

# Udtalelse om Bellahøj

Rune Brincker, 11. Dec. 2022.

Jeg vil gerne udtale mig i sagen om Bellahøj og bekymringen om den tilsyneladende mangel på sikkerhed overfor vindlast og mulighederne for øge sikkerheden ved at gennemføre målinger.

Jeg udtaler mig alene som videnskabelig ekspert indenfor eksperimentel dynamik, se vedlagte CV. Jeg udtaler mig alene 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.

Det ville være en god ide eventuelt at få en tilsvarende udtalelse fra en ekspert i konstruktioners sikkerhed, således at emnet sikkerhed kan dækkes bedre og mere konkret end tilfældet er i de indtil videre foretagne undersøgelser og beregninger.

### Det grundlæggende princip for bygninger

Jeg undrer mig over at det normale princip for bygninger ikke er fulgt. Dette princip går i sin enkelhed ud på, at hvis der ikke er særlige grunde til at betvivle en bygnings sundhed, såsom synlige revner, sætninger eller kraftig korrosion, så anses enhver bygning for at være sund.

Princippet er altså normalt, at en bygning anses for sund indtil andet er bevist. Og dette andet kan ikke være beregninger ud fra gældende normer, idet gældende normer altid vil være på den sikre side.

Overholdelse af gældende normer sikrer en bygnings sundhed, men man kan ikke omvendt slutte, at fordi gældende normer ikke er overholdt, så er en bygning ikke sund.

Hvis der er tvivl om en bygnings sundhed, så bør spørgsmålet undersøges ved gennemførelse af målinger på den pågældende bygning, og eventuelt suppleres med en sikkerhedsanalyse der bygger på den indhentede viden fra målingerne.

### Måling og en bygnings sundhed

Måling og bygningers sundhed stammer fra den engelske begreb "structural health monitoring" (SHM), som er blevet stort forretningsområde de senere år. Det kan nævnes, at det internationale marked for SHM i 2022 er på 2000 Mill USD.

Der har fra rådgivernes side været stillet spørgsmål om hvorvidt man ud fra målinger kan udtale sig om en bygnings sundhed, og i så fald hvad der skal forstås ved en bygnings sundhed, se kommentar fra Svend Ole Hansen, [1].

Normalt vil man i SHM primært opsamle data over tid for at se på hvorledes sundheden udvikler sig over tid. Det princip kan vi ikke benytte her, idet der ikke har været opsat sensorer, så vi har data tilbage i tiden.

Sundheden kan dog stadig undersøges ved at sammenlignes målinger med hvad der kan forudsiges med modeller. Hvis modellernes forudsigelser svarer til målingerne så vil dette underbygge en bygnings sundhed.

I dette tilfælde vil det være naturligt at sammenligne bygningens målte bevægelser med de bevægelser der kan forudsiges med en elastisk Finite Element (FE) model. Denne model vil have dynamiske egenskaber beskrevet ved de mode shapes og de naturlige frekvenser der forudsiges af modellen.

Ved at gennemføre målinger kan både frekvenser og mode shapes estimeres ved måling og sammenlignes med modellens frekvenser og mode shapes.

De naturlige frekvenser giver oplysning om den overordnede stivhed af bygningen, og mode shapes giver oplysninger om fordelingen af stivhed i bygningen.

Det skal nævnes, at Svend Ole Hansen allerede har gennemført målinger af bygningernes frekvenser for de første tre modes, og resultaterne viser naturlige frekvenser af den størrelsesorden som man vil forvente.

Jeg undrer mig her over, at der tilsyneladende ikke er gennemført en sammenligning imellem de målte frekvenser og frekvenser fra en FE model.

Jeg er dog helt enig med Svend Ole i, at det er første tre modes der er af betydning. Det vil dog være relevant at benytte flere sensorer, således at mode shapes kan fastlægges, og således at det kan undersøges, om de målte mode shapes har en passende sammensætning af bøjning, forskydning og vridning som forudsagt af FE modellen.

Hvis de målte mode shapes har en passende fordeling af bøjning, forskydning og vridning, så vil dette underbygge bygningens sundhed.

#### Kalibrering af FE modellen

En FE model består grundlæggende af en massefordeling og en stivhedsfordeling, og de naturlige frekvenser afhænger af begge disse fordelinger.

Massefordelingen kan imidlertid fastlægges med stor sikkerhed fordi at al geometri er kendt for et byggeri som Bellahøj.

Stivhedsfordelingen kan herefter forbedres ved en opdatering af FE modellen således at modellen kommer til svare bedst muligt til målingerne. i denne opdatering indgår normalt både frekvenser og mode shapes.

Det skal her nævnes at området "finite element updating" er en teknologi der benyttes i stort omfang i industrien, og at der findes anerkendte kommercielle softwareløsninger til opgaven.

#### Kalibrering af vindmodellen

Da man i sagen Bellahøj primært er bekymret for vindlasten, vil det være oplagt at forsøge at kalibrere vindmodellen ud fra målinger.

Det er velkendt, at man ved at benytte en kalibreret FE model kan bestemme ydre laster på konstruktioner ved at monitorere konstruktionens bevægelser.

I dette tilfælde må jeg dog erkende, at vindlast ikke er mit speciale, og jeg udtaler mig derfor på dette område med forbehold for min manglende erfaring.

Jeg vil dog mene, at hvis der gennemføres målinger over et længere tidsrum, f.eks. over en måned med skiftende vindforhold, så vil der kunne tilvejebringes en sammenhæng imellem udbøjning af de forskellige modes og vindhastigheden.

Herved vil vindmodellen formentlig kunne kalibreres, således at en stor del af usikkerheden i modelleringen af vindkræfterne kan reduceres. Jeg vurderer at dette kan gennemføres af følgende grunde.

Når en opdateret og hermed kalibreret FE model er etableret, så vil vindmodellen kunne kalibreres ved at afstemme konstanterne i vindmodellen så bevægelserne i model og målinger er de samme.

Jeg forventer at vindmodellen vil kunne kalibreres mht. til den statiske last ved at benytte signaler fra sensorer hvor DC signalet (dvs signalet tæt på 0 Hz) er troværdigt (f.eks. tilt metre) og mht. til den dynamiske last ved at isolere de modale koordinater og kalibrere den dynamiske last i de tilsvarende frekvensbånd.

Herved er vindmodellen kalibreret, og der er således en mindre usikkerhed tilbage.

#### Specifik sikkerhedsanalyse

Hvis der er ved målinger er gennemført en opdatering af FE modellen og vindmodellen, så er en stor del af modelusikkerheden fjernet, og der vil derved kunne gennemføres en sikkerhedsanalyse der tager dette i regning til gunst for bygnings sikkerheden

Det anbefales at dette spørgsmål belyses yderligere af en ekspert indenfor konstruktioners sikkerhed.

#### Konstant Monitorering

Hvis man herudover ønsker at sikre sig at bygningerne er og forbliver sunde, kan der gennemføres konstant monitorering, således at de ovennævnte analyser kan gennemføres ved en løbende vurdering af bygningernes sundhed.

Herunder kan det også overvejes at monitorere for ikke-lineær opførsel. Ikke-lineær opførsel vil resultere i blivende deformationer der kan påvises ved tilt målinger eller ved at observere en stigning i den lavfrekvente støj fra accelerationssignaler tæt på DC.

#### Konklusion vedr. målinger

Det anbefales at følge traditionen indenfor bygningsområdet og antage at bygningerne er sunde, når der ikke er klart bevis for det modsatte.

Det anbefales at overveje at indhente viden om bygningernes sundhed ved at sammenligne målte mode shapes og frekvenser med de tilsvarende størrelser fra FE modellen.

Det anbefales endvidere at overveje at opdatere FE modellen og vindmodellen suppleret med en specifik sikkerhedsanalyse som omtalt ovenfor.

Hvis dette ikke anses for at være tilstrækkeligt, så anbefales det at overveje en konstant monitorering af bygningerne således at deres sundhed løbende kan vurderes.

#### Kommentarer til rådgiverne

Svend Ole Hansen kommenterer i [1] mit forslag om at måle på bygningerne.

Jeg er overvejende enig med Svend Ole i hans betragtninger. Hvis der gennemføres målinger vil dette primært give oplysninger om anvendelsestilstanden og ikke om bruttilstanden.

Det vil dog fortsat give mening at foretage målinger der giver oplysninger om anvendelsestilstanden, idet disse målinger vil kunne give oplysninger om bygningernes nuværende sundhed. Og en opdateret vindmodel med reduceret usikkerhed vil give os mulighed for at reducere vindlasterne.

Jeg er også enig i Svend Ole betragtning om at "bæreevnen vil være væk, så snart trykresultanten falder uden for væggenes geometri". Sagen er bare den, at hvis vi nærmer os en tilstand hvor

trykresultanten falder uden for væggenes geometri, så er det svært at forestille sig at dette kan ske uden at dette ændrer bygningens elastiske opførsel så væsentligt, så det kan ses i målingerne.

I [2] siges følgende:

*For hvilken basisvindhastighed kollaps vil indtræde vides ikke. Hvis kollaps indtræder, vurderes det, at det vil være uvarslet og kan udvikle sig progressivt med risiko for at kollapse omfatter hele bygningen*

Igen er jeg grundlæggende enig. Uvarslet brud kan optræde. Problemet er bare, at det kan man stort set sige om alle ældre bygninger. Og man må også tilføje, at selv om uvarslet brud kan optræde, så må det være en fordel at vide noget om virkeligheden.

Min overordnede kommentarer til begge referencer er derfor. Jo mere vi ved om virkeligheden, jo bedre er vi varslet hvis noget ubehageligt er på vej til at ske, og jo bedre kan vi handle forebyggende.

Tillæg om uvarslet brud

Afslutningsvis vil jeg dog gerne rette en kritik imod rådgivernes beskrivelse af det uvarslede brud som ligger til grund for deres anbefaling af at bygningerne skal rømmes.

Svend Ole begrundet i [1] hvordan man er kommet frem til naturen af det uvarslede brud, nemlig ved at antage uarmerede samlinger og ved at basere sig alene på bygningens egenvægt. Jeg henviser her til at Svend Ole taler om at de afstivende vægge mangler ballast, altså den egenvægt der skal til at sikre bygningens stabilitet.

Dette hænger så vidt jeg kan se ikke sammen med den ovenfor citerede udtalelse fra [2] som siger at "For hvilken basisvindhastighed kollaps vil indtræde vides ikke". Den tilstand som Svend Ole henviser til, må være den tilstand hvor trykresultanten netop er inden for væggenes geometri for at bruge Svend Ole's terminologi. Denne tilstand må nødvendigvis svare til en veldefineret last, der igen kan omregnes til en vindhastighed.

Rådgiverne skylder derfor – for fuldstændigheden skyld – at give indsigt i hvilken vindhastighed grænsen for det uvarslede brud svarer til, dvs. den vindhastighed hvor vindlasten svarer til at trykresultanten netop er inden for væggenes geometri.

Hertil vil jeg gerne tilføje, at jeg har svært ved at forestille mig, at den manglende ballast ikke kan etableres samtidig med at de nuværende beboere forbliver i bygningerne. Den nødvendige ballast kan for eksempel anbringes nederst i bygningen, og så kan de øvre dele af bygningen fastholdes med et eller flere trækbånd.

Dato: 11-12-2022

.....  


Rune Brincker

Videnskabelig ekspert indenfor eksperimentel dynamik

Referencer

[1] Svend Ole Hansen: Eksisterende forhold SAB Bellahøj, Besvarelse af notat fra Brincker Monitoring af den 18-11-2022. Notat af 01. december 2022.

[2] Rapport for rådgiverne: Eksisterende forhold SAB Bellahøj, Præcisering til rapportering pr. 24.11.2022. Notat af 28.11.2022, rev. 05.12.2022.