

Het beheersen van druk- en trekspanning

In dit derde artikel uit de serie over koud gebogen glas gaat Tjibbe van der Werff van BRS Building Systems in op de techniek van het buigen van voorgespannen glas. Welke spanningen ontstaan in het materiaal en hoe zijn die te beheersen? De vorige twee artikelen, respectievelijk verschenen in juli en oktober 2011, behandelden de ontwikkeling en geschiedenis van het koud buigen. Van enkel naar gelaagd, isolatie- en triple glas zijn stap voor stap grenzen verlegd.



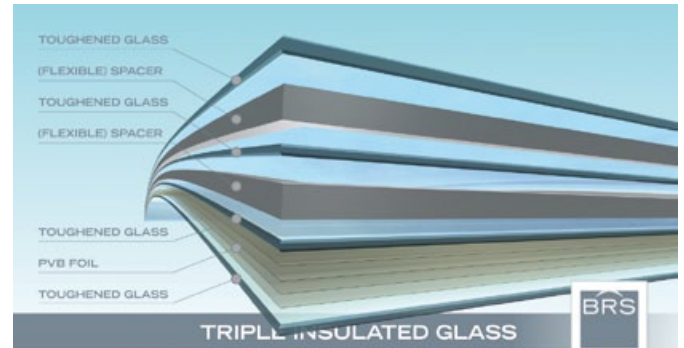
Glazen cilinder (mijnschacht) voor CBS te Heerlen met een doorsnede van 4 en een hoogte van 15 meter opgebouwd uit 10 stalen ringen die onderling worden verbonden door trekstangen. De glazen mijnschacht hangt aan de staalconstructie van het glasdak. Aan de onderzijde worden de ringen schuivend verbonden aan de betonvloer. De ruimte tussen de stalen ringen is van warm gebogen gelaagd veiligheidsglas (8.6.4). De PET folie tussen de glasplaten is voorzien van een print. Het glasdak bestaat uit koud gebogen isolatieglas. Het ontwerp is van Meyer en Van Schooten. Foto: BRS

Het principe van koud buigen van vlakke materialen is op zich een bekende toepassing in de industrie. Denk aan het buigen van stalen, plastic of multiplex platen. Glas is in eerste instantie niet het meest voor de hand liggende materiaal om koud te buigen. De algemene perceptie van glas is dat het bros materiaal is. Dat is op zich juist, glas kan maar een beperkte trekspanning opnemen waarna de breuk intreedt. In dat opzicht lijkt glas een beetje op beton.

Minuscule scheurtjes

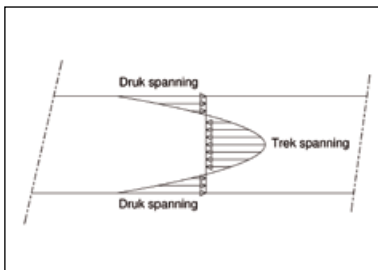
De brosheid van glas komt door de aanwezigheid van minuscule scheurtjes in het glas die ontstaan tijdens de floatglasproductie. Door deze zogenaamde 'micro cracks' in het glas ontstaat kerfwerking waardoor gewoon floatglas zo snel breekt. Tijdens het harden wordt er in het glas een voorspanning aangebracht: het glas wordt eerst opgewarmd en vervolgens versneld gekoeld door enkele seconden koude lucht op het glas te blazen. Hierna is de buitenhuid van het glas afgekoeld terwijl de binnenkern geleidelijker afkoelt. Gevolg is dat de binnenkern langzaam krimpt en de buitenhuid in elkaar wordt gedrukt.

< **De Kroon is een woontoren met winkel- en kantoorruimte gelegen tussen het Centraal Station en het Spui in Den Haag. Architectenbureau Rapp+Rapp liet zich inspireren door de hoogbouwtypologie van het eind 18e en begin 19e eeuwse Chicago. Het atrium heeft een dubbelgekromde staalconstructie van kokerprofielen waarin isolatiepanelen van koudgebogen glas gemonteerd zijn. De glaspanelen hebben een afmeting van 1,80 meter in het vierkant. Het afschot varieert op een vloeiende manier terwijl de dakrand hetzelfde niveau heeft. Dit is alleen mogelijk door de rechthoekige panelen koud te buigen en torderen. Foto: BRS**



De opbouw van triple koud gebogen glas.

Hierdoor ontstaat drukspanning in de buitenhuid en trekspanning in de kern. In afbeelding 1 is het spanningsdiagram weergegeven van een doorsnede van een voorgespannen glasplaat.

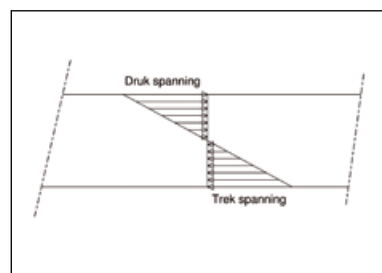
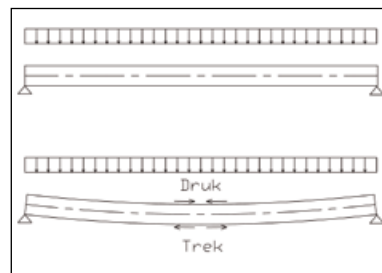


Afbeelding 1. Spanningsdiagram van een doorsnede van een voorgespannen glasplaat.

Het principe lijkt een beetje op een stapeltje Lego blokjes. Lego blokjes op zich zijn voldoende sterk maar de verbinding onderling stelt weinig voor. De verbinding is voor te stellen als de microcracks. Wanneer een elastiek om de blokjes wordt aangebracht worden de blokjes al het ware op elkaar gedrukt. Het aanbrengen van het elastiek is te vergelijken met wat gebeurt tijdens het harden van glas. Er wordt een voorspanning aangebracht in het glas. Daarom is 'voorgespannen glas' een veel betere term dan 'gehard glas'.

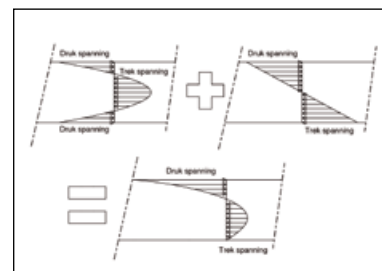
Druk- en trekspanning

De volgende stap om het principe van koud buigen te begrijpen heeft te maken met mechanica. Bij het buigen van een balk ontstaat aan de holle zijde van de balk druk en aan de bolle zijde trek. Hoe meer we buigen hoe groter de druk- en trekspanning worden. In afbeelding 2a en 2b is het spanningsdiagram te zien dat ontstaat wanneer een object gebogen is.



Afbeelding 2a en 2b. Bij het buigen van een balk ontstaat aan de holle zijde van de balk druk en aan de bolle trek.

Bij het koud buigen van glas worden spanningsdiagrammen gecombineerd. In de mechanica noemen we dit superpositie. Aan de holle zijde wordt de aanwezige drukspanning in het glas alleen maar groter omdat de buigdrukspanning erbij wordt opgeteld. Aan de bolle zijde wordt de aanwezige drukspanning minder omdat er buigtrekspanning van wordt afgetrokken. De grens van het koud buigen wordt bereikt wanneer alle buigtrekspanning groter wordt dan de aanwezige voordrukspanning. Immers glas kan net als beton maar een klein beetje trekspanning aan. Afbeelding 3 legt deze optelsom uit.



Afbeelding 3. Bij het koud buigen van glas worden spanningsdiagrammen gecombineerd.

De voorspanning die in het glas zit als gevolg van het harden is dus bepalend voor het berekenen van de maximale buigradius. Deze voorspanning is

Op basis van praktijkervaringen heeft BRS Building Systems een tabel als leidraad opgesteld.

	Advies buigstraal (m)	Buigstraal in overleg (m)
Gelaagd glas		
44.2	> 5	> 3,5
55.2	> 6	> 4,5
66.2	> 7,5	> 5
88.2	> 9,5	> 6,5
1010.2	> 12	> 8
Isolatieglas		
6(15)44.2	> 14	> 10
6(15)44.2	> 18	> 14
10(15)55.2	> 22	> 18
Triple isolatieglas		
6(15)4(15)44.2	> 14	> 10
8(15)4(15)44.2	> 18	> 14
10(15)4(15)55.2	> 22	> 18

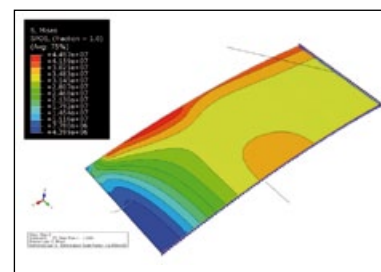
afhankelijk van de basiskwaliteit van floatglas maar ook van welke hardingsoven gebruikt wordt. De vorm van de panelen is eveneens bepalend en dat geldt ook voor de aanwezigheid van bijvoorbeeld een zeefdruk. De grote variatie die kan optreden is in de geldende normen teruggebracht naar een veilige rekenspanning. Hierbij worden ook de effecten van veroudering meegenomen.

Lokale spanningspieken

Het principe van superpositie van twee spanningsdiagrammen is een eerste

stap voor het begrip van koud buigen. Het blijkt echter dat de spanningen langs de randen waar het glas wordt opgelegd maatgevend zijn. Die spanningen zijn namelijk hoger. Er zijn geen eenvoudige rekenregels beschikbaar om dit te kunnen bepalen. Meerdere partijen hebben de afgelopen tien jaar geïnvesteerd in onderzoek naar de juiste rekenmethodes. Daarnaast zijn proeven gedaan om de berekeningen te toetsen met de werkelijkheid. Op basis daarvan is hoogwaardige rekensoftware ontwikkeld. De computerberekeningen worden volgens de Eindige Elementen Methode (E.E.M.) uitgevoerd. Hierbij wordt een vereenvoudigd model van de werkelijkheid gemaakt. De glasplaat wordt gesimuleerd door zeer veel kleine elementjes met elkaar te verbinden. Deze methode

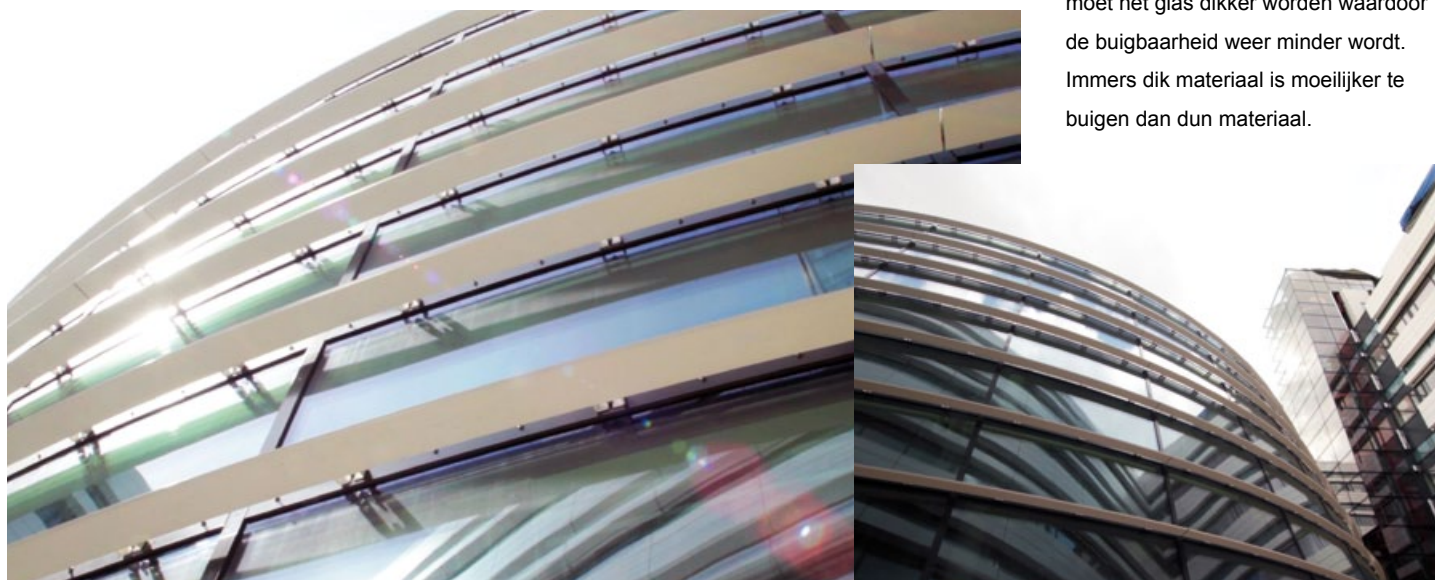
maakt duidelijk dat de krachten plaatselijk pieken vertonen. In afbeelding 4 is een voorbeeld te zien waarbij de kleuren aangeven waar de spanning maximaal is.



Afbeelding 4. Spanningspieken in het glas.

Het is dus nodig om naast een globale berekening de ruit in een simulatie te analyseren om de maximale piekspanningen te bepalen. Daarbij zullen de verschillende externe krachten die op de glasplaat komen ook nog moeten worden toegevoegd. Denk hierbij aan winddruk en zuiging, sneeuwbelasting en de belasting van personen die het glas incidenteel betreden. Deze incidentele belasting blijkt vaak de maatgevende situatie om de dikte van het glas te bepalen. Door de puntbelasting moet het glas dikker worden waardoor de buigbaarheid weer minder wordt. Immers dik materiaal is moeilijker te buigen dan dun materiaal.

In samenwerking met architectenbureau Kraaijvanger is door BRS een bijzondere gebogen glazen gevel ontwikkeld voor de kegelvormige entreehal van het Provinciehuis van Noord-Holland in Haarlem. De vorm van de gevel is een taps toelopende kegel. De ruiten worden als het ware om de kegel heen gevouwen door deze koud in het werk te buigen. Dit betekent dat de ruiten aan de onder en bovenzijde een andere straal hebben. Gehard triple isolatieglas 6(14argon)4(14argon)44.2, ruitafmetingen ca. 1 x 2 meter, taps toelappend, buigstraal 10 tot 13 meter, hellingshoek 76 graden, zonwerende beglazing 60/34, Ug = 0,7 W/m².K. Foto's: BRS



Lamineren

Koud gebogen glas wordt in principe altijd toegepast als gelaagd glas. Dit gebeurt vanwege de extra veiligheid, maar tevens omdat twee lagen dun glas verder te buigen zijn dan een enkele glasplaat van dezelfde dikte. Het is een voorwaarde dat tijdens het buigen, wanneer de glasplaten over elkaar heen schuiven, de folie meegeeft. Door het lamineren treedt er een ander belangrijk effect op: de folie zal door het buigen geleidelijk kruip en relaxatie vertonen. Hierdoor zijn relatief krappe buigstralen haalbaar, maar is tegelijkertijd de berekening veel complexer geworden. De kruip- en relaxatie-effecten zijn namelijk afhankelijk van de zachtheid van de gebruikte folie en van de temperatuur op het moment van buigen. Bovendien is het een effect dat sterk tijdafhankelijk is. Door het lamineren is het glas dus veel veiliger geworden en veel beter te buigen, maar de berekening van de buigstraal is nog meer een specialisme geworden.

De minimale buigstraal van koud gebogen glas is lastig in een tabel te vangen omdat het van vele factoren afhankelijk is: de glasdikte, de booglengte en breedte van het glas, de zachtheid van de folie en de buitentemperatuur op het moment van buigen. Bovendien betreft het enkel-, gelaagd-, isolatie- of triple glas, is het een gevel- of dakconstructie, is er stoot-, dan wel valbelasting van toepassing? BRS hanteert op basis van ervaringen uit de praktijk bijgaande tabel. De relatief grote marge tussen de geadviseerde en mogelijke buigstraal geeft aan dat er aan het koud buigen van glas nog flink gerekend moet worden en er afhankelijk van de situatie grote verschillen zijn in haalbare buigstraal. <

De Kroon te Den Haag. Foto: BRS

