningen var, da kollapsede skete. I begge situationer er den regningsmæssig udnyttelsesgrad for henholdsvis bøjning og forskydning på 1,3-1,4, mens udnyttelsesgraden for kombineret bøjning og forskydning er på 1,8-1,9. Det kan bemærkes, at den karakteristiske udnyttelsesgrad (dvs. uden partialkoefficienter på last og materialesiden) var ca. 0,7 på tidspunktet for kollapsede.

## 2.8 Projektering af overgangskonstruktion mellem søjleåg og tårne

Overgangskonstruktionen mellem søjleåg og tårne består af donkrafte, fordelingsbjælker og åg, jf. Figur 5.

De væsentligste kommentarer til projekteringen af disse er:

- Entreprenøren har ikke vurderet effekten af lokale belastninger på kroppladen af fordelingsbjælken og åg. Dette omfatter både koncentrerede belastninger under donkrafte og i krydsningspunktet mellem fordelingsbjælke og åg. Der er f.eks. ikke tilføjet lokale kropafstivninger under belastningspunkterne til sikring af lastoverføring og stabilitet. Der er fundet regningsmæssige udnyttelsesgrader af størrelsesordenen 2 for flere fordelingsbjælker og åg.
- Entreprenøren har i sin projektering ikke dokumenteret at understøtningsforholdene for donkraftene sikrer en jævnt fordelt last på den enkelte donkraft.
- Entreprenøren har i sin projektering placeret op til 3 donkrafte på overgangskonstruktionerne, med den ene placeret midt på fordelingsbjælken. De statiske forhold betyder, at den midterste donkraft aflastes og forbliver virkningsløs, hvorfor de to øvrige donkrafte belastes væsentligt mere end forudsat. Usymmetrisk belastning fører til vinkeldrejning af søjleåget, der igen resulterer i uens belastning på donkraftene og dermed en undervurdering af de maksimale donkraftbelastninger. For nogle donkrafte er "safe working load" dermed overskredet med 50%
- Der er ikke taget hensyn til excentriciteter som følge af tolerancer på placering af f.eks. donkrafte og fordelingsbjælker. Få mm excentricitet på belastningen ud af bjælkens plan medfører ekstra påvirkninger af bjælkens kropplade af samme størrelsesorden som fra selve den lodrette last.
- Entreprenøren har i sin projektering ikke indarbejdet krav til robusthed for konstruktionselementer i høj sikkerhedsklasse.

## 2.9 Projektering af stilladstårne

Stilladstårnene er placeret under stilladskonstruktionens søjleålg på hver side af motorvejens gennemkørselsåbning. Der anvendes primært 2 typer tårne, som er modificerede sektioner fra en gitterkonstruktion, der tidligere har været anvendt som krantårn. Tårnene står med afstande varierende mellem 5,0 m og 7,5m.

De væsentligste kommentarer til projekteringen af disse er:

- Entreprenøren har forudsat, at lasten kan fordeles ligeligt mellem de 4 hjørnejern. Søjleålgens understøtningsforhold er statisk ubestemt, hvilket giver en væsentlig ulige lastfordeling på donkraftene og dermed excentricitet på tårnet. Der er fundet regningsmæssige udnyttelsesgrader på mellem 1,2 og 2,5 for et antal tårne.
- Entreprenøren har ikke taget hensyn til tolerancer i forbindelse med tårnernes placering i forhold til stilladskonstruktionens søjleålg.
- Den udførte modifikation af tårnene er ikke dokumenteret ved tegninger, beregninger, svejsekontrol m.v.
- Der er anvendt stilladstårne af en type, som ikke er omfattet af beregningerne eller vist på tegninger. Bæreevnen af disse tårne er således ikke blevet eftervist.
- Entreprenøren har ikke undersøgt tårnet for vandrette kræfter. En horisontal masselast på 2,5 %, som der er vejledt om i DS 482, vil øge tårnets udnyttelsesgrad med 40 %.
- Entreprenøren har ikke indarbejdet krav til anvendelsen af høj sikkerhedsklasse samt det tilhørende krav om robusthed for konstruktions-elementer i høj sikkerhedsklasse.

## 2.10 Projektering af fundamenter

Stilladset for gennemkørselsfagene er med undtagelse af 4 fundamenter alle direkte funderede. De 4 undtagelser er fundamenterne K, L, M og N i det østlige fag. Disse er alle funderet på 2 stk. ca. 20 m lange pæle.

COWIs gennemgang af projektdokumentationen har ført til følgende bemærkninger:

- Fundamenterne er ikke regnet i høj sikkerhedsklasse som krævet i SAB. Der er ligeledes ikke taget højde for kravet til robusthed.
- For de direkte funderede fundamenter viser gennemgangen af beregningerne, at fundamenterne er forudsat funderet 1 m under terræn. Under antagelse af høj sikkerhedsklasse finder COWI, at fundamentsunderkant skulle være ca. 1,2 m under terræn.

- Entreprenørens tegning 28.125-01 angiver fundamentsstørrelse, inklusiv en højde på 1 m, men ikke at funderingsniveauet skulle være 1 m under terræn.
- Det har ikke været muligt at få klarlagt, hvor dybt fundamenterne endeligt er blevet funderet, men fotos fra det vestlige fag viser fundamenter placeret på terrænoverfladen. Fundamenter placeret på overfladen har en væsentligt lavere bæreevne (cirka en fjerdedel i dette tilfælde) end fundamenter med fundamentsunderkant 1 m under terræn, som antaget i beregningerne.
- COWIs vurdering viser, at de hårdest udnyttede pæle har en regningsmæssig udnyttelsegrad på under 1,0 uden hensyntagen til robusthedskravet.
- Med 2 pæle i hver pælegruppe er der ikke taget højde for eventuelle excentriciteter i belastningen.

## 2.11 Godkendelse af tegninger og beregninger for stilladserne

Brotilsynet kommenterer i flere omgange entreprenørens fremsendte projekt for stilladskonstruktionerne.

Brotilsynet kommenterer bl.a. den 23. januar 2005 i en e-mail til entreprenøren at der flere steder er problemer med stilladsets bæreevne. Endvidere forudsætter entreprenørens beregninger, at kiledonkraftene placeres meget nøjagtigt midt på dragerne, og for dragere med 3 donkrafte, at de 2 yderste placeres meget nøjagtigt lige over de underliggende åg. Entreprenøren bør desuden vurdere, om fordelingsdragere og åg kan bære den koncentrerede belastning lige under kiledonkraftene, uden at de forsynes med kropafstivninger.

COWI har ikke i den senere korrespondance fundet, at de rejste spørgsmål er blevet afklaret mellem brotilsynet og entreprenøren

Brotilsynet har på forespørgsel pr e-mail 15. maj oplyst til COWI, at der ikke foreligger nogen godkendelse af entreprenørens tegninger og beregninger for stilladserne.

## 2.12 Udførelse af stilladskonstruktioner

Det har gennem denne undersøgelse ikke været muligt at tilvejebringe detaljeret information vedrørende udførelsen og montagen af det østlige gennemkørselsfag, som styrtede ned. Derimod var det muligt at inspicere det vestlige gennemkørselsfag, inden dette blev demonteret. De følgende kommentarer er baseret på observationer herfra. Det kan dog ikke udelukkes, at der kan være sket små forskydninger visse steder af det vestlige stillads under kollapset, men der er imidlertid intet som antyder, at udførelsen af det østlige gennemkørselsfag skulle være væsentligt anderledes end udførelsen af det vestlige fag. Observati-

oner gjort af mere generel karakter for det vestlige fag, kan således antages at kunne overføres til det østlige fag.

Der er i det udleverede materiale ikke fundet montagevejledninger i form af tegninger og/eller beskrivelser, som definerer stilladskonstruktionerne i detaljer, angiver samlingsmetoder eller fastlægger tolerancerne for montagen af disse konstruktioner.

Montagen af stilladstårne og konstruktioner på toppen af stilladstårnene som forbindelse til søjleågene har været upræcis. Der er konstateret betragtelige excentriciteter ved placering af fordelingsbjælker, åg og donkrafte, som resulterer i en reduceret bæreevne af de i forvejen hårdt udnyttede elementer.

Det er efterfølgende konstateret, at specielt ågene i overgangskonstruktionen er blevet modificeret siden entreprenøren har udfærdiget de statiske beregninger. COWI har via Politiet modtaget ekstra materiale som dokumenterer, at der i flere positioner er monteret mindre bjælker end forudsat i beregningerne. Bjælker har dog oftest fået indsat en ekstra kropplade, men der foreligger ingen dokumentation af disse bjælkers bæreevne.

Der er ydermere konstateret, at der er anvendt stilladstårne af en type, som ikke er omfattet af beregningerne eller vist på tegninger. Bæreevne af disse tårne er således ikke blevet eftervist.