

*Memorandum***Aan**

Waterschap Limburg, Kees Dorst

Van

Ir. M.B.M. Haarman, prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen, ir. J.W.M. Bovend'Eerd

Onderwerp

Werkwijze ontwerp glazen kering op dijklichaam (V02)

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

100350269/BTJ/stl

1. Inleiding

Bij het verhogen van een aantal dijkconstructies in Limburg wordt gekeken naar de mogelijkheden om een glazen kering te gebruiken bovenop een dijklichaam.

Aan TNO is door het Waterschap Limburg gevraagd om een eenduidige ontwerpmethode voor te stellen die door constructeurs in de praktijk gebruikt kan worden, en daar waar nog onvoldoende kennis is, redelijkerwijs conservatieve keuzes te maken.

Aanvullend daarop is TNO gevraagd de benodigde vervolgstappen te beschrijven welke uitgevoerd kunnen worden om tot een scherpere ontwerpmethode te komen.

In dit memo wordt ingegaan op zowel de berekening van de belastingen als de berekening van de sterkte van de glazen waterkering onder watergerelateerde belasting bestaande uit hoogwaterbelasting, golfbelasting en belastingen door drijvende objecten.

Aan TNO is een memo van het Adviesteam Dijkontwerp [1] ter beschikking gesteld; in onderstaande tekst heeft TNO diverse relevante passages uit dat memo overgenomen.

2. Uitgangspunten

Bij het ontwikkelen van een verificatiemethode voor glazen waterkeringen is TNO (in navolging van het Adviesteam Dijkontwerp) uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

1. Aansluiten bij de WOWK in zoverre dit mogelijk is. Aansluiten bij de POV langsconstructies is minder van toepassing omdat de glazen kering doorgaans niet wordt aangelegd voor stabiliteitsverhoging van de dijk.
2. Aansluiten bij de NEN 2608:2014 nl. NEN 2608 geeft de eisen en bepalingmethode van het draagvermogen en de vervormingen van overwegend statisch belast natronkalkvlakglas. Deze norm bevat rekenregels voor gelaagd glas en (thermisch) voorgespannen glas, zoals dat ook in de Deltagoot [4] is beproefd.

Datum
16 augustus 2023

Onze referentie
10050269/BTJ/stl

Blad
2/9

3. Uitgaan van de Waterwet bij de verificatie van het hoogwaterkerend vermogen dat wil zeggen de beoordeling van alle situaties die overstromingen moeten voorkomen. In maart 2021 is het Bouwbesluit gewijzigd om een dubbele verificatie (op basis van Waterwet en Bouwbesluit) niet langer nodig te laten zijn. Middels het wijzigingsbesluit Staatsblad 2021, 147 is het volgende artikel ingevoegd: “*Artikel 2.10a (waterkerende bouwwerken)*”

De paragrafen 3.2.1, 4.2.1 en artikel 5.9 zijn niet van toepassing voor zover de eisen betrekking hebben op de mate van waterkerendheid van het bouwwerk of een onderdeel daarvan.”

Dit betekent dat een uitwerking van een verificatiemethode langs de lijnen van het Bouwbesluit, althans voor wat betreft de hoogwaterkerendheid, niet nodig is. Hoogwaterkerend betekent ook hier: bij de beoordeling van alle situaties die overstromingen moeten voorkomen. De WOWK (groene versie) is op dit punt nog niet geactualiseerd maar dit zal ongetwijfeld volgen. In dit memo wat juist gaat over de overstromingsveiligheid wordt daarom geen eis vanuit het Bouwbesluit in rekening gebracht.

3. Normering en betrouwbaarheidseis

De WOWK geeft in hoofdstuk 2.6 betrouwbaarheidseisen op het niveau van constructie-onderdelen voor puntconstructies.

$$P_{eis,kw} = \frac{P_{eis}}{N} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N}$$

Waarin:

$P_{eis,kw}$	Faalkanseis voor het beschouwde faalmechanisme voor een individueel kunstwerk per jaar [-]
P_{eis}	Faalkanseis voor het beschouwde faalmechanisme op trajectniveau per jaar [-]
P_{max}	Maximaal toelaatbare overstromingskans van het dijktraject (in de wet aangeduid als ondergrens) per jaar [-]
ω	Faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme [-]
N	Lengte-effectfactor voor het beschouwde faalmechanisme

Voor constructief falen geeft paragraaf 7.7.1. van WOWK nadere invulling aan de betrouwbaarheidseis:

$$P_{eis,kw,CON} = \frac{P_{max} \cdot \omega_{CON} \cdot c}{N_{dsn}}$$

met als extra parameter:

c	Correctiefactor voor de correlatie tussen constructief falen en falen door overloop/overslag.
-----	---

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

3/9

Opmerking: deze correctiefactor c is nog niet opgenomen in de schematiseringshandleiding bij het WBI. Aangezien de correlatie tussen constructiefalen en falen door overloop/overslag een fysische realiteit zijn dient daarom ook bij een beoordeling daarmee rekening gehouden te worden. Op pag. 18 van de schematiseringshandleiding voor sterkte en stabiliteit kunstwerken staat een voetnoot waarin staat:

"Belangrijk is te constateren dat bij het afleiden van de faalkanseis voor STKW in de WOWK rekening is gehouden met correlatie in falen tussen HTKW en STKW. In het WBI2017 wordt hier geen rekening mee gehouden, wat ertoe leidt dat STKW een strengere beoordelingseis heeft dan feitelijk benodigd. Het gevolg is dat volgens WBI2017 een kunstwerk sterk genoeg moet zijn om waterstanden en golven te kunnen keren waarbij al lang sprake kan zijn van falen t.g.v. HTKW. Deze werkwijze resulteert niet in een efficiënt ontwerp, zodat in de WOWK (ontwerpdocument) hier rekening mee is gehouden bij het bepalen van de faalkanseis voor STKW. Na 2023 zal in het WBI deze werkwijze worden overgenomen."

Voor constructieonderdelen van glazen keringen zijn de eisen vanuit paragraaf 7.7.1. van WOWK niet zondermeer passend. Er is sprake van o.a. een ander lengte-effect omdat glazen keringen geen puntconstructies in de dijk maar langsconstructies op de dijk zijn.

In TNO rapport 'Ontwerputgangspunten glazen waterkering voor Waterschap Limburg' [2] is voor een casestudy de waarde $N=14$ afgeleid voor 100 panelen. In onderhavig memo wordt echter gestreefd naar een algemeen geldende procedure.

Voor een overstromingskansnorm van bijvoorbeeld 1/1000 volgt bij $N=3$ (WOWK):

$$P_{eis,kw,CON} = \frac{1/1000 \cdot 0,02 \cdot 4}{3} = 2,67 \cdot 10^{-5}; \beta=4,0$$

Bij $N=14$ (TNO casestudy) geldt:

$$P_{eis,kw,CON} = \frac{1/1000 \cdot 0,02 \cdot 4}{14} = 5,71 \cdot 10^{-6}; \beta=4,4$$

Dit betekent dus in dat het geval van een verhoging van de lengte-effectfactor, de betrouwbaarheidsindex verhoogt met 10%. Bij andere overstromingskansnormen worden orde van grootte vergelijkbare resultaten gevonden.

In CUR publicatie 166, in Bijlage A van de ROK2.0. en in de oude Leidraad Kunstwerken wordt geadviseerd om de vereiste betrouwbaarheidsindex voor een puntconstructie met 10% te verhogen bij verificaties van langsconstructies. Dit is in lijn met het bovenstaande.

Samenvattend wordt daarom geadviseerd:

Betrouwbaarheidsindex:

Gebruik de procedure uit hoofdstuk 7 van de WOWK en vergroot de aldus verkregen betrouwbaarheidsindex met 10%.

4. Reguliere belastingen op de glazen waterkering

4.1 Hydraulische belasting

Aanbevolen wordt om vast te houden aan de gekalibreerde relatie tussen de vereiste betrouwbaarheid en de overschrijdingskans van de hydraulische belasting (waterstand en golfdruk) uit de eerdere kalibratiestudie van TNO voor kunstwerken van staal en beton [3] als achtergrond bij de WOWK.

Aanbevolen wordt daarmee de WOWK te gebruiken om op basis van $P_{eis,kw,CON}$ de overschrijdingskans van de rekenwaarde van de hoogwaterbelasting vast te stellen. Hiertoe dient Fig. 37 van de WOWK afgelezen te worden. Deze rekenwaarde van de hoogwaterbelasting hoeft niet meer te worden vergroot door middel van belastingfactoren. Uitgangspunt is ook dat de modelonzekerheid is verdisconteerd in de rekenwaarde (in lijn met de WOWK).

4.2 Stootbelasting

Tijdens hoogwatersituaties is vaak drijfvuil aanwezig. Botsing van drijfvuil tegen de glazen waterkering dient daarom meegenomen te worden als belasting.

Ten behoeve van het definitief ontwerp van de glazen kering bij Neer is er in de Deltagoot onderzoek [4] gedaan met een boomstam van 815 kg die meerdere malen en onder verschillende condities tegen de glazen kering is gebeukt. De boomstam is door het Waterschap Limburg gekozen als representatief voor het maximale gewicht van drijfvuil voor een hoogwatersituatie.

De stootbelasting wordt niet alleen bepaald door de massa van de boomstam, maar ook door de botssnelheid, de hoek van inval en het contactoppervlak. Hier wordt voorgesteld te werken met pragmatische gekozen bovengrenswaarden. Voor de botssnelheid dient de langsstroomsnelheid van het water gebruikt te worden, een redelijke bovengrenswaarde is hier 3 m/s langs de oever. Voor de inval dient de loodrechte hoek van inval gebruikt te worden (dit is de meest conservatieve benadering). Voor het contactoppervlak dient 80 x 80 mm² gebruikt te worden (in [4] was het raakoppervlak 7100 mm² dit is hier afgerond naar 80 x 80 mm²).

Gelet op de bovenstaande alinea voorgestelde waarden, is het niet onredelijk de aldus afgeleide stootbelasting te zien als een conservatief geschatte waarde; daarom is een belastingfactor niet nodig.

Omdat de stootbelasting statistisch afhankelijk is van de afvoer en daarmee van de waterstand, wordt aanbevolen om de resulterende stootbelasting te combineren met de rekenwaarde van de hydraulische belasting (zie paragraaf 4.1) in één enkele belastingcombinatie met combinatiefactor $\psi=1,0$.

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

4/9

Opmerking: zeer lokaal zou er sprake kunnen van een hogere belasting bij bijvoorbeeld het slaan tegen het glas met een heel scherp voorwerp. Deze belasting hoeft niet te zijn meegenomen; in het volgende hoofdstuk wordt namelijk voorgeschreven altijd een opofferingsruit te voorzien voor o.a. dit soort gevallen.

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

5/9

Samenvattend wordt aanbevolen voor de belasting:

Belasting:

Combineer in één belastingcombinatie met combinatiefactor $\psi=1,0$:

- de rekenwaarde van de hydraulische belasting gebaseerd op $P_{eis,kw,CON}$ en paragraaf 7.10 van de WOWK met
- een stootbelasting gebaseerd op een boom met een diameter van 400 mm, een lengte van 8 m en massa van 800 kg. Bepaal de stootbelasting met deze massa vervolgens met een botssnelheid van 3 m/s, op basis van loodrechte inval, en een contactoppervlak van 80 x 80 mm². Deze stootbelasting dient te zijn vermenigvuldigd met een belastingfactor van 1,0.

Bovenstaande aanpak voor de stootbelasting mag bij aanwezigheid van voldoende betrouwbare informatie zijn vervangen door een locatie-specifieke aanpak. Hierbij mag voor de onderdelen van de stootbelasting de volgende aanpak zijn gebruikt:

- Aanstroomsnelheid mag locatiespecifiek zijn beschouwd.
- Hoek van inval mag locatiespecifiek zijn beschouwd.
- Contactoppervlak: geadviseerd wordt terughoudend te zijn dit locatie-specifiek te optimaliseren, ook omdat er al een opofferingsplaat is voor het "absorberen" van de stoot bij hele kleine contactoppervlakken.
- Type drijfvuil mag locatiespecifiek zijn beschouwd. Dat zou ook verzwarend kunnen werken – bijv. rekening houdend met zwaardere elementen bij bijv. een element op een sluseiland en rekening houdend met meer elementen of een grotere massa (maar wellicht lagere snelheden) op plekken/in hoeken waar drijfvuil zich kan ophopen.

Voor elk van de hierboven genoemde aspecten dient dan gewerkt te worden met een gemotiveerde conservatieve waarde omdat de belastingfactor gelijk is gesteld aan 1,0.

Datum
16 augustus 2023

Onze referentie
10050269/BTJ/stl

Blad
6/9

5. Sterkte van de glazen waterkering

NEN2608:2014 geeft de basis voor het berekenen van de sterkte van het gekozen glaspakket. De norm is bedoeld voor de berekening van vlakglas in gebouwen, maar is met enige voorzichtigheid ook toe te passen in andere situaties.

De waterkering dient te worden ontworpen met gelaagd thermisch gehard glas, voorzien van een SGP-folie. In het ontwerp moet altijd voorzien worden van een opofferingsruit. Een heat-soak-test is verplicht in geval thermisch voorgespannen glas wordt toegepast; dit om de groei van defecten (vorming nikkelsulfide kristallen) te versnellen zodat ze grotendeels vóór plaatsing van het glas gedetecteerd kunnen worden.

De rekenwaarde voor de buigtreksterkte van voorgespannen glas wordt als volgt bepaald conform NEN 2608:

$$f_{mt;u;d} = \frac{k_e \times k_a \times k_{mod} \times k_{sp} \times f_{g;k}}{\gamma_{m,A}} + \frac{k_e \times k_z \times (f_{b;k} - k_{sp} \times f_{g;k})}{\gamma_{m,V}}$$

Waarin:

$f_{mt;u;d}$	De rekenwaarde van de buigtreksterkte van voorgespannen glas, in N/mm ²
k_e	Is de factor voor de randkwaliteit van de ruit, waarbij bij spanningen op de rand k_e volgens NEN 2608:2014 8.3.3(2) moet zijn toegepast. Voor de overige situaties moet $k_e = 1$ zijn toegepast;
k_a	Is de factor voor het oppervlakte-effect volgens 8.3.3(3), 8.3.3(4) en 8.3.3(5)
k_{mod}	Is de modificatiefactor afhankelijk van de belastingduur en de referentieperiode volgens 8.3.3(6) <i>Let op; in geval van gelaagd glas met een thermoplastische tussenlaag mag k_{mod} volgens bijlage G berekend te worden voor een nauwkeuriger resultaat.</i>
k_{sp}	Is de factor voor de oppervlaktestructuur van de ruit volgens 8.3.3(1)
$f_{g;k}$	Is de karakteristieke waarde van de buigtreksterkte van glas in N/mm ² waarbij $f_{g;k} = 45$ N/mm ²
$\gamma_{m,A}$	Is de materiaalfactor van glas
k_z	Is de factor voor de zonde van de ruit volgens 8.3.3(7)
$f_{b;k}$	Is de karakteristieke waarde van de buigtreksterkte van glas volgens tabel 2 in N/mm ²
$\gamma_{m,V}$	Is de materiaalfactor van de voorspanning van voorgespannen glas, waarbij $\gamma_{m,V} = 1,2$

In de afleiding van de onderhavige rekenregels baseert TNO zich o.a. op de WOWK; echter daarin heeft TNO rekening worden gehouden met het feit dat de onzekerheid ten aanzien van de breuksterkte van glas relatief groot is [2]. Dit zorgt voor een andere verhouding tussen het relatieve belang van de onzekerheid ten

aanzien van de belasting en de onzekerheid ten aanzien van de sterkte bij een waterkering van glas dan bij een waterkering van beton of staal. Dit verschil zou een bijstelling van de rekenwaarden volgens de WOWK noodzakelijk maken. Om dit te voorkomen wordt een conservatieve aanpak voorgesteld.

De NEN 2608: 2014 geeft een materiaalfactor van $\gamma_{m,A} = 1,6$ voor situaties waarbij de wind of isochore druk de overheersende veranderlijke belasting is en $\gamma_{m,A} = 1,8$ voor overige situaties. Het is op dit moment niet geheel duidelijk of de achtergronden bij de NEN 2608 passen bij de achtergronden van de WOWK; daarom wordt voorlopig voorgesteld de materiaalfactor met een factor 1,2¹ te vergroten bij de verificatie van de hoogwaterveiligheid; dit levert een materiaalfactor van $\gamma_{m,A} = 2,2$.

Aanscherping van deze waarde is waarschijnlijk mogelijk. Hiertoe kan een case-specifieke kalibratiestudie worden uitgevoerd conform TNO rapporten [2] en [3].

Samenvattend:

Sterkte:

Gebruik NEN 2608. Ontwerp met gelaagd thermisch gehard glas, voorzien van een SGP-folie. Voer de verificatieberekening uit met $\gamma_{m,A} = 2,2$. Bij gebruik van voorgespannen glas is $\gamma_{m,V} = 1,2$ voorgeschreven.

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

7/9

¹ Bij gebruik van een lognormale verdeling van de sterkte en een grote variatiecoëfficiënt bevindt zich de rekenwaarde ver in de linkerstaart van de verdeling. Een kleine aanpassing van de rekenwaarde levert al snel extra veiligheid op, daarom is conservatief om een vermenigvuldigingsfactor van 1,2 voor $\gamma_{m,A} = 1,8$ te gebruiken.

6. Overige ontwerpaspecten constructieve veiligheid

Ten aanzien van de constructieve veiligheid verdienen ook andere aspecten nadrukkelijk aandacht, zoals:

1. Overige belastingen.

Naast de hydraulische belasting en de stootbelasting door drijfvuil moeten mogelijk nog andere belastingen worden beschouwd bij het ontwerp. Voor een overzicht van bijzondere belastingen wordt verwezen naar de WOWK.

2. Kritieke details: oplegging/aansluitconstructie en fundering

Een glazen paneel zal krachten moeten afdragen naar de constructie en fundering. Aanbevolen wordt om aandacht te besteden aan het ontwerp van hier mogelijk kritieke details. Het ENW heeft in eerdere adviezen ook gewezen op de dimensionering van de rubberen afwerklijst tussen het stalen frame en het glas in verband met eventuele punt-, lijn- of stootlasten door het stalen frame en toleranties in de montage [5,6]. Ook zal rekening moeten worden gehouden met de vervormingen van de (stalen) stijlen en het daardoor ontstaan van wringmomenten in de hoeken van de glasplaten; deze vervormingen kunnen mogelijk een grens stellen aan de te gebruiken hoogte van de glazen kering.

Noot: NEN 2608 geeft vormfactoren (afhankelijk van de vorm en oplegging van de ruit) welke van invloed zijn op de mate van samenwerking tussen de glasplaten van gelaagd glas.

3. Vandalisme

Ten aanzien van de beperking van de kwetsbaarheid van de glaspanelen voor vandalisme kan aansluiting worden gezocht op NEN-EN 356:1999 (Glas in gebouwen - Beveiligingsbeglazing - Beproeving en classificatie van de weerstand tegen manuele aanval).

4. Onderhoud

De glazen platen dienen periodiek gecontroleerd moeten worden op delaminatie/onthechting; dit proces start normaliter aan de randen van de plaat door weersinvloeden en kan aanleiding zijn voor het vervangen van panelen.

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

8/9

Referenties

[1] Adviesteam Dijkontwerp, AD224-v1. Advies t.a.v. ontwikkelen ontwerpverificatie glazen waterkering Maasdal.

[2] TNO (2020), Ontwerpuitgangspunten glazen waterkering voor Waterschap Limburg.

[3] TNO (2017). Kalibratie toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting voor RBK-NAT. TNO-rapport 2017 R10778. Juni 2017.

[4] Deltares (2020). Praktijkproeven op glaswand in waterkering van Neer en golfoverslagproeven – uitgevoerd in Deltagoot. 28 april 2020; 11202954-002-HYE-0007.

[5] ENW, 18 juli 2016, Advies Glas als waterkerend element, brief kenmerk ENW-16-08.

[6] ENW, 25 mei 2020, Advies Glas als waterkerend element, brief nummer 20-04

Datum

16 augustus 2023

Onze referentie

10050269/BTJ/stl

Blad

9/9