

Note om forøgelse af sikkerhed ved måling på Bellahøj husene

Rune Brincker, Brincker Monitoring ApS, Maj 2023

De kendte Ballehøj huse, der blev bygget i starten af halvtredserne, har været kritiseret for at have for lille sikkerhed overfor vindpåvirkning, og der har fra KAB's rådgiveres side været rejst tvivl om hvorvidt bygningerne kan modstå en storm. Der har desuden været en frygt for at der kan opstå et såkaldt uvarslet brud under en storm.

Jeg har tidligere kritiseret rådgivernes arbejde for at rejse ubegrundet tvivl om bygningernes evne til at modstå vindpåvirkningen ud fra et overordnet synspunkt om, hvordan vi normalt betragter gamle bygninger, idet vi normalt ikke vil kræve, at de skal leve op til kravene for moderne bygninger.

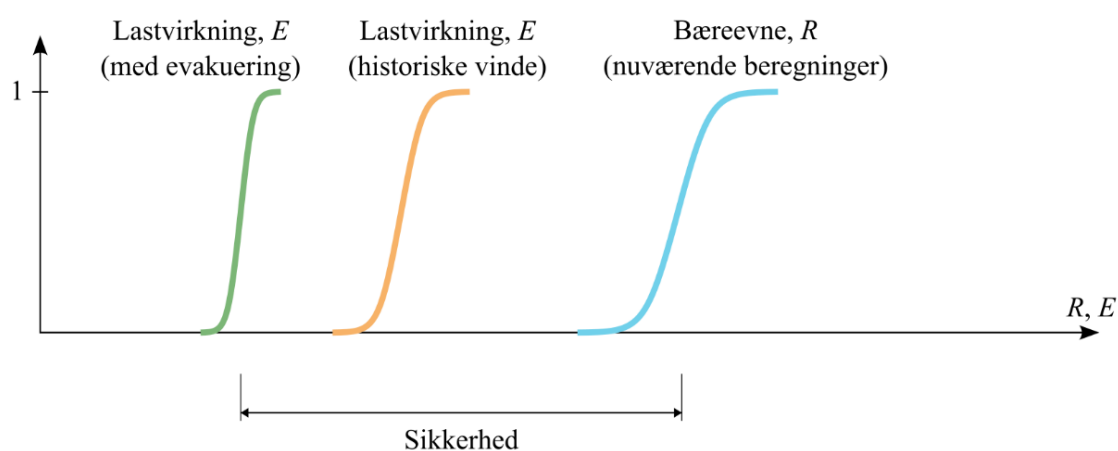
I denne note vil jeg dog se på, hvorvidt der ved måling direkte på bygningerne under en periode hvor bygningernes respons måles under storme, kan opnås en forbedret viden om vindens påvirkning, således at den aktuelle sikkerhed for Bellahøj husene øges og kommer nærmere på kravene i nutidens normer.

Der har for nylig været gennemført en granskning, hvor rådgivernes arbejde er gennemgået af en uafhængig undersøger. Denne note tager udgangspunkt i granskningsrapporten [1], hvor der opereres med en forklaring på, hvordan der med evakuering skabes sikkerhed for beboerne i tilfælde af storm. Figuren fra nederst side 9 i granskningsrapporten er gengivet i Figur 1 nedenfor.

Det er her illustreret hvorledes lastvirkning E fra vindlasten vil kunne reduceres med evakuering idet den gule kurve rykker til venstre (til grøn kurve) hvorved afstanden imellem lastvirkning og bæreevnen R forøges med en forøgelse af sikkerheden til følge.

Vi vil i denne note tage dette argument fra granskningsrapporten et skridt videre og se på hvorledes en forøget viden om vindlasten, der kan opnås ved måling, kan forventes at påvirke sikkerheden. De grundlæggende spørgsmål som vi vil besvare er:

- Kan måling direkte på bygningerne forøge sikkerheden som ved evakuering?
- Og hvis ja: Hvor meget kan vi forvente at sikkerheden øges ved måling?



Figur 1. Kopi af figur nederst side 9 i granskningsrapporten der viser hvorledes sikkerheden øges med evakuering så der sker en reduktion af lastvirkningen ved at den gule kurve rykker mod venstre til den grønne kurve.

Hvorfor information øger sikkerheden

Grunden til at der kan opnås en forøgelse af sikkerheden ved forbedret viden om lastvirkningen E og bæreevnen R er, at normerne skal "være på den sikre side", og at den store usikkerhed på både lastvirkning og bæreevne kan reduceres med en forbedret viden.

Den virkeligt forekommende lastvirkning vil derfor være mindre end den der er foreskrevet af normerne, og usikkerhed på lastvirkningen foreskrevet af normen vil også blive reduceret. Det betyder at den gule kurve i Figur 1 rykker mod venstre og bliver stejlere.

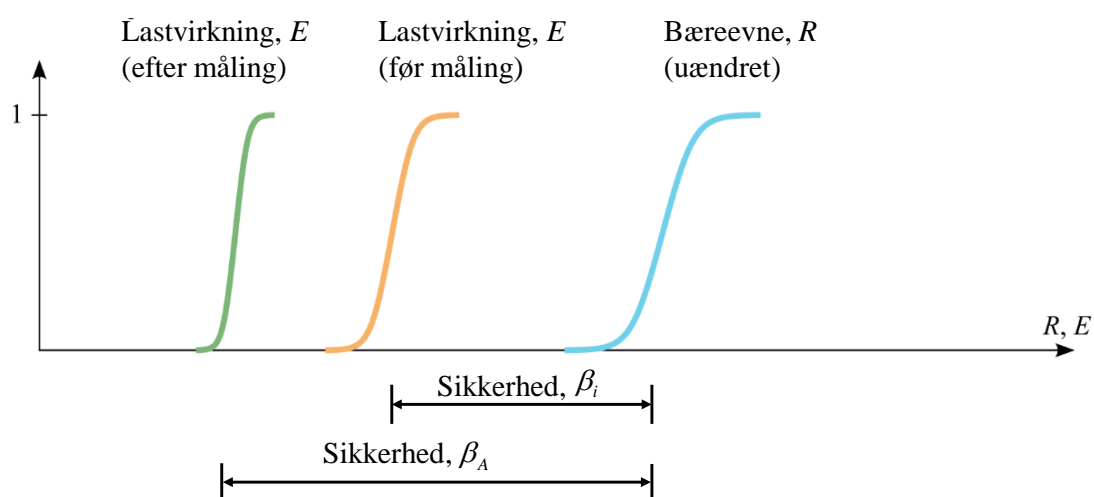
Den virkelige bæreevne vil derfor også være større end den der er foreskrevet af normerne, og usikkerheden vil også blive reduceret. Det betyder at den blå kurve i Figur 1 rykker mod højre og bliver stejlere. Både den øgede afstand imellem kurverne for lastvirkning og bæreevne og den omstændighed at kurverne bliver stejlere vil øge sikkerheden.

Vi vil dog i denne note forenkle sagen og udelukkende se på indflydelsen fra viden om lastvirkningen E . Vurderingen vil derfor være konservativ idet der ses bort fra den positive effekt på sikkerheden der opnås ved en forbedret viden om bæreevnen.

Hvis vi kun tager hensyn til indflydelsen på lastvirkningen E , så sker der noget tilsvarende som ved evakuering. Da vi får en forbedret viden om vindlasten, så vil det mindske lastvirkningen, da normerne er på den sikre side, således at de virkeligt forekommende laster er mindre end dem der foreskrives af normerne.

Dette er illustreret i Figur 2, som er en videre udvikling af Figur 1. Figur 2 viser hvorledes den initiale sikkerhed β_i forøges ved at den gule kurve rykker imod venstre og således giver anledning til en sikkerhed efter måling givet ved β_A , således at $\beta_A > \beta_i$.

Forbedret viden om lasten, vil derfor normalt føre til en forbedring af sikkerheden, fordi normerne normalt er på den sikre side. Spørgsmålet er nu hvor meget vi kan forvente at sikkerheden vil blive forbedret ved at gennemføre målinger? Dette vil vi se på i det følgende.



Figur 2. Videre udvikling af figur nederst side 9 i granskningsrapporten der viser hvorledes sikkerheden øges med måling så der sker en reduktion af lastvirkningen ved at den gule kurve rykker mod venstre til den grønne kurve.

Typiske lastreduktion ved naturlaster

Det afgørende her er at opnå en fornemmelse for størrelsesordenen på svarene til følgende spørgsmål:

- Hvor store reduktioner kan vi forvente fra det som normerne foreskriver, og så til de virkeligt forekommende laster, som vi kan bestemme ved måling?
- Hvor store usikkerhederne er der på normernes foreskrevne laster, og hvor meget kan usikkerheden typisk reduceres ved at anvende viden fra målinger?

Dette vil vi illustrere ved at se bredt på naturlaster som vind og bølger og se på hvad normerne siger om disse lasters indflydelse på det kendte fænomen fatigue (udmattelse), som betyder at en konstruktion kan bryde sammen ved en belastning med mange små påvirkninger.

Ved fatigue bestemmes levetiden af konstruktioner ud fra ligningen for SN kurven $N = CE^{-3}$ hvor N er levetiden målt som antal svingninger og lastvirkningen E er den såkaldte spændingsvidde som er et mål for svingningernes størrelse, og som er proportional med den ydre last, se f.eks. [2].

Det er almindeligt accepteret, at den virkelige levetid typisk er 2-5 gange større end den der er foreskrevet af normerne. Ved brug af ligningen for SN kurven ovenfor svarer dette til en reduktion i lastvirkningen E på 20 til 40 %, idet en reduktion på 20 % giver en levetid der er 2 gange længere og en reduktion på 40 % svarer til en levetid der er 5 gange længere.

Det er desuden dokumenteret, at usikkerheden (standardafvigelsen) på spændingsvidden reduceres med en faktor 3, se Nabuco et al [3], så den usikkerhed der foreskrives af normerne på 25 % reduceres til 5 – 8 %.

Forøgelse af sikkerheden ved måling

I de følgende vurderinger vil vi antage at virkningen af målinger på bygningerne kan beskrives ved følgende værdier

- Lastvirkningen fra vind reduceres med 10 % ved måling
- Usikkerheden på lastvirkning sættes til 15 % af middelværdien før måling
- Usikkerheden på lastvirkning reduceres med en faktor 2 efter måling
- Bæreevnen ændres ikke

Som vi har omtalt i foregående afsnit, så kan vi lære fra reglerne for fatigue, at lastvirkningen for naturlaster som vind foreskrevet af normerne typisk vil være 20 til 40 % for store i forhold til de virkeligt forekommende lastvirkninger. Alligevel har vi forsigtigt antaget at vi kun kan reducere lastvirkningen fra vind med 10 %.

Vi har ligeledes i foregående afsnit refereret til, at usikkerheden på naturlaster som vind ofte vil være så stor som 25 %. Alligevel har vi forsigtigt antaget at usikkerheden på lastvirkningen fra vind kun er 15 % af middelværdien før måling.

Endeligt har vi i foregående afsnit refereret til, at usikkerheden på lastvirkningen fra naturlaster som vind typisk kan reduceres med en faktor 3 ved måling. Alligevel har vi forsigtigt antaget, at usikkerheden efter måling kun reduceres med en faktor 2.

Alle disse tre antagelser, hvorom vi benytter ordet "forsigtigt", betyder at virkningen på sikkerheden bliver konservativt estimeret, dvs. vi estimerer en mindre forøgelse af sikkerheden end den, som vi ville opnå, med mindre forsigtige antagelser.

Vi vil betragte to cases, som vi vil analysere ved at bruge det klassiske Cornell sikkerhedsindeks, som er en simpel måde at beregne sikkerheden på. Det afgørende her er ikke at vi beregner sikkerheden meget præcist og korrekt, eller vælger de to cases som er meget relevante for Bellahøj husene. Det afgørende er, at vi kommer frem en størrelsesorden på forbedringen af sikkerheden, som giver et godt billede af, hvad vi kan forvente at opnå, ved at gennemføre målinger.

Vi vil betragte en case hvor det initiale sikkerhedsindeks er 2.0 og en case hvor det er 2.5, og se på hvor meget vi kan forvente at disse værdier for sikkerhedsindeks kan forbedres med en forbedret viden om vindlasten opnået ved måling.

Vi ved ikke hvad det tilstræbte sikkerhedsindeks er for Bellahøj, men hvis vi tager udgangspunkt i Eurocode, klasse RC2, så foreskrives der her et sikkerhedsindeks $\beta \geq 3.8$. De to betragtede cases er således valgt at ligge med et relativt lavt initialt sikkerhedsindeks i forhold til en værdi på 3.8.

Da sikkerhedsindeks kun afhænger af forholdet imellem lastvirkning og bæreevne kan vi sætte den initiale (ukendte) lastvirkning til 1, og med bæreevne på henholdsvis 1.42 og 1.54 opnår vi så de tilstræbte initiale værdier for sikkerhedsindeks på 2.0 og 2.5, se Tabel 1.

Ved at reducere lastvirkningen på grund af forøget viden om vindlasten som forklaret ovenfor, opnår vi herefter værdier for sikkerhedsindeks på henholdsvis 3.3 og 3.8 for de to betragtede cases, se Tabel 2.

For casen med initialt sikkerhedsindeks på 2.0, som er en meget lav værdi, så må vi derfor forvente at måling vil forbedre viden om lastvirkning fra vind så der opnås et sikkerhedsindeks efter måling på mindst 3.3. Dette er en ganske væsentlig forøgelse af sikkerhedsindekset, og vil derfor medføre at vindhastigheder for evakuering kan forhøjes væsentligt.

For casen med initialt sikkerhedsindeks på 2.5, som stadig er en ganske lav værdi, så må vi derfor også forvente at måling vil forbedre viden om lastvirkning fra vind, så der opnås et sikkerhedsindeks efter måling på mindst 3.8 – det vil sige, at efter måling kan vi forvente at opfylde kravet i Eurocode som netop foreskriver $\beta \geq 3.8$.

Tabel 1. Værdier for de to betragtede cases før måling. Værdierne μ_E og μ_R er middelværdierne for henholdsvis lastvirkning og bæreevne, værdierne σ_E og σ_R er de tilsvarende standardafvigelse, og β_i er det initiale sikkerhedsindeks.

Parameter	μ_E	μ_R	σ_E	σ_R	β_i
Case 1	1.0	1.42	0.15	0.142	2.0
Case 2	1.0	1.54	0.15	0.154	2.5

Tabel 2. Værdier for de to betragtede cases efter måling. Værdierne μ_E og μ_R er middelværdierne for henholdsvis lastvirkning og bæreevne, værdierne σ_E og σ_R er de tilsvarende standardafvigelse, og β_A er det forventede sikkerhedsindeks efter måling.

Parameter	μ_E	μ_R	σ_E	σ_R	β_A
Case 1	0.90	1.42	0.0675	0.142	3.3
Case 2	0.90	1.54	0.0675	0.154	3.8

Konklusion

Vi har set på 2 cases til illustration af hvor meget sikkerheden kan forventes øget ved måling direkte på bygningerne:

- Case 1 hvor det initiale sikkerhedsindeks er 2.0
- Case 2 hvor det initiale sikkerhedsindeks er 2.5

Vi har været konservative og kun taget hensyn til at vindlasten og usikkerheden på vindlasten vil blive reduceret, og vi har brugt konservative reduktioner af vindlasten og usikkerheden på vindlasten.

Klassiske beregninger af sikkerhedsindekset efter måling, dvs. efter at reduktionerne er medtaget til beregning af sikkerhedsindekset viser at

- For case 1 forventes sikkerhedsindeks forøget fra 2.0 til 3.3
- For case 2 forventes sikkerhedsindeks forøget fra 2.5 til 3.8

Ved at gennemføre målinger kan vi altså for case 1 forvente at vindhastigheder for hvilke evakuering bliver nødvendig forøges væsentligt, og for case 2 kan vi forvente at kravet fra Eurocode bliver opfyldt med et sikkerhedsindeks på mindst 3.8.

I begge tilfælde må vi således forvente at sikkerheden for både bygninger og beboere øges væsentligt.

Referencer

[1] Jens-Peter Madsen ApS Rådgivende Ingeniører: *Bygningsstabilitet for SAB I og SAB II*, Granskningsnotat. Notat af 24.04.2023.

[2] Mikkel Melters Pedersen: *Introduction to Metal Fatigue - Concepts and Engineering Approaches*. Department of Engineering – Mechanical Engineering, Aarhus University. Technical report ME-TR-11.

[3] B Nabuco, M Tarpø, UT Tygesen, R Brincker: *Fatigue stress estimation of an offshore jacket structure based on operational modal analysis*. Journal of Shock and Vibration 2020, pp.1-12.