



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Avd. för Byggnadsmekanik, Lunds Tekniska Högskola

Oförstörande provning för identifiering av kvalitetsbrister i konstruktionsglas

Kent Persson
2019-02-11

Oförstörande provning för identifiering av kvalitetsbrister i konstruktionsglas

Institutionen för Byggvetenskaper, LTH, Lunds universitet, Kent Persson

Bakgrund till ansökan

Glas används i allt större utsträckning i byggnader idag. Traditionellt används glas i fönster, som fasadmaterial, i balustrader och balkonger men på senare år har tillämpningsområdet även inkluderat bärande konstruktioner så som balkar, pelare, trappor och golv.

Glas är ett sprött material som är mycket känsligt för imperfektioner i form av repor och mikrosprickor. Dessa imperfektioner, av stokastisk karaktär, är oftast osynliga för blotta ögat men har en drastisk påverkan på glasets hållfasthet som kan variera mellan 15 och 110 MPa.

Glasets känslighet mot imperfektioner innebär att glasets hållfasthetsegenskaper är omvänt proportionellt mot tiden dvs. ju längre tid som går desto lägre hållfasthet pga. nytillkomna imperfektioner från t.ex. fönsterputs, slitage, vandalism m.m.

Glasets sprödhet innebär att ev. kollaps av glasstrukturer inte föregås av nämnvärda deformationer vilket, i praktiken, innebär att kollapsen kommer plötsligt och oväntat. Detta i kombination med en stor osäkerhet vad gäller glasets initiala hållfasthet leder till en förmodad överdimensionering av dagens glaskonstruktioner men säkerheten mot brott är oklar redan i designskedet.

I och med att glaskonstruktioner hållfasthet förändras med tiden så medför en initial osäkerhet, vad gäller hållfastheten, även att det är omöjligt att ange statusen vad gäller säkerhet mot brott för befintliga glaskonstruktioner.

Acoustic Agree i Ronneby har utvecklat en teknik för icke-linjär ultraljudsmätning, NAW, för att kunna fastställa statusen för ett material i form av ett skadevärde baserat på antal och storlek av imperfektioner. Denna metod är mobil, påverkar inte materialet (oförstörande provning) och mätningen tar endast några sekunder vilket gör den idealisk för användning i tillverkande industri och i befintliga konstruktioner. NAW har utvecklats främst mot stål- och betongindustrin men i en pilotstudie från 2013 mellan Byggnadsmekanik (LTH) och Acoustic Agree påvisade att metoden kan fungera bra även för glas.

I dagsläget finns det ingen annan oförstörande provningsmetodik för att säkerhetsställa att glaset uppnår den hållfasthet som anges i standarder. Detta innebär att det finns en risk att kritiska byggkomponenter i glas levereras med otillräcklig hållfasthet. Om man lyckas ta fram en korrelationsmetod mellan skadevärdet med NAW[®] och hållfastheten av glas så finns det goda förutsättningar för att industrin ska kunna hållfasthetssortera glas. Kvalitetsklassningen behöver inte betyda mer spill utan glas med olika kvalitet kan säljas för olika ändamål. Detta kan leda till att glas kan användas i fler och även nya tillämpningar, eller att tunnare glas kan användas.

Arbetet i projektet

Syftet

Det långsiktiga målet med projektet är att utveckla en mätmetod för att kunna fastställa statusen för en glaskonstruktion vad gäller imperfektioner och därmed hållfastheten både initialt vid leverans från fabrik (klassning) men även under glaskonstruktionens livslängd i form av regelbundna kontroller (besiktning).

Projektmålet var framförallt att utveckla och anpassa en existerande oförstörande provningsmetod baserad på icke-linjär utvärdering av ultraljudsprovning, NAW (Nonlinear Acoustic Wavemodulation), så att den är anpassad för glas. Dessutom att koppla mätvärdet från NAW med en statistisk, brottmekanisk modell för en mer detaljerad beskrivning av glaskonstruktionens status vad gäller

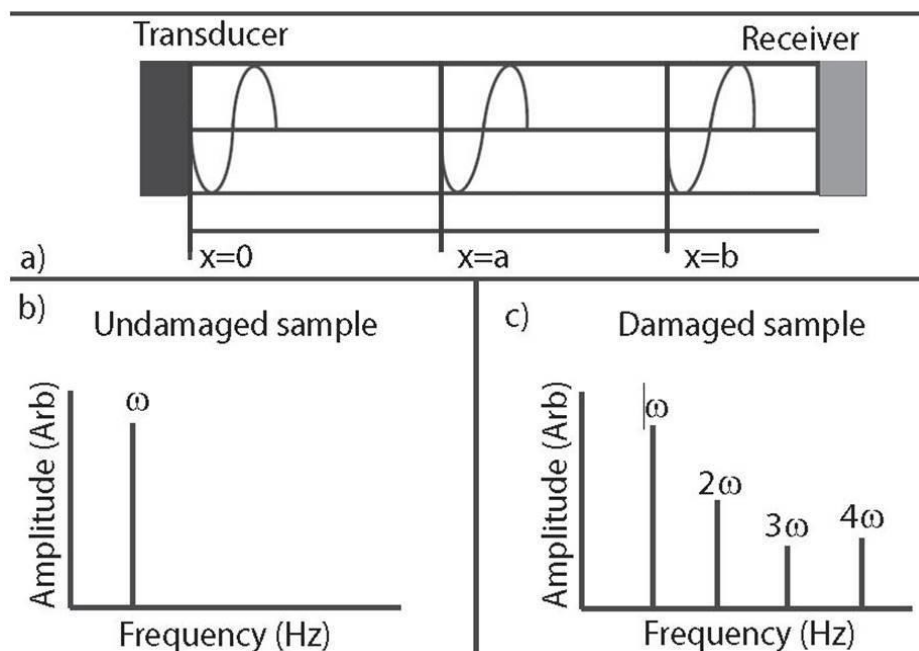
hållfasthet och att sedan kunna utveckla en metodik för klassning respektive besiktning av glaskonstruktioner.

Projektpartner

Projektet bedrivs av avdelningen för Byggnadsmekanik vid LTH med samarbetspartner från Acoustic Agree inom mätteknik, SP Glas med kompletterande mätningar och Osby glas AB som levererade glas för provningar. Ett pågående doktorandprojekt vid byggnadsmekanik, LTH anknyter direkt till projektet: "Stochastic modelling of glass fracture" av Tekn. Lic. David Kinsella som undersöker och modellerar styrkan hos glas med stokastiska modeller baserade på statistisk utvärdering och brottmekaniska teorier, se [1,2,3] för publikationer inom detta område knutet till projektet.

Metod och Material

Glas undersöktes med den icke-förstörande provningsmetoden, NAW vid samtidig belastning med 4-punkts böjprovning. Detta gjordes för att kunna korrelera glasets skadevärde, erhållet med NAW, med dess styrka, erhållet från böjprovet. NAW-mätningarna baseras på en överförd ultraljudsvåg som skickas in i provet via en ultraljudssändare, [1]. En mottagare på andra sidan provet detekterar vågen och det olinjära innehållet i signalen kan sedan analyseras, se figur 1a. För ett helt oskadat provobjekt kommer den mottagna signalen att vara utan förvrängning och se ut som exemplet i figur 1b, där en sinussignal med en frekvens överförs och svaret från den överförda signalen är samma oförvrängda signal. För ett provobjekt som innehåller defekter kommer olinjäriteter i form av högre övertoner att visas i den mottagna signalen, se figur 1c. Olinjäriteter i signalen är starkt kopplad till sprickor och defekter i materialet och antalet olinjäriteter är proportionella mot mängden skada eller defekter i provet som undersökts. Metoden är möjlig att automatisera eftersom ingen inmatning från en operatör behövs vid mätningen och utvärdering skulle kunna utföras med en algoritm. Skadevärdet, som är resultatet av utvärderingen, är lätt att förstå och lätt att använda för omedelbar tillämpning och eftersom skadevärdet kan sparas och dokumenteras är det möjligt att följa skadevärdets förändring över tiden.

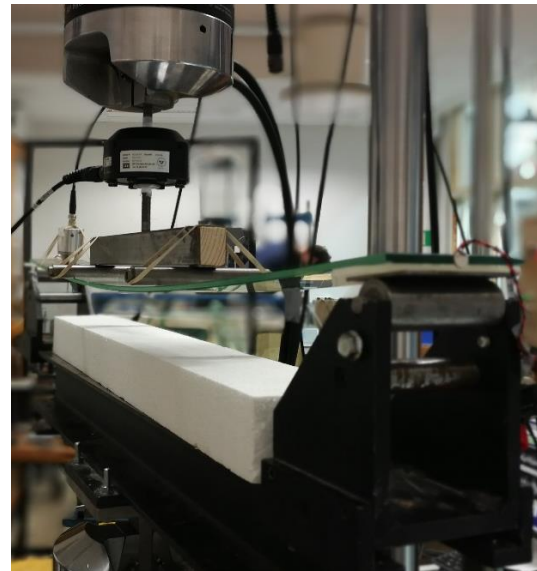
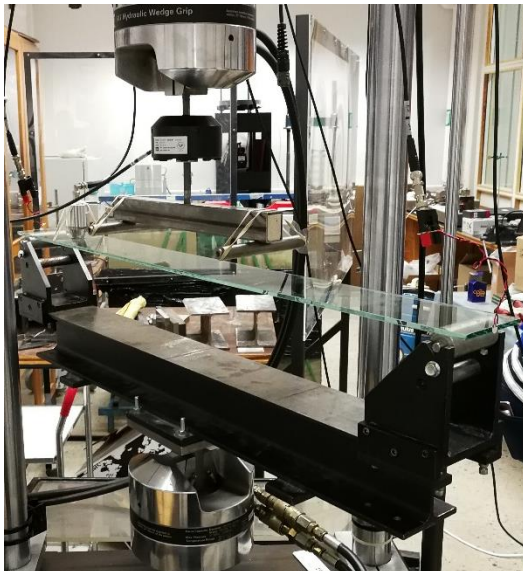


Figur 1, Schematisk skiss över detektion av olinjäriteter. 1a) olinjäriteter i utbredning av våg vid $x=b$. 1b) mottagen signal för ett oskadat objekt och 1c) mottagen signal för ett skadat objekt.

Planglas med dimensionerna 1000x100x6 mm provades för tre olika kantbearbetningar med ca 30 provkroppar i varje serie. Glasen levererades av Osby Glas AB. De tre kantbearbetningarna var obehandlad skuren, dragen och fasad polerad kant, (se figur 2). Provkropparna undersöktes med ultraljudsutrustning samtidigt som glaset belastades i 4-punkts böjprov dels i en enkel uppställning med konstant last och dels i en hydraulisk provningsmaskin, MTS 810. Figur 3 nedan visar provuppställning i den hydrauliska provningsmaskinen. I den hydrauliska maskinen testades de tre kantbearbetningarna vid tre olika belastningshastigheter: 0.6 mm/min, 2 mm/min och 5mm/min. Ultraljudssändare och mottagare limmades på ändkanterna på glasets kortsidor, se Figur 2. NAW-mätningar genomfördes med ca 5-10 sekunders intervall medan lasten, i den enkla uppställningen hölls konstant och i den hydrauliska provningsmaskinen ökade till glaset gick till brott. I glas sker en spricktillväxt av mikrosprickorna där glaset är belastat med dragspänningar som överstiger ett visst tröskelvärde. Det är därför förväntat att det i NAW-mätningarna med samtidig belastning sker en kontinuerlig ökning av skadevärdet tills brott inträffar. Det är då också möjligt att korrelera skadevärdet med glasets hållfasthet.

- (A) Dragen kant
- (B) Obehandlad kant
- (C) Fasad polerad kant

Figur 2: Kantbearbetningar som användes för NAW®-mätningar och böjprovning. (A) dragen kant (även kallad fasadkant eller hårdslipning) som är rå och har defekter men de vassaste kanterna (glaseggen) är grovt bortslipade, (B) obehandlad diamantskuren kant [14], och (C) polerad fasad-kant med matt yta.



Figur 3, Icke-linjär ultraljudsmätning vid samtidig belastning i provningsmaskin. Provuppställning till vänster. Deformation under provning till höger.

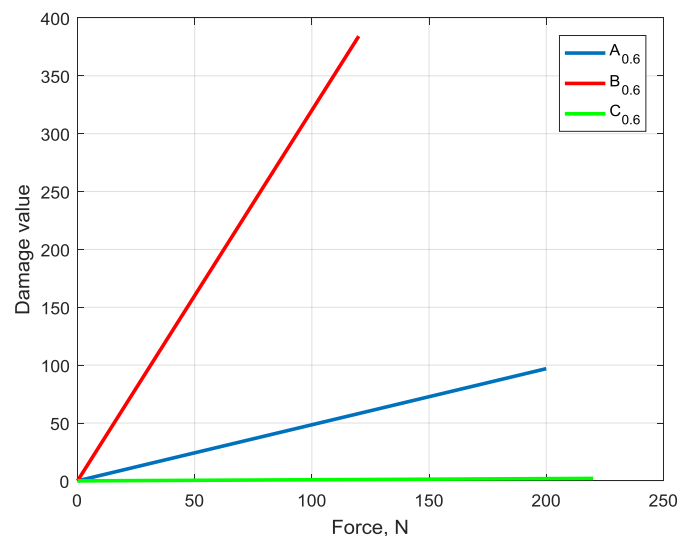
Resultat

Testerna för de tre kantbearbetningarna delades in i Grupp A: dragen, Grupp B: obehandlad och Grupp C: polerad. De tre hastigheterna 0.6, 2 resp. 5 mm/min benämns med ett index till kantbearbetningarna som t.ex. A_{0.6}, A₂ och A₅. Maximal kraft som registrerades vid brott för de tre kantbearbetningarna med standardavvikelsen visas i tabell 1.

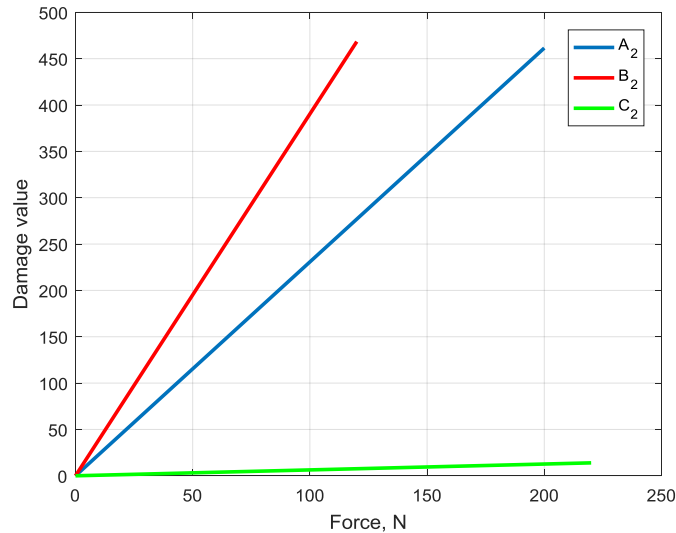
Tabell 1: Brottlast och standardavvikelse för olika kantbearbetning och belastningshastighet.

Kantbearb. och hastighet	Brottlast medelvärde (N)	Standardavvikelse för brottlast (N)	Antal prov
A _{0.6}	164.3	22.1	6
A ₂	168.1	12.7	11
A ₅	185.6	21.6	6
B _{0.6}	112.8	3.8	5
B ₂	117.2	3.7	14
B ₅	126.4	4.6	6
C _{0.6}	181.7	46.0	5
C ₂	207.5	41.0	11
C ₅	224.4	48.3	6

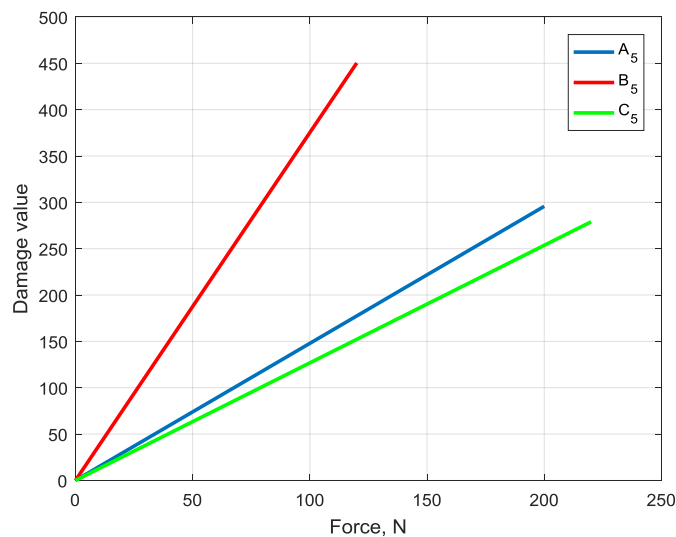
Utvärderingen av olinjäriteter i ultraljudssignalerna utfördes av programvara utvecklad av Acoustic Agree där det aktuella skadevärdet beräknades. Detta korrelerades sedan med kraft- och deformationsmätningarna från provningsmaskinen. Det uppstod en del problem med brusiga signaler, speciellt i de första provomgångarna. Dessa störningar härrörde förmodligen från provningsmaskinen, dess styrsystem, datorer och andra elektriska installationer i närheten. I figur 4 - 6 visas minstakvadratpassade linjära kurvor av skadevärdet mot kraften för alla provningar inom en grupp och hastighet.



Figur 4: Linjärt passade kurvor av skadevärde mot kraft för provningar vid hastigheten 0.6 mm/min.



Figur 5: Linjärt passade kurvor av skadevärde mot kraft för provningar vid hastigheten 2 mm/min.



Figur 6: Linjärt passade kurvor av skadevärde mot kraft för provningar vid hastigheten 5 mm/min.

I [4] visas fullständiga resultat för provningarna samt resultat från provningar vid SP glas i ett närliggande projekt. I figurerna 4-6 ovan ses att det sker en tydlig ökning av skadevärdet med ökande last, vilket var förväntat. I Tabell 1 visas att brottlasten skiljer väsentligt mellan de tre olika kantbearbetningarna. Glasen med obehandlad kant uppvisade nästan bara halva brottlasten jämfört med glasen med polerad kant. Det är också tydligt att de obehandlade glasen uppvisade lägre spridning av brottlast och därmed förmodligen har mer lika initiala sprickor. Det är också tydligt att brottlasten är lägre för glasen som belastats med lägre belastningshastighet vilket är en indikation på spänningskorrosion. De glas som fick tydligast ökning av skadevärdet under provningen var grupp B med obehandlad bruten kant. Dessa glas uppvisade också de största initiala skadorna och den lägsta hållfastheten. Glasen med polerad kant uppvisade mycket små ökning av skadevärdet. Detta är mycket intressant då dessa förmodligen har de minsta initiala sprickorna vid kanten och då kanske inte har samma spricktillväxt vid belastning. Det ska dock poängteras att ultraljudsutrustningen framförallt kalibrerades mot den obehandlade kanten.

Resultat

Även om mätningarna i projektet visade på ett tydligt samband mellan pålastningens storlek och ökande skadevärde så uppstod det flertalet frågeställningar som behöver besvaras för att kunna etablera en robust oförstörande provningsmetod för glas som kan användas industriellt. Några av dessa frågeställningar som den aktuella projektansökan kommer att undersöka listas nedan:

- Kan signalen i ultraljudsmätningarna vid samtidig pålastning i en provningsmaskin förbättras?
- Kan man istället belasta med en konstant last för att mäta spricktillväxtens bidrag till ökningen av skadevärdet?
- Går det att direkt korrelera ett skadevärde för en kalibrerad kantbearbetning till en hållfasthet och i så fall med vilken noggrannhet?
- Vad ger spricktillväxten för bidrag till ökningen av skadevärdet med ökande last?

Sammanfattningsvis behöver mer forskning bedrivas för att utveckla mätmetoden men också för att utveckla statistiska modeller för resultatanalys för att kunna implementera metoden i industrin. En annan typ av applikation är att man kan erbjuda icke-förstörande provning som en besiktningstjänst för lastbärande glas. Närmast kommer dessa resultat att presenteras för industrin och för den akademiska världen. Potentialen för kvalitetsklassning av planglas är stor vilket speglas av storleken på den globala planglasmarknaden. Världen över finns det mer än 500 float glas-linjer och ett årligt marknadsbehov på över 80 miljoner ton planglas. Även det vetenskapliga intresset är stort för kvalitetsklassning i takt med att glas har blivit alltmer intressant och använt i byggnader

Som ett resultat från projektbidraget tillsammans med annan finansiering har ytterligare projekt startats där doktorandprojektet beskrivet ovan direkt kan knytas till de ursprungliga ambitionerna i ansökan. Institutionen för Byggetvetenskaper vill rikta ett stort tack till Byggrådet för det stöd vi har fått genom detta projekt.

Artiklar och publikationer inom området

- [1] Haller, K., *Doctoral Thesis: Acoustical measurements of material nonlinearity and nonequilibrium recovery*. 2008: Dept. of Mech. Engineering, Blekinge Institute of Techn.
- [2] D. Kinsella and K. Persson, A numerical method for analysis of fracture statistics of glass and simulations of a double ring bending test, *Glass Structures & Engineering*, Vol. 3, pp 139-152, May, 2018.
- [3] D. Kinsella, J. Lindström and K. Persson, Performance of Standard Statistical Distributions for Modeling Glass Fracture. *Int. J. of Structural Glass and Advanced Materials Research*, Volume 2, Pages 178-190 pp. 178-190, 2018.
- [4] D. Kinsella, *Modelling of annealed glass fracture*, Report TVSM-3079, Lund Univ., Div. of Struct. Mech., Lund, Sweden, 2018.
- [5] Karlsson, S. et al. *Kvalitetshöjning av planglas : Icke-förstörande provning av glasets hållfasthet*. 2018. Report available at: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-35553>