

## Udtalelse om Bellahøj og Teknikernes vurdering af målinger

Rune Brincker, 30.01.2023.

Jeg vil gerne udtale mig i sagen om Bellahøj i relation til teknikernes vurdering af brug af målinger (Rambøll, Svend Ole Hansen ApS og Niras: Eksisterende forhold SAB Bellahøj, 20221201 Besvarelse af notat fra Brincker Monitoring af 18.11.2022).

Jeg udtaler mig alene som videnskabelig ekspert indenfor eksperimentel dynamik, se vedlagte CV. Jeg udtaler mig fordi jeg anser det for min pligt at stille min viden til rådighed for sagen, og jeg modtager ikke noget honorar fra nogen for at komme med denne udtalelse.

Jeg henviser i det følgende til almenlydige principper fra "structural health monitoring" (SHM), som er et velkendt fagområde indenfor anvendelse af målinger på bærende konstruktioner. Der henvises i denne forbindelse til det Internationalt anerkendte videnskabelige paper af Farrar and Worden [1], der fremlægger filosofien bag SHM teknologien, og Brownjohns tilsvarende paper [2], der fremlægger en række eksempler på anvendelser indenfor byggeriet. Begge papers er fra 2007. Siden da er der sket en stor udvikling indenfor det område det kaldes "operational modal analyses" (OMA), hvor informationen trækkes ud af det respons der måles imens bygningen er i brug. Jeg henviser i denne forbindelse til den bog jeg publicerede i 2015, [3], som er den Internationalt mest citerede bog om OMA. Jeg henviser i øvrigt til de mange konferencer om SHM, se eksempelvis [4].

I det følgende vil jeg fokusere på følgende to emner:

- En direkte kritik af teknikernes vurdering af målinger
- En redegørelse for hvordan monitorering kan gennemføres

### Kritik af teknikernes vurdering af målinger

Teknikerne anfører i notat af 01. december 2022 blandt andet følgende:

*"Den angivne undersøgelse/måling knytter sig til anvendelsestilstanden. For visse materialer og konstruktioner er arbejdskurverne kendte gennem hele forløbet af anvendelsestilstanden og brudtilstanden, fx visse typer af stålkonstruktioner. I de tilfælde kan det give mening at lave de anbefalede målinger, da de ikke blot giver informationer om anvendelsestilstanden men også i et vist omfang om brudtilstanden.*

*Nærværende bygningskonstruktioner er sammensat af mange konstruktionsdele, hvoraf mange er uarmeret beton ligesom mange samlinger er uarmeret beton. Konstruktionen er for anvendelsestilstanden forholdsvis stiv. For brudtilstanden er konstruktionen af en sådan karakter, at bruddet formodentligt vil være et sprødt uvarslet brud. I flere af bygningerne mangler de stabiliserende vægge ballast, som udtrykker sig ved at trykresultanten falder uden for væggenes geometri i brudtilstanden. I sådan en situation vil væggene have fuld stivhed, så længe trykresultanten er inden for væggenes geometri (små belastninger), mens bæreevnen vil være væk, så snart trykresultanten falder uden for væggenes geometri. Altså en diskontinuitet i konstruktionens opførelse, som de omtalte målinger ikke vil kunne fange, svarende til at der ikke er en klar og kendt sammenhæng mellem arbejdskurverne for anvendelsestilstanden og brudtilstanden.*

*De målinger der anbefales foretaget, er knyttet til anvendelsestilstanden og alene denne. Anvendelsestilstanden udgør ikke noget problem for bygningerne. Målingerne vil ikke kunne give viden om brudtilstanden, som er problemet for de relevante bygninger.*

*Baseret på ovenstående mener vi ikke at en monitorering af flytninger/accelerationer bidrager med ny viden, der ændrer på de afgivne konklusioner."*

Jeg vil kommentere på følgende centrale argumenter fra teknikerne:

1. Teknikernes argument om at bruddet formodentligt vil være et sprødt uvarslet brud
2. Teknikernes argument om at bæreevnen vil være væk, så snart trykresultanten falder uden for væggenes geometri
3. Teknikernes argument om at målinger knytter sig alene til anvendelsestilstanden
4. Teknikernes argument om at målingerne ikke vil kunne give viden om brudtilstanden

#### Ad 1. At bruddet formodentligt vil være et sprødt uvarslet brud

Når man som tekniker udtaler sig, så må man argumentere og underbygge. Hvor er argumentet for det uvarslede brud?

Man kan altid påstå, at der er fare for et uvarslet brud, men i det foreliggende tilfælde er det blot en mistanke, og en mistanke er ikke et fagligt validt argument med mindre det underbygges.

Når vi designer bygninger, så sørger vi omhyggeligt for at der ikke kan opstå uvarslede brud. Det gør vi ved at sikre, at bygningen i alle samlinger og konstruktionsdele har sådanne egenskaber, at dette ikke kan ske.

Men så snart bygningen er opført iht. et design der sikrer imod et uvarslet brud, så er der alligevel en mulighed for et sprødt og uvarslet brud, for det er umuligt at sikre, at alle arbejder er blevet udført som foreskrevet.

Derfor kan der altid kastes en mistanke imod en hver bygning, ny såvel som gammel, og mistanken kan ikke fjernes ved at bruge normens krav, for man kan ikke sikre at kravene er opfyldt for den færdige bygning.

Man kan således kun sikre at normens krav er opfyldt i projektet. Ikke i den færdige bygning. Der er fejl i alle nye bygninger og der er skader i alle gamle bygninger.

Man kan derfor ikke bare kaste en mistanke om et skørt og uvarslet brud ind i nogen sag uden at argumentere endog særdeles detaljeret for hvorledes dette brud forventes at kunne finde sted i praksis.

Teknikernes argument er ikke gennemført så det kan siges at være et validt argument. Teknikerne argumenterer for det uvarslede brud ved at fremføre at konstruktionerne *"er sammensat af mange konstruktionsdele, hvoraf mange er uarmeret beton ligesom mange samlinger er uarmeret beton"*. Det er ikke i sig selv et argument at betonen er uarmeret. Tænk her på de mange bygninger fra oldtiden, som netop består af mange enkelt elementer der blot er placeret oven på hinanden. De står her stadig efter tusinder af år.

Det er et almindeligt princip i byggeriet, at det er tyngdekraften der holder bygningen sammen. Hvis den kan det, så er alt godt, og teknikerne har ikke argumenteret for at tyngdekraften ikke kan holde bygningerne på Bellahøj sammen.

Når Teknikerne argumenterer for det uvarslede brud så fremføres det at *"For brudtilstanden er konstruktionen af en sådan karakter, at bruddet formodentligt vil være et sprødt uvarslet brud"*. Dette argument har ikke karakter af et argument, men karakter af et postulat. Man må her spørge: Hvad er det for en "karakter" som Teknikerne her taler om?

Som forklaret ovenfor – Så vil der altid være risiko for et sprødt og uvarslet brud. Men fordi der i denne sag netop IKKE er en SÆRLIG risiko for et sprødt og uvarslet brud, så giver det ikke mening at bringe spørgsmålet om et sprødt og uvarslet brud ind i denne sag,

Ad 2. At bæreevnen vil være væk, så snart trykresultanten falder uden for væggenes geometri

Hvis bæreevnen af en bygning alene er bestemt af egenvægten (den nævnte ballast), så er jeg enig i, at når trykresultanten i funderingen falder uden for funderingen (bygningens geometri) så er der ikke mere bæreevne tilbage.

Men denne tilstand indfinder sig ikke sådan uden videre. Inden vi når til det punkt, hvor hele trykresultanten, står helt ude på kanten af fundamentet, så har fordelingen af trykspændingerne været igennem de velkendte klassiske faser, som er i) linenar fordeling med positive spændinger over hele fundamentets flade, ii) lineær fordeling, men nu med nul spændinger ved træksiden (til luv side), iii) lineær spænding over en mindre del af tværsnittet i tryksiden (til læ side) hvor resten af tværsnittet nu har nul spændinger, og endelig så grænsetilstanden hvor resultanten står på kanten af fundamentet.

I tilstanden ii) står resultanten som det kendes fra de klassiske teorier for et massivt tværsnit i tredjedelspunktet. Grænsetilstanden hvor trykresultanten står på kanten af fundamentet svarer derfor til en vindkraft der er tre gange større end tilstanden ii). Da vindkraften er bestemt af dragligningen (drag equation), dvs. at kraften er proportional med vindens hastighed i anden potens, så svarer tilstanden hvor bæreevnen er udtømt til en vindhastighed der er mere end 1.7 gange større end den tilstand ii) hvor den lineære opførsel ophører.

Nu har bygningen ikke et massivt tværsnit. Den består af vægge, og tager vi det i betragtning og antager at huset opfører sig som et tyndvægget kvadratisk rør (på den sikre side da vi så ser bort fra alle indre vægge), så får vi ikke en faktor 3 på vindlasten, men kun en faktor 1.5, og den tilsvarende faktor på vindhastigheden er nu 1.22.

Dette betyder, at vindhastigheden ved kollaps hermed er 1.22 x den vindhastighed som vi har når den lineære spændingsfordeling netop er nul i luv side. Hvis man har en vindmodel og kender bygningens vægt og geometri, så er det let at beregne hvilken vindhastighed tilstanden ii) svarer til. Det er måske sådan at man har bestemt vindhastigheden på 13 m/s?

Det virker dog ikke sandsynligt, for 1.22 x 13 m/s er lig med 16 m/s, og så burde bygningerne vel være faldet sammen allerede? De har jo stået der i 65 år uden der er konstateret en revne, og i den periode må de vel have været udsat for en vindhastighed der er større end 16 m/s?

Ad 3. Målinger knytter sig alene til anvendelsestilstanden

Man kan, efter min mening, med sindsro tillade at folk bor i husene, også selv om tilstanden med ren lineær opførsel og spændingsfordeling overskrides en smule og der opstår stigende ikke-lineariteter i bygningernes opførsel.

Dette kan vi tillade fordi der er denne faktor 1.22 på vindhastigheden fra det punkt hvor den pænt lineære opførsel afsluttes og der opstår kollaps. Den stigende ikke-linearitet vil slå igennem som aftagende stivhed og dermed faldende naturlige frekvenser. Det er velkendt, at det i monitorering er relativt let at bestemme frekvenser med 0.2 % nøjagtighed, hvilket svarer til at detektere en stivhedsændring på det halve dvs. 0.1 % fordi de naturlige frekvenser alle er proportionale med kvadratroden af stivheden.

Man vil således ikke være begrænset til anvendelsestilstanden, men kan med ro sindet bevæge sig en smule ind i det område hvor ikke-lineariteter opstår, og detektere disse.

Teknikerne nævner at *"I sådan en situation vil væggene have fuld stivhed, så længe trykresultanten er inden for væggenes geometri"*. Dette er ganske enkelt ikke korrekt. Så snart vi forlader tilstanden ii) hvor spændingen er nul ved luv side, og øger lasten, og går ind i tilstanden iii), så vil der, fordi samlingen er uarmeret, opstå en revne i luv side. Der er kun fuld stivhed op til og med tilstanden ii), hvorefter stivheden gradvist aftager til nul ved endelig kollaps.

Afslutningsvis så vil jeg nævne, at den faktor 1.5 der mindst er imellem den maksimale vindlast i det lineære område, og så den maksimale vindlast ved kollaps, den er af samme størrelsesorden som forholdet imellem flydespændingen og brudspændingen for meget af det stål, som vi bruger til dagligt i byggeriet.

Hvis man er bekymret for en faktor 1.5 imellem brudkraften og den maksimale lineære kraft, så burde vi lægge hele vores praksis om i byggeriet, hvilket hverken forekommer ønskeligt eller hensigtsmæssigt.

### Ad 4. At målingerne ikke vil kunne give viden om brudtilstanden

Når resultanten står på kanten af fundament, så er stivheden væk, Det er almen viden i feltet. Men inden vi når det punkt, så har vi for længst detekteret en begyndende ikke-linearitet svarende til et tab af stivhed på kun 0.1 %, altså en forsvindende del af den stivhedsændring der svarer til at vi er på randen af kollaps. Der er med en usikkerhed på 0.1 % som bekendt tusind skridt op til tilstanden med stivheden nul.

Da vi på grænsen til det ikke-lineære område stadig har en faktor 1.22 op til den vindhastighed der vil give endeligt kollaps og hvor stivheden falder til nul, så kan vi uden bekymring tillade vindkræfter der giver stivhedsændringer på nogle få procent. Men det er ikke strengt nødvendigt for at detektere grænsen imellem den lineære og den ikke lineære opførsel. Det er i princippet nok at vi er netop på grænsen, fordi det er middelvinden der giver den middelkraft, der forårsager spændingen nul i luv side. Oven i middelkraften har vi også en dynamisk last, og den vil selv, på grænsen til det ikke-lineære, i perioder give anledning til detektering af ikke-lineariteter på grund af den dynamiske amplitude.

Men hvis vi ønsker en mere sikker viden om brudtilstanden, så kan vi benytte området fra måleusikkerheden på 0.1 % op til nogle få procent til at opstille en model for hvorledes stivheden aftager med stigende vindhastighed, og vi kan herefter benytte dette til at opstille en model for brudtilstanden.

Ingen kan vide om vi nogensinde når op på vindhastigheder, der giver disse ændringer. Men skulle vi se ændringer af stivheden på nogle få procent, så opnår vi en model for brudtilstanden. Hvis ikke vi nogensinde ser nogen ændringer af stivheden ved høje vindhastigheder, så har vi hermed vist, at bygningerne slet ikke har nogen problemer med at modstå vindlasten.

### Redegørelse for hvordan monitorering kan gennemføres

For at belyse bygningernes tilstand og muligheden for at vise at bygningerne kan modstå en vindpåvirkning, foreslår jeg skridt for skridt følgende undersøgelser i kronologisk orden:

- A. Monitorering til bestemmelse af bygningernes første tre naturlige frekvenser
- B. Formulering af finite element (FE) modeller for bygningerne
- C. Kvalitativ sammenligning af mode shapes og naturlige frekvenser
- D. Opdatering af FE modeller

## Udtalelse om Bellahøj og Teknikernes vurdering af målinger

- E. Monitorering over en kortere periode for at opdatere vindmodel
- F. Monitorering over en lang periode for at iagttage eventuelle ikke-lineariteter
- G. Monitorering over levetiden for at holde øje med fald i stivhed.

### Ad A. Monitorering til bestemmelse af bygningernes første tre naturlige frekvenser

Dette skridt er normalt det første skridt i al SHM. Det skyldes at næsten uanset hvilken type sensor man bruger, så vil de naturlige frekvenser kunne bestemmes, og som nævnt ovenfor med en relativt god nøjagtighed som relaterer direkte til konstruktionens stivhed.

### Ad B. Formulering af finite element (FE) modeller for bygningerne

For at kunne sammenligne de målte naturlige frekvenser med hvad der kan forventes, så er det god praksis i al SHM at opstille en lineær FE model. I dette tilfælde er det yderst enkelt fordi konstruktionerne geometri er kendt, således at massen (den samlede tyngde der udgør ballast) kan bestemmes med stor nøjagtighed ud fra betonens massefylde som er veldokumenteret.

Tilsvarende kan stivheden bestemmes ud fra nogle antagelser om E-modulen, der dog har en noget større usikkerhed end massefylden.

### Ad C. Kvalitativ sammenligning af mode shapes og naturlige frekvenser

En forskel i målte og modellerede naturlige frekvenser vil umiddelbart give oplysning om bygningernes sundhedstilstand.

Hvis de målte naturlige frekvenser ligger over dem der er estimeret med FE modellen, så indikerer dette at bygningerne er i en særdeles god tilstand. I dette tilfælde er bygningen nemlig stivere end forventet, og som det altid er tilfældet, så er stivhed relateret til styrke, jo højere stivhed, jo højere styrke.

Det er vigtigt at bruge et passende antal sensorer, således at bygningernes mode shapes (deres måde at bevæge på ved de nævnte naturlige frekvenser) også kan bestemmes eksperimentelt.

Hvis der er god overensstemmelse imellem de målte mode shapes og de mode shapes der er bestemt med FE modellen, så vil det igen bestyrke troen på bygningernes sundhed.

### Ad D. Opdatering af FE modeller

Jo bedre overensstemmelse der kan etableres imellem målinger og FE modellen, dvs. jo bedre overensstemmelse der er imellem de naturlige frekvenser og mode shapes, jo bedre har vi underbygget bygningernes grundlæggende sundhed.

For at forbedre denne overensstemmelse så er det normalt at ændre på FE modellen med en såkaldt opdatering af FE modellen. I denne forbindelse kan man anvende et kommercielt stykke software som FEMTools, se [5].

Det må dog overvejes om opdateringen af FE modellen svarer til ændringer der ligger indenfor hvad der kan forventes ud fra naturlige variationer i stivhed og masse.

Hvis modellen ikke kan opdateres så der kan bringes overensstemmelse imellem data og model indenfor rammerne af den nævnte naturlige variationer, så er der grund til bekymring. Så må der ses nærmere på hvad årsagen til dette er. Næste skridt i denne retning vil handle om "damage detektion", men da intet tyder på at bygningerne rent faktisk fejler noget, så ligger det uden for rammene af denne udtalelse.

Hvis opdateringen af FE modellen kan vurderes som realistisk, og der kan opnås en god overensstemmelse imellem data og model, hvilket er normalt, så kan man gå videre til næste skridt.

Ad E. Monitorering over en kortere periode for at opdatere vindmodel

Når der er etableret en opdateret pålidelig FE model, så kan vi bruge bygningerne som sensorer.

Vi kan måle accelerationer, og vi kan omregne disse til flytninger. Hvis vi samtidig har en vindmodel som angivet ved dragligningen, så kan vi justere konstanten I dragligningen så den deformation som vindmodellen forudsiger passer med den målte.

Vi har hermed bestemt en ny vindmodel hvor lasten er mindre end det som normen foreskriver (fordi normens estimat altid er på den sikre side), og hvor vi også kender usikkerheden på modellen, således at vi kan gennemføre en forbedret sikkerhedsanalyse.

Ad F. Monitorering over en lang periode for at iagttage eventuelle ikke-lineariteter

Vi har allerede argumenteret herfor under punkterne 3 og 4 ovenfor.

Ad G. Monitorering over levetiden for at holde øje med fald i stivhed

Der vil altid forekomme forvitring, korrosion eller andet som vil nedsætte en bygnings stivhed og styrke, og derfor er det fornuftigt at monitorere de naturlige frekvenser for at overvåge med hvilket tempo nedsættelsen af stivhed udvikler sig over tid, således at man kan intervenere proportionalt og fornuftigt i tide.

Referencer

- [1] Farrar and Worden: *An introduction to structural health monitoring*. Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 303–315.
- [2] Brownjohn: *Structural health monitoring of civil infrastructure*. March 2007, Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 365(1851):589-622
- [3] Brincker og Ventura: *Introduction to operational modal analysis*. Wiley, 2015.
- [4] SHM conference: <https://waset.org/structural-health-monitoring-conference>
- [5] FemTools: <https://www.femtools.com/products/ftmu.htm>

End-of-doc.



Rune Brincker, 06-02-2023