

04112 226

BOUWEN MET

vakblad over staal en staalconstructies

STAAL



| Overkapping IJsei, Amsterdam |



Movares

adviseurs & ingenieurs

Movares Nederland B.V. | Leidseveer 10 | Postbus 2855 | 3500 GW Utrecht | T: 030-265 5555 |
E: info@movares.nl | movares.nl | Contactpersoon: László Vákár T: 030-265 5156

04112 226

BOUWEN MET

vakblad over staal en staalconstructies

STAAL



Foto: Teo Krijsman

26 | OVERKAPPING IJSEL, AMSTERDAM

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 26 | (1) OPDRACHT & ARCHITECTUUR
A-M-S-T-E-R-D-A-M
S. Lechner en J. Vos | 40 | (4) BRAND
'Brandhangendheid' cruciaal voor glaskap
L.I. Vákár, H.D.M. Kool en J.C. van Wolfswinkel |
| 28 | (2) CONSTRUCTIE
Koudbuigen op stalen bogen
L.I. Vákár, J.C. van Wolfswinkel en H.J. van Lint | 44 | (5) VERBINDINGEN
Besparen op injectiebouten
H.J. van Lint, J.C. van Wolfswinkel en A.M. Gresnigt |
| 38 | (3) WIND
Bij vlagen windgevoelig
L.I. Vákár, J.C. van Wolfswinkel en G.M. van Uffelen | 48 | (6) UITVOERING
Bouwen op afspraak
B.H. Hesselink, H.J. van Lint en D. Markwat |

OVERKAPPING BUSPLATFORM IJSEI, AMSTERDAM

Onder de bogen



Onder de bogen van het nieuwe busstation aan de IJ-zijde van het Centraal Station in Amsterdam stapelt zich verkeer en logistiek. Voor de overkapping van project IJsei (voluit: IJ-zijde stationseiland) komen constructie en bouwmethodiek samen. De kap is bijzonder om zijn grootschalige toepassing van

koudbuigbaar glas op een economisch ontworpen, relatieve slappe staalconstructie, waaraan een uitgebreid ontwerptraject en onderzoek vooraf ging. De bogen kunnen een forse vervorming opnemen, de kap tolereert windvlagen en de glasoplegging staat beweging toe. Tegelijk komen de glas-

panelen in geval van brand niet naar beneden. De uitvoering luistert nauw: aanvoer domineert de ploegendiensten. Overkapping IJsei is de vierde kap op rij en zet ingenieurstraditie voort.



Station Amsterdam Centraal ondergaat een metamorfose.

S. Lechner

Stijn Lechner is senior projectmanager bij Dienst Infrastructuur, Verkeer en Vervoer gemeente Amsterdam.

Aan de IJ-zijde van Amsterdam Centraal is dit vanaf april goed zichtbaar door de overkapping van het busstation dat onderdeel is van het project IJsei (IJ-zijde stationseiland). Na de bouw van de autotunnel en het busstation is in 2011 begonnen met de bouw van de overkapping.

Overkapping IJsei maakt onderdeel uit van een groot verkeersknooppunt aan de IJ-zijde van station Amsterdam Centraal. In 2013 gaat de Michiel de Ruijtertunnel open, waardoor het autoverkeer onder maaiveldniveau kan rijden. Dit betekent ook minder auto's aan de voorzijde en meer ruimte voor voet-

A-M-S-T-E-R-D-A-M

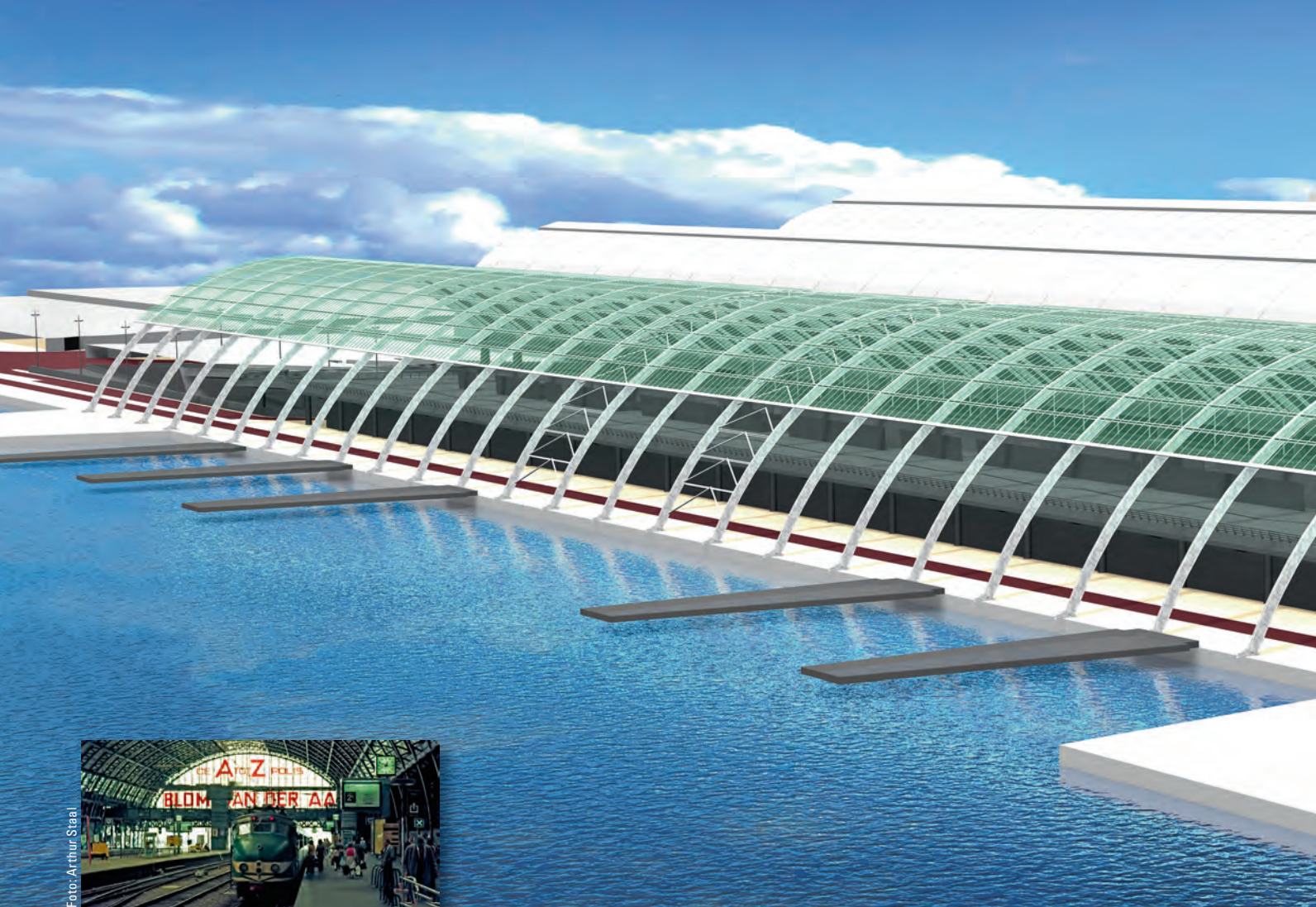


Foto: Arthur Staal

Overkapping IJsei is de vierde kap op rij van het station Amsterdam Centraal. De kap sluit in vormtaal aan op de bestaande kappen, verbindt functies op stedenbouwkundig niveau en geeft allure aan de IJ-zijde van het vernieuwde stationseiland.

ir. J. Vos

Joost Vos is architect/partner van Benthem Crouwel Architecten in Amsterdam.

De transformatie van het stationseiland tot een aangenaam en efficiënt OV-knooppunt krijgt vorm door diverse projecten. De opschoning van het Voorplein markeerde een nieuwe start. Om de situatie aan de stadzijde te verbeteren was het noodzakelijk een andere oplossing voor het bus- en autoverkeer te realiseren. Een ogenschijnlijk voor de hand liggende oplossing is gevonden aan de IJ-zijde van het CS. Door de bussen letterlijk en figuurlijk op een gelijk niveau met de treinen te plaatsen, wordt een hechter OV-knooppunt

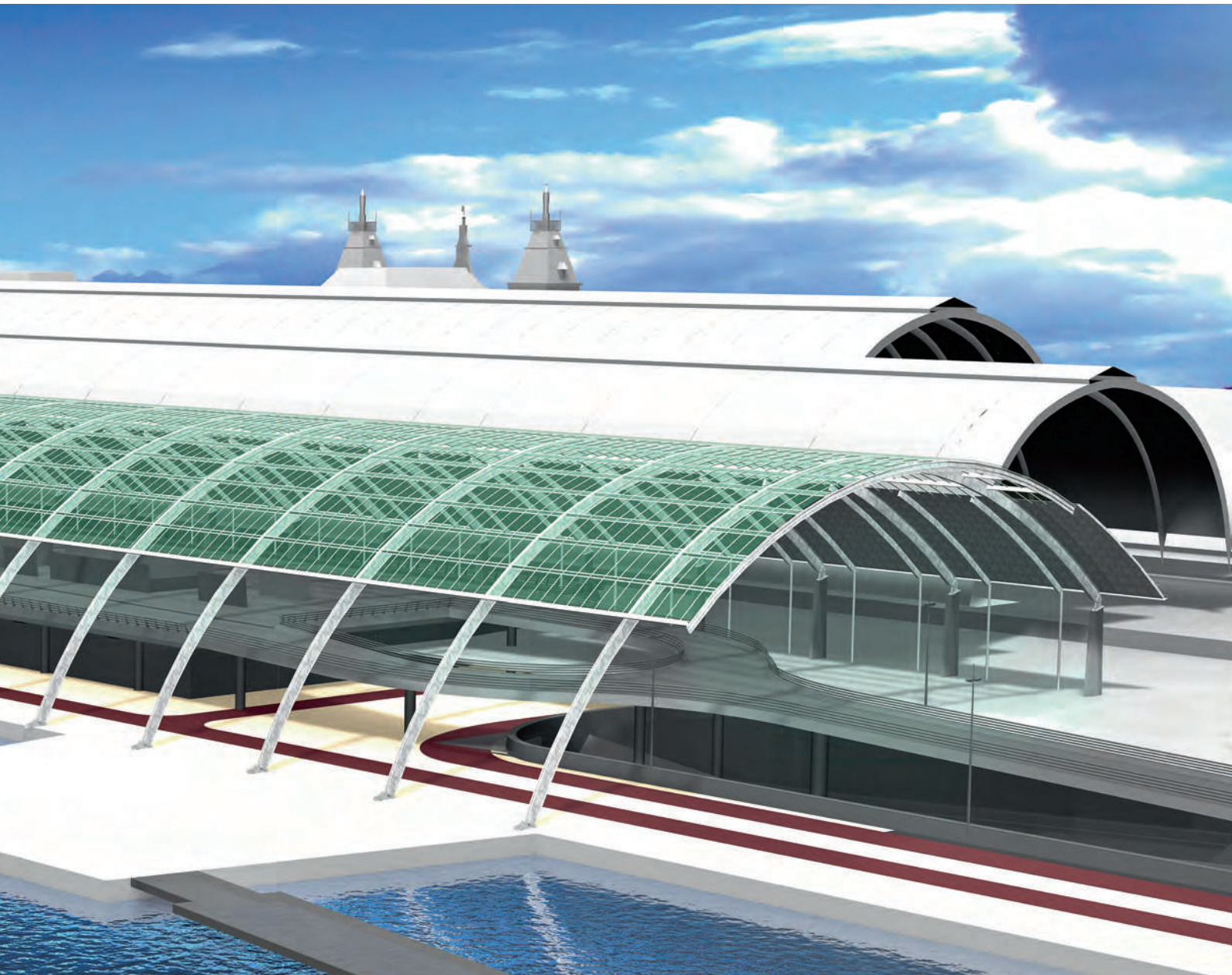
gecreëerd. Het busstation is zo een logische uitbreiding van het Centraal Station. Om het busstation op niveau +1 goed voor passagiers te ontsluiten is het noodzakelijk de De Ruijterkade aan de IJ-zijde van het CS ondergronds te brengen. Bovendien is het hierdoor mogelijk de relatie stad-station-IJ te optimaliseren. In het verlengde van de passagierstunnels onder het CS ontstaan nieuwe stationentrees en een nieuwe stationshal aan het IJ en is het mogelijk het IJ en de binnenstad verkeersvrij te verbinden. Ook maakt het waterverkeer straks

gangers. Daarnaast is door het 360 m lange busstation aan de IJ-zijde de mogelijkheid gecreëerd om alle bussen van en naar Amsterdam Centraal te combineren: niet meer versnipperd over diverse plekken, maar op één plek dicht bij de treinen. Een laatste verbetering is dat de voetgangers en

fietsers straks gemakkelijk van het CS naar de ponten van en naar stadsdeel Noord kunnen. Met de bouw van de overkapping krijgt Amsterdam een entree aan het IJ. Tegelijk wordt ook de verbinding gezocht met het stadsdeel Noord, dat jarenlang niet echt bij de stad hoorde. De bouw van de westelijke

en oostelijke kapdeel vond plaats binnen de geplande acht maanden zonder noemenswaardige overlast.

Het middendeel van Overkapping IJsei wordt afgerond na de bouw van de Noord/Zuidlijn in 2013. •



onderdeel uit van het OV-knooppunt, waarin dus (bijna) alle vervoersvormen zijn vertegenwoordigd. Overkapping IJsei is het symbool van dit vernieuwde knooppunt. De kap zal niet alleen beschutting bieden aan de wachtende busreizigers, maar ook aan de voorrijpleinen van de nieuwe stationshal, de tunnelmonden en een deel van de kade. Doordat de kap tot op de kade doorloopt, kunnen reizigers gemakkelijk overstappen tussen station en pont. Bij het ontwerp van de overkapping wordt met moderne bouwtechnieken, en het

gebruik van innovatieve materialen als koudbuigbaar glas, aangesloten op de ingenieurstraditie zoals die zichtbaar is in de bestaande kappen. De twee bestaande monumentale stoomkappen zijn beeldbepalend en kenmerkend voor het station. Dit krachtige beeld in combinatie met het beschikbare budget maakte de keuze voor de boogvorm van de nieuwe kap logisch en vanzelfsprekend. Door een groot aantal van de glasplaten te voorzien van rode en oranje doorzichtige folies is de tekst 'A-M-S-T-E-R-D-A-M' op de kap te

lezen. Met een letterhoogte van zo'n 22 m is dit element een extra herkenningspunt langs de zuidelijke oever. Daarnaast zorgt deze gekleurde belettering voor een bijzonder lichteffect onder de kap, vergelijkbaar met de voormalige reclameteksten in de kopgevels van de oude stoomkappen. In de detaillering van de kap is een combinatie gezocht tussen moderne materialen en technieken, en een vormtaal die aansluit op de bestaande kappen. Het resultaat is een krachtig samenspel tussen oud en nieuw. •

Koudbuigen op stalen bogen

In opdracht van de dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer van de gemeente Amsterdam is een grotendeels transparante overkapping voor het busstation IJsei ontworpen. Het ontwerp voor de 360 m lange droogloop met 24 bushaltes ontstaat in een nauwe samenwerking tussen de constructeur (VOF De-Ruijterkade) en architect (Bentham Crowwel Architecten) en sluit architectonisch aan op de oude stoomkappen van CS. Hamvraag is: hoe krijgt een kap de gewenste uitstraling voor ongeveer de helft van het gebruikelijke budget? De kostenreductie is primair gevonden in de constructie.

ir. L.I. Vákár, ir. J.C. van Wolfswinkel en
ir.ing. H.J. van Lint

László Vákár is consultant, Jan van Wolfswinkel is senior adviseur en Hans van Lint is senior constructeur, allen bij Movares, Utrecht.

Van meet af aan is duidelijk dat de gewenste besparing, zelfs met geavanceerde technieken, niet uitsluitend binnen de kapconstructie ligt. Daarom volgt een integrale beschouwing en wordt onderzocht hoe kleine aanpassingen aan andere constructiedelen kunnen leiden tot grote besparingen. Zo wordt besloten om de overkapping – in afwijking van eerdere gedachten, die uitgaan van vakwerkliggers- vorm te geven als boogconstructie. Daarbij landen de spanten aan op de nieuwe kistdam voor de kade en op kolommen tegen het bestaande station. Een boog leidt tot een ‘halvering’ van de overspanning voor de maatgevende momenten en dus tot grote besparingen in de constructie. Doorgaans is dit een kostbare ‘besparing’, omdat de fundering grote spatkrachten moet opnemen, maar hier is de kistdam bestand tegen horizontaalkrachten van een veel grotere orde doordat het zandlichaam richting het IJ wil verschuiven: de weerstand is ‘gratis’. Bij de zuidelijke aanlanding ligt dat anders: de spatkrachten dragen via kolommen af op het busplatform. De horizontaalkracht wordt verder via de stabiliteitschijven van het busplatform tot maaiveldniveau gebracht, maar nog niet opgevangen. Aangezien er op maaiveld echter een nieuwe betonvloer wordt gestort, kunnen de horizontaalkrachten eenvoudig via die vloer aan de nieuwe De Ruijtertunnel worden verankerd waar ze via passieve

grondruk worden opgenomen. Waarmee dus ook deze afdracht nagenoeg ‘gratis’ is.

De constructieve opbouw

De 360 m lange overkapping bestaat uit stalen boogspanten hart-op-hart 12,5 m – corresponderend met de naastgelegen overkapping uit 1925. De spanten zijn verbonden door gordingen waarop een dakhuid van grotendeels koudgebogen glas ligt. De stabiliteit van de overkapping in langsrichting wordt verzorgd door twee centrale windverbanden. In dwarsrichting verzorgen de 63 m overspannende en 22 m hoge boogspanten hun eigen stabiliteit. Bij de uitwerking van de constructie is het aantal onderdelen beperkt en is ingezet op een grote repetitie van dezelfde (onder)delen. Daarnaast zijn de profielen zo open mogelijk voor eenvoudige verbindingen op de bouw: IPE (A)-profielen voor de glasdragers, UPE-profielen voor de gordingen en de kokervormige doorsnede van de boog is zo samengesteld dat de bovenflenzen uitsteken, zodat de aannemer kan kiezen voor boutverbindingen. Uiteindelijk zijn de strippen voor de (bout)verbinding van de gordingen in de fabriek aan de spanten gelast.

Koudgebogen glas

Een cruciale besparing wordt bereikt door de toepassing van Freeformglass, een gelaagde glassoort die koudbuigbaar is. Het glas wordt in vlakke toestand op de bouwplaats aangeleverd en ter plaatse met profielsystemen op de onderconstructie gebogen en bevestigd. Het glas is lichter dan traditioneel (warm)gebogen glas (zie ook p. 34). Er komt dus minder gewicht te liggen op de constructie die zich bovendien slapper mag

gedragen – het buigbare glas kan immers de vervormingen volgen. Daarom kan de constructie lichter worden uitgevoerd. Bijkomend voordeel: het materiaalgebruik neemt af, de duurzaamheid neemt toe. Daarnaast worden er minder eisen gesteld aan de nauwkeurigheid van de fabricage: doordat het glas tegen de draagconstructie gebogen wordt, past het altijd, ook als de straal afwijkt. De kosten voor de glasdragers dalen eveneens bij een niet-gefacetteerde glasconstructie, doordat de glasdragers worden rondgewalst en uit grotere lengtes bestaan. Daardoor hoeven er minder onderdelen te worden gemonteerd. En niet bij elke knik is een verbinding nodig.

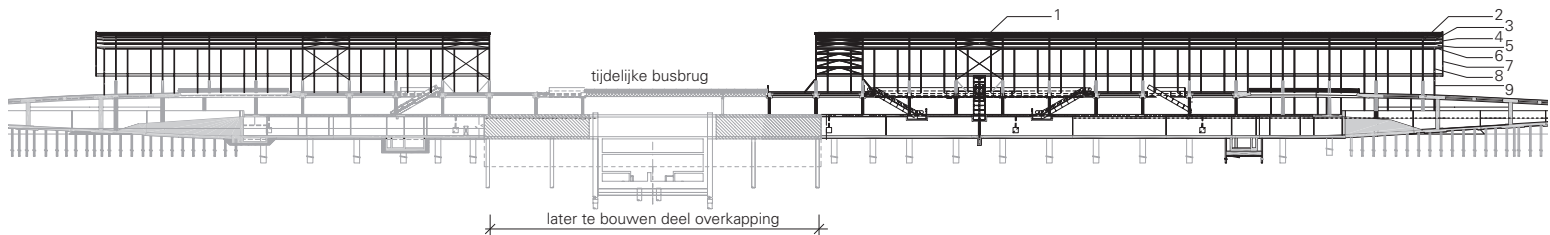
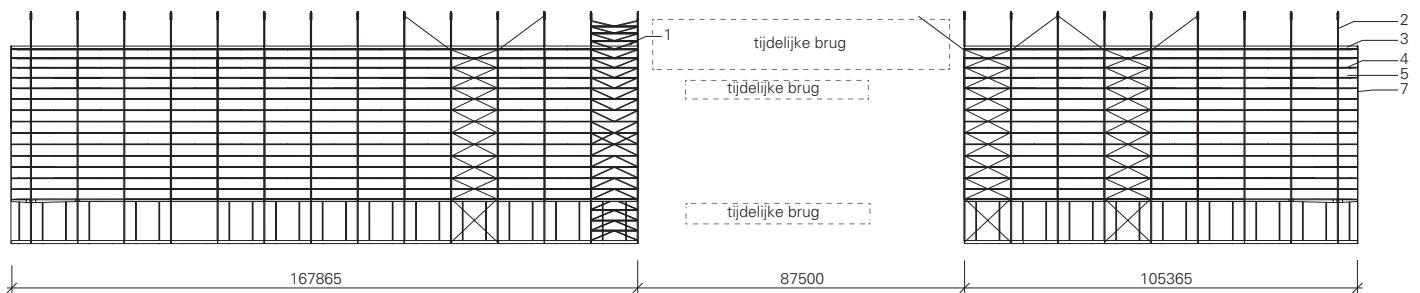
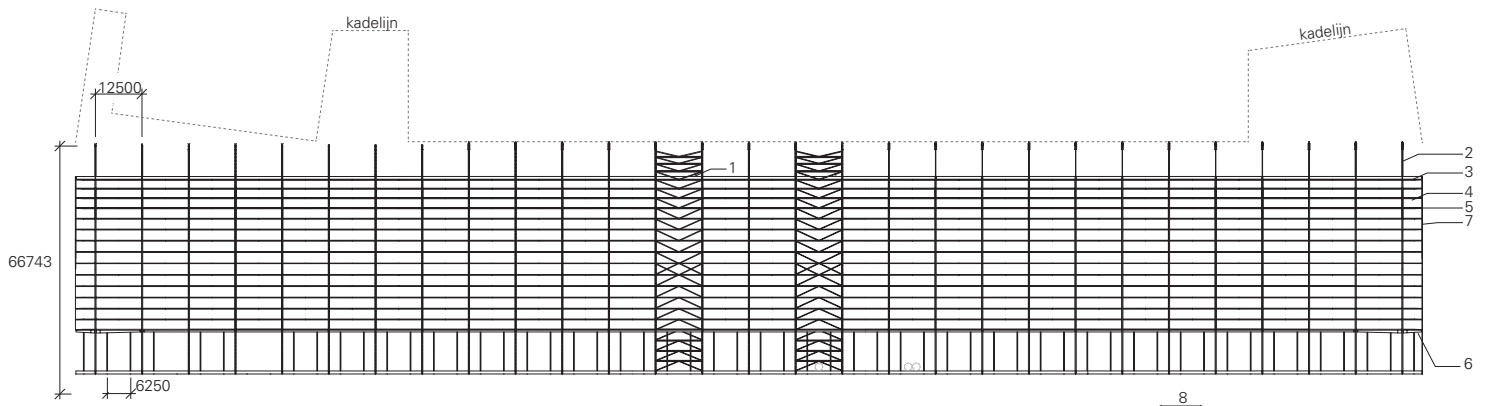
Stabiliteit, ongedilateerde kap

De stabiliteit in dwarsrichting wordt verzorgd door de boogspanten. De bogen vormen de hoofdconstructie voor de verticale belasting op de kap en dragen – juist door hun vorm – de horizontale belasting naar de fundering af. Het aantal en de posities van de windverbanden in langsrichting is afhankelijk van de dilatatie, redundantie bij calamiteiten en wensen van de architect. Vanwege kosten, uiterlijk en onderhoud is gekozen voor een ongedilateerde kap. Technisch gezien volstaat dan één windverband. Maar mocht dit verband door een calamiteit, zoals brand, vervallen, dan bezwijkt de hele kap. Daarom moeten minimaal twee verbanden op voldoende afstand van elkaar worden geplaatst. Het deel van de overkapping dat zich dan tussen de windverbanden bevindt, is horizontaal opgesloten en krijgt bij temperatuurwisselingen grote interne krachten te verduren. De optimale hart-op-hart-afstand van de verbanden is 37,5 m.

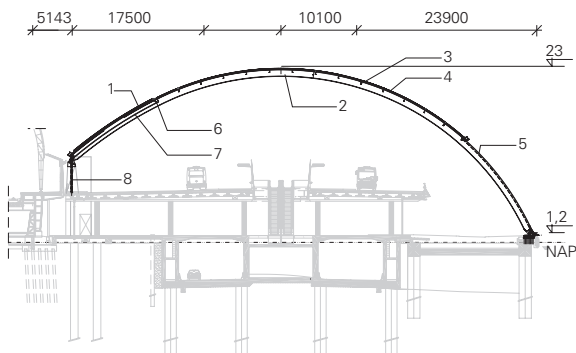


Projectgegevens

Locatie Centraal Station Amsterdam • Opdracht Gemeente Amsterdam Dienst Infrastructuur, Verkeer en Vervoer • Architectuur Benthem Crowel Architecten, Amsterdam • Constructief ontwerp kap Movares, Utrecht in VOF De-Ruijterkade-verband • Adviseur bouwfysica Peutz, Zoetermeer • Uitvoering combinatie Strukton Civiel Projecten, Maarssen en Hollandia, Capelle a/d IJssel • Glas BRS, Moerkapelle • Staalconstructie Hollandia, Capelle a/d IJssel • Geprofileerde staalpaat SAB-profiel, IJsselstein met Erdo, Capelle a/d IJssel • Gietstukken Soester Gieterij, Almere (bovenstoelen); Gieterij de Sweemer, Eeklo (B)(waterspuwers); Gieterij Boran, Başkent (TR)(onderstoelen en kleine gietstukken, pendels e.d.); Marsé, Castricum (afdekkap passtuk) • Fotografie Hollandia, Teo Krijgsmann, Jannes Linders, Movares



- 1 definitief windverband
- 2 spant samengesteld uit platen h = 900 mm
- 3 gordingen UPE 330
- 4 Freeformglass
- 5 glasprofiel IPE 140A + aluminium klemprofiel
- 6 samengestelde koker
- 7 UPE 270 (2x)
- 8 IPE 500V
- 9 pendelkolom



- 1 dicht dak
- 2 spant samengesteld uit platen h = 900 mm
- 3 gordingen UPE 330
- 4 Freeformglass
- 5 open HWA in spant
- 6 samengestelde koker
- 7 IPE 500V
- 8 pendelkolom

De bovenste tekening toont het definitieve bovenaanzicht. Daaronder de huidige situatie met tijdelijke stabiliteitsvoorzieningen. De doorsnede links onder laat goed de boogvorm zien. Rechts een detail van de geïntegreerde hwa.



De afstand tussen de verbanden, twee stramienen groot (25 m), is daarmee klein genoeg om niet te resulteren in zeer grote interne krachten door verhinderde uitzetting. Tegelijkertijd is de maat voldoende groot om te voorkomen dat beide verbanden bezwijken door bijvoorbeeld een busbrand, waarvan de omvang altijd kleiner is dan 25 m. De verbanden worden in het midden van de overkapping geplaatst zodat de kap naar de uiteinden toe vrij kan uitzetten en krimpen. Om te kunnen uitzetten zijn aan weerszijden van de boog de laatste 15 m los gehouden van het stijve dakvlak. Aan de IJ-zijde is de constructie vanaf de goot geheel open, aan de stationskant is er wel een dak. Dit vlak, uit dakplaten, draagt op liggers die aan slechts één zijde (indirect) verbonden zijn met de bogen. De achterzijde wordt gesteund door pendelkolommen. De bogen lopen onder het dakvlak door, ongekoppeld. Hierdoor kunnen de bogen en het dakvlak vrij van elkaar vervormen. De boog heeft over zijn zwakke as een geringe stijfheid. Dat zorgt ervoor dat de kap eenvoudig uit kan zetten zonder hoge interne krachten op te bouwen mede dankzij de 15 m vrije lengte aan beide uiteinden. De uitzetting, aan beide einden ± 10 cm, veroorzaakt buiging in het spant maar door de geringe stijfheid blijft het moment binnen de marges. De overkapping wordt vanwege de aanleg van de Noord/Zuidlijn in twee fasen opgebouwd. Eerst worden het westelijk en oostelijk deel van de overkapping gebouwd, terwijl het middenstuk boven de Noord/Zuidlijn pas tijdens fase II aan de beurt komt. De fasering heeft consequenties voor de stabiliteit in langsrichting. Eén van de windverbanden die in de eindsituatie de stabiliteit verzorgt, is in fase I nog niet aanwezig en één van de dakdelen heeft zelfs helemaal geen definitieve verbanden. Daarom worden in fase I tijdelijke windverbanden toegevoegd.

Belastingen

De kap is – uiteraard – ontworpen op de gebruikelijke veranderlijke belastingen door bijvoorbeeld sneeuw en wind (zie p. 38-39). Daarnaast is er rekening gehouden met specifieke belastingen door calamiteiten, waaronder een aanrijding, een aanvaring en

brand (zie p. 40-43). Een aanrijding of aanvaring zorgde nog wel voor enige hoofdbreken.

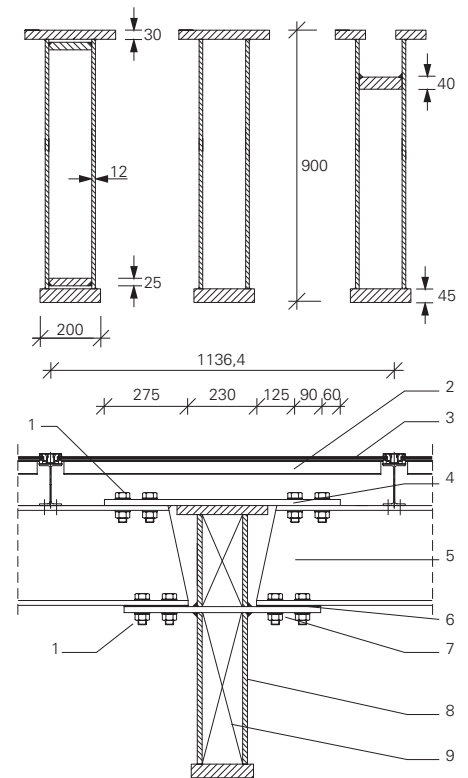
Aanrijding

De kapsteunpunten staan tijdens de gebruiksfase op de kade in een fiets- en voetgangersgebied. Gemotoriseerde voertuigen, bijvoorbeeld voor bevoorrading, worden geacht niet op de kade te komen. Hiervoor zijn aparte locaties. Desondanks kunnen de spanten op de kade worden aangereiden, door voertuigen van onderhouds- of hulpdiensten. De laatsten komen uitsluitend in het gebied bij een al opgetreden calamiteit en blijven daarom buiten beschouwing. Onderhoudsdiensten zijn wel regelmatig aanwezig. De grootste belasting bij een aanrijding treedt op met een volle veegwagen (12.000 kg). De bijbehorende snelheid is slechts 5 km/u. De kans dat de spanten worden aangereiden met een hogere snelheid is klein. Voor aankomst of vertrek van de veegwagen rijdt deze over het fietspad dat op een afstand van ongeveer 4,5 m ligt van de spanten. Tijdens de bouw en de fase waarin een gedeeltelijk gebouwde kap in gebruik is, wordt het verkeer van de De Ruijterkade over de kistdam geleid. De tunnel is dan nog niet gereed. Het verkeer rijdt op relatief korte afstand langs de steunpunten, die daarom in dat stadium zijn voorzien van een aanrijdbeveiliging. In de berekening is geen rekening gehouden met een aanrijding anders dan door een veegwagen.

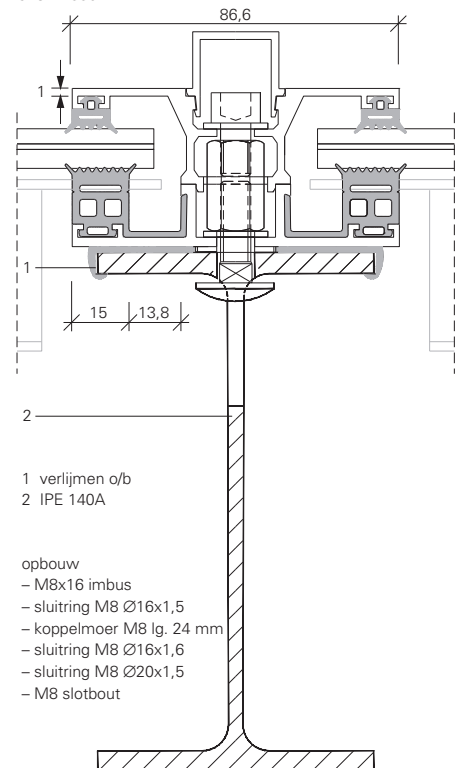
Aanvaring

Bij het ontwerp is ervan uitgegaan dat van een directe aanvaring door schepen geen sprake kan zijn. Van een indirecte aanvaring is sprake als de kistdam wordt aangevaren. De verplaatsingen en belasting zijn dan zo klein dat deze geen invloed hebben op de kapconstructie. Een aanvaring met de kistdam veroorzaakt behalve een verplaatsing van de spantvoet een stootbelasting op de kap. De respons van de kap op deze belasting is met een dynamische analyse bepaald. Vervolgens is in een experimenteel onderzoek bekeken of met name de glasplaten en hun bevestiging hiertegen bestand zijn. Conclusie: de kap kan de aanvaring weerstaan, omdat de stootbelasting relatief laag is en de bewegingsvrijheid van het glas in zijn opleggingen relatief groot.

De doorsnede volgt de momentenlijn. De linker doorsnede bevindt zich op de plaatsen waar vanuit de windbelasting de grootste momenten ontstaan. Een andere afwijkende doorsnede bevindt zich bij de onderste meters van het windverbandspant. De lijfplaten zijn daar 25 mm dik om de momentcapaciteit om de zwakke as te vergroten.



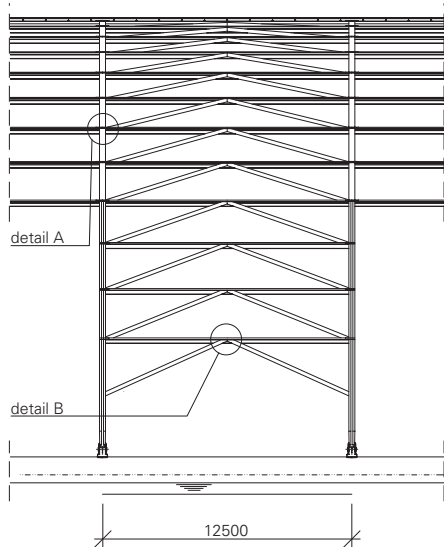
- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1 M27 10,9 gerold | 6 vulplaat 210x90 |
| 2 25x45x25x2,5 | 7 strip 90x20 L = 650 mm |
| 3 Freeformglass | 8 spant samengesteld uit platen |
| 4 strip 90x20 L = 780 mm | 9 schot |
| 5 UPE 330 | |



- opbouw
- M8x16 imbus
 - sluitring M8 Ø16x1,5
 - koppelmoer M8 lg. 24 mm
 - sluitring M8 Ø16x1,6
 - sluitring M8 Ø20x1,5
 - M8 slotbout

Technische gegevens

Bogen samengestelde koker (170x900 mm), h.o.h. 12,5 m; overspanning 63 m • Gordingen UPE 330; h.o.h. 3,1 m; overspanning 12,5 m • Opleggingen gietstukken, scharnierend in het vlak van de boog, aan de IJ-zijde geplaatst op de kistdam en aan de stationszijde op betonnen steunpunten op het busplatform • Dak koudgebogen glas, gedragen door gebogen IPE A 140-profielen, h.o.h. 1,14 m, die over de gordingen doorlopen; aan de stationszijde bestaat het dak uit stalen dakplaten met daarop isolatie



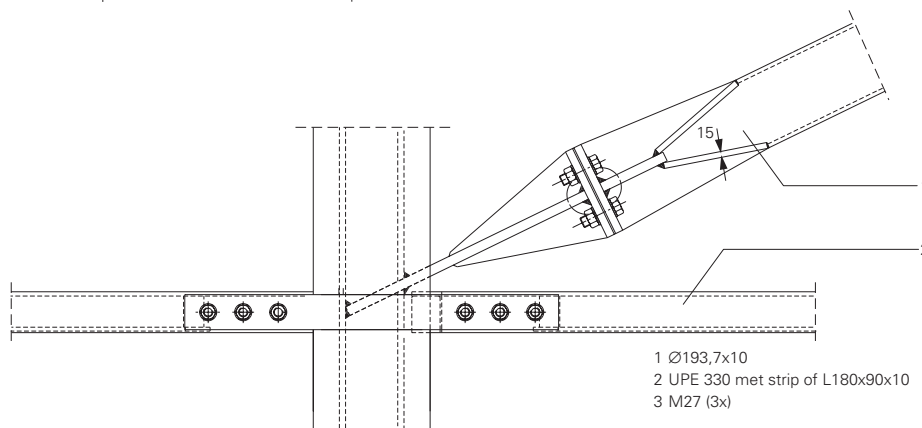
Ontwerp van de boog

De geometrie van de boog zijn bepaald met:

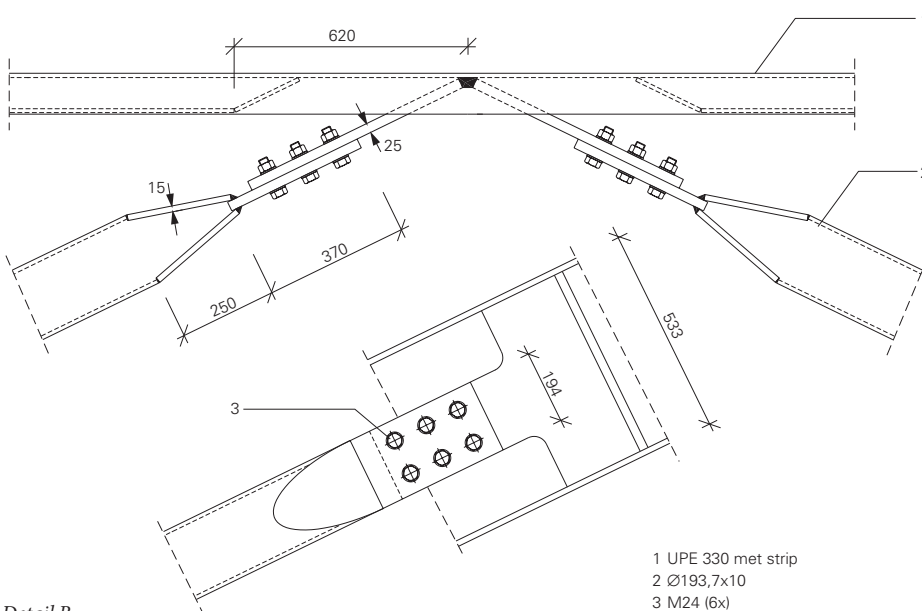
- de vereiste vrije hoogte voor de bussen aan de stationszijde (4,5 m);
- de plaats van de top van de kap. Deze ligt om architectonische redenen in het hart boven de trappartijen;
- de aansluiting boog-kade. Gestreefd is naar de balans tussen een zo laag mogelijk gelegen werklijn van de krachten uit de boog, zodat de kistdam zo gunstig mogelijk wordt belast (met normaalkrachten en een minimaal moment) en een zo hoog mogelijke doorgang voor voetgangers en fietsers.

Samengestelde doorsnede

De bogen zijn uit platen samengesteld. Enerzijds omdat de gewenste afmetingen niet in standaardprofielen te verkrijgen zijn, anderzijds omdat een samenstelling de gewenste scherpe belijning geeft. Om overlast van vogels op de onderflens tegen te gaan is deze minimaal gehouden. De constructiehoogte is 900 mm, 1/70 van de overspanning (63 m). De onder- en bovenflens hebben een gelijke doorsnede. Het verschil in breedte is gecompenseerd in de dikte. De bovenflens is breder omdat dit meer 'vles' geeft voor de aansluitingen met de gordingen en diagonale windverbanden aan de bovenkant van de boog. Een belangrijk voordeel van een samengestelde doorsnede is dat deze relatief gemakkelijk kan worden aangepast aan lokale krachtwerving bij een gelijk uiterlijk. Ook kan de functionaliteit eenvoudig worden aangepast, bijvoorbeeld door over de laatste 15 m naar het IJ toe de bovenflens deels tussen de flenzen te laten zakken zodat een goot ontstaat. In de dimensionering van de gewone bogen is de windbelasting dwars op de overkapping maatgevend. Waar de gelijkmatig verdeelde permanente belasting slechts tot druk in de boog leidt, zorgt de windbelasting voor aanzienlijke momenten (zie p. 38-39). Verbanden die doorlopen tot aan de fundering zijn technisch optimaal maar vormen een obstakel voor reizigers die naar de IJ-kade willen, bijvoorbeeld om de pont te nemen. Daarom eindigt de laatste verbandstaaf op 3,5 m boven het steunpunt. Het onderste deel van de stabiliteitsverbanden vormt een portaal in langsrichting. Hoewel dit gevaard gaat met



Detail A.



Detail B.

Literatuur

1. L. Vákár en M. Gaal, 'Cold Bendable, Laminate Glass – New Possibilities in Design', *Structural Engineering International* Vol. 14, nr. 2 (2004), p. 95-97.
2. L. Vákár, 'Koud-gebogen glas met zonnecellen, Freeformglass: lichtere staal/glas-constructies', *Civiele Techniek* 5/6 (2011), p. 19-22.
3. H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, M.C.M. Bakker, H.M.G.M. Steenbergen en C.H.M. de Louw, 'Nieuwe toetsingsregel voor de kipstabiliteit van U-profielen', *Bouwen met Staal* 202 (2008), p. 50-53 (volledig artikel 'Toetsingsregels voor kipstabiliteit van U-profielen met belastingen op het lijf': www.bouwenmetstaal.nl, 'tijdschrift').
4. H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, M.C.M. Bakker, H.M.G.M. Steenbergen en C.H.M. de Louw, 'Design rules for lateral torsional buckling of channel sections subject to web loading', *Der Stahlbau* 77 (2008), p. 247-256.

veel grotere interne krachten in het spant is de doorsnede uitwendig gelijk, maar opgebouwd uit dikkere platen.

Schema bogen

Er is dan ook verschil in de schematisering tussen de gewone bogen en die in de stabiliteitsvoorziening. De gewone bogen zijn aan de beide uiteinden scharnierend. In hun vlak is het scharnier gemaakt met een pen-gatverbinding. Loodrecht daarop is een scharnier gerealiseerd met een vlakke plaat in het onderste gietstuk. Hoewel dit geen volledig scharnier is, is de dikte van de plaat zo klein dat de vervormingen in langsrichting kunnen worden gevolgd zonder noemenswaardige spanningen om de zwakke as van de verbinding.

De bogen in de windverbanden scharnieren ook aan beide zijden in hun vlak, eveneens via pen-gatverbindingen. Aan de IJ-zijde zijn de windverbandbogen loodrecht op het vlak echter ingeklemd in de kistdam waardoor de oplegging afwijkt. Hun ondersteel heeft drie opstaande schijven. Zo worden de vervormingen van het stabiliteitsverband en de momenten om de zwakke as in de laatste meters van de bogen beperkt. Dat is nodig omdat de stabiliteitsverbanden over de laatste meters niet doorlopen tot aan de oplegging. De oplegkrachten worden door buiging om de zwakke as van de bogen overgebracht. Door de inklemming wordt het moment om de zwakke as gehalveerd en de vervorming over de eerste meters flink gereduceerd. Aan de stationszijde zijn de windverbandbogen 'gewoon' scharnierend uitgevoerd. Hier wordt de horizontaalkracht in de langsrichting met schoren afgevoerd naar het platform en daarna via de stabiliserende betonconstructies van het platform naar het maaiveld gebracht.

Standaarddoorsnede en classificatie

Bij de standaarddoorsnede (afb. op p. 31, links boven) is uitgegaan is van een lijfplaatdikte van 12 mm. Bij deze dikte bevindt de doorsnede zich voor de sterke as juist op de grens tussen doorsnedeklasse 2 en 3. Er is gerekend met klasse 3. De andere doorsneden bevinden zich bij een moment om de sterke as in doorsnedeklasse 2. Daarom kan gebruikt worden gemaakt van de plastische



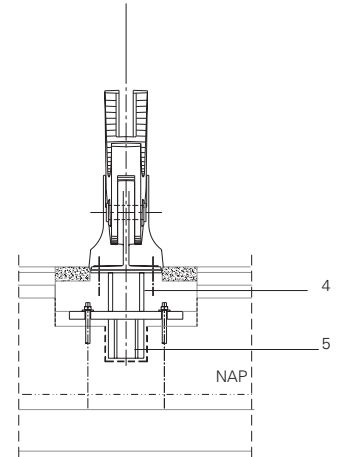
momentcapaciteit van de doorsnede die aanzienlijk hoger ligt dan de elastische momentcapaciteit. De gootbodem en de ingelaste flenzen verkleinen de afstand zodanig dat de b-t-verhouding van de lijfplaten in doorsnedeklasse 2 valt.

De breedte van de boog wordt bepaald door het uitzetten van de gehele overkapping. Om de uitzetting elastisch door de spantbenen te laten volgen is de I_z geminimaliseerd. Hierdoor ontstaat een ongebruikelijk slanke ligger met een breedte-hoogteverhouding van 1:4,5 (200:900). De doorsnede bevindt zich bij een moment om de zwakke as in doorsnedeklasse 4. Met de doorsnede-reductiemethode zijn de eigenschappen bepaald.

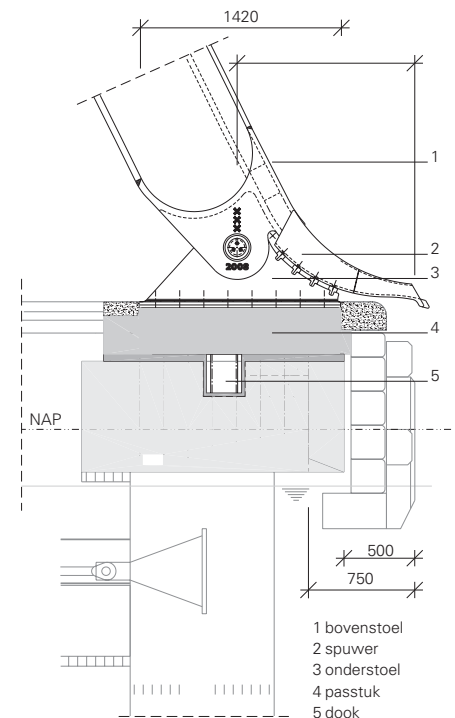
Torsieknikstabiliteit

Een boog is gevoelig voor torsieknik. Ook daarom is het profiel kokervormig. Vanwege de slankheid en de grote afmetingen is dit niet voldoende om de spanten te steunen tegen torsieknik. De steun komt van de inklemmingen bij de gordingen. Daar zijn platen ingelast om de zijdelingse kracht bij kip vanuit de onderflens over te brengen in de verbinding boog-gording.

Het grootste moment in de bogen bevindt zich op de beide randen van het transparante dakvlak. De torsieknikstabiliteit wordt daar mede bepaald door de oplegcondities van de boog bij de gietstukken en de inklemming in de onderste twee gordingen. Met een eindige-elementenanalyse is het kipgedrag onderzocht en de kiplengte bepaald.

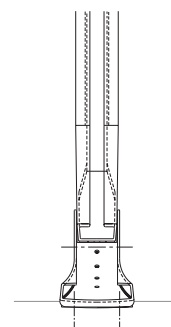


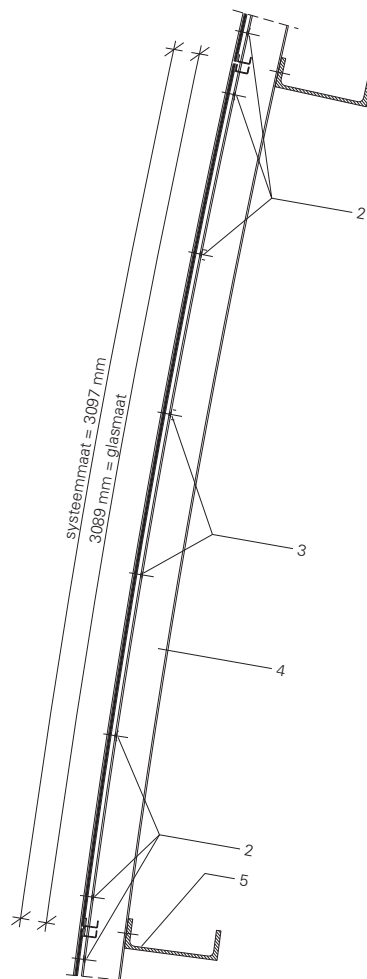
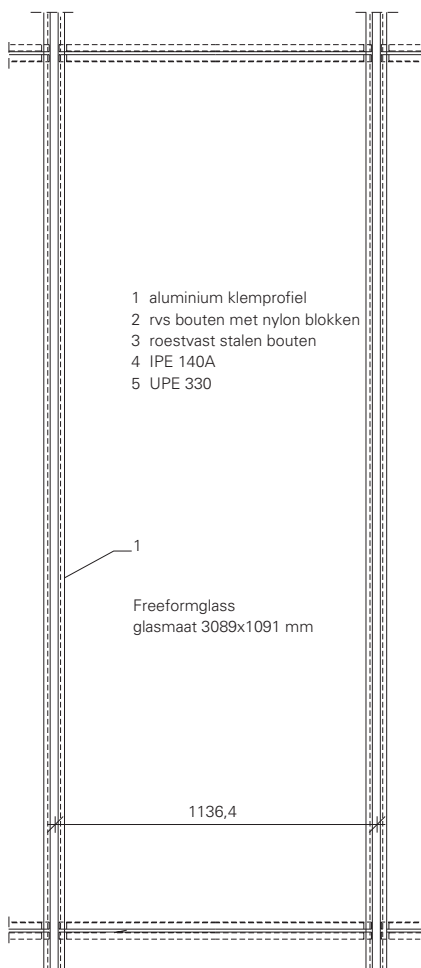
vanaf busplatform



- 1 bovenstoel
- 2 spuwer
- 3 onderstoel
- 4 passtuk
- 5 dook

vanaf IJ





Ontwerp gording

Voor de gording zijn diverse doorsneden overwogen. Uiteindelijk is gekozen voor een UPE omdat deze met zijn asymmetrische doorsnede zo geplaatst kan worden dat geen vocht op de profielen achterblijft. Door de gebogen vorm van de overkapping zou dit met andere open profielen wel het geval zijn. Daarnaast heeft een UPE-profiel de architectonisch gewenste strakke belijning.

De UPE 330 is het basisprofiel. Op diverse plaatsen is de doorsnede op de krachtwerving aangepast. Zo zijn er bij de eerste twee gordingen (gerekend vanaf de IJ-zijde) hoeklijnen ingelast, net als bij de tweede gording vanaf het dichte dakdeel. Hiermee zijn de moment- en kipstabiliteit vergroot, anders zouden bij het uitzetten van de overkapping, bij het elastisch vervormen van de boogspanten door wind- en temperatuurbelastingen, te grote normaaldrukspanningen ontstaan. Ook bij de windverbanden zijn er grote drukkrachten in de gordingen. In deze gordingen is een plaat ingelast zodat een kokervormige doorsnede ontstaat. Die verstijving is natuurlijk niet over de volle lengte nodig. De hoeklijn en plaat zijn ruim voor het einde van het profiel beëindigd, waardoor over de hele kap een uniforme verbinding met de bogen ontstaat.

Door een opwaartse windbelasting wordt de ongesteunde onderflens van de gording gedrukt: kipstabiliteit is maatgevend. Bij het belastinggeval sneeuw is de belasting vergelijkbaar groot met de opwaartse windbelasting maar de dan gedrukte bovenflens wordt op dat moment gesteund door de glasdragers. De verbindingen van de gordingen zijn gaffelopleggingen. Ook is de gording over de sterke as ingeklemd, net als de onderflens over de zwakke as, om de kipstabiliteit gunstig te beïnvloeden. Door de inklemming om de sterke as worden bovendien de spanten zijdelings gesteund en worden de knik- en torsiekniklengte van het boogspant gereduceerd.

Bij een U-profiel wordt de kipstabiliteit nadelig beïnvloed doordat het dwarskrachtcentrum buiten de doorsnede ligt. Ook geeft de norm voor de toetsing op kipstabiliteit geen eenvoudige regels. De gordingen zijn geverifieerd met resultaten van toen

Freeformglass

Het toepassen van Freeformglass^[1, 2] is vanuit duurzaamheidsoogpunt interessant, omdat de hoeveelheid materiaal bijna kan worden gehalveerd. Dit betekent een besparing op grondstoffen en kosten. Voor een in 1997 uitgevoerd project in Den Bosch waren in warmgebogen gelaagd glas twee ruiten van elk 8 mm glasdikte nodig met daar tussen 3 mm kunsthars. In koudbuigbaar glas bleek 2x4 mm glas plus 1,4 mm kunststof voldoende. Daarnaast vindt bij warmgebogen glas het buigen plaats door het verhitten, bijna smelten, waarbij de ruiten over een mal worden gebogen. Bij koudbuigbaar glas is dit niet nodig. Ook zijn vlakke ruiten eenvoudiger en goedkoper naar de bouwplaats te transporteren. Er passen immers meer vlakke ruiten op een wagen dan gekromde. En de montage vergt amper energie. Het koudgebogen glas wint het ook op andere aspecten van alternatieven zoals kunststoffen. Immers, glas bestaat voornamelijk uit zand, kalk en soda, die in overvloed beschikbaar zijn. Kunststoffen zijn aardolieproducten. Bovendien laden kunststofplaten elektrostatisch op, waardoor ze sterk vervuilen en ze zijn krasgevoeliger dan glas en minder bestand tegen ultraviolet licht.

lopend onderzoek aan TU/e, later uitmondend in de publicaties [3] en [4]. Uit dat onderzoek is destijds de conclusie getrokken dat als de kipslankheid $\lambda_{lt} >$ ongeveer 1 de negatieve invloed van de positie van het dwarskrachtencentrum bij U-profielen verwaarloosbaar is ($\lambda_{lt} = (M_{pl,d} / M_{kip,crd})^{1/2}$). Uiteindelijk wordt deze situatie irrelevant, omdat vanwege de brandeisen is overgestapt van relatief slappe aluminium glasdragers naar (veel zwaardere) stalen dragers die de UPE-profielen h.o.h. 1,14 m tegen kip steunen.

Als gegoten

Elke oplegging bestaat uit twee gietstukken die zijn verbonden met een pen-gatverbinding. De onderstoel (T-stuk) is bevestigd op de deksloof van de kistdam via een passtuk. De bovenstoel is een gaffel met een complexe vorm om goed aan te sluiten op de doorsnede van de boog. Aan de IJ-zijde is op de onderstoel tevens een spuer gemonteerd waarmee het hemelwater vanuit de spanten direct in het IJ wordt geloosd.

De bovenstoel is vanwege de lasbaarheid gemaakt van gietstaal. De onderstoel is van nodulair gietijzer. Een uitzondering zijn de onderstoelen van de opleggingen van de windverbanden aan de stationszijde: die zijn vanwege de grote spanningen ook van gietstaal. Nodulair gietijzer heeft een taai bezwijkgedrag en is beter bestand tegen corrosie dan gietstaal. Voor de spuer is grijs gietijzer gebruikt: dat breekt bros. De spuer knapt af bij een aanvaring waardoor de (stoot)belasting nauwelijks op de oplegging terecht komt.

Passtuk

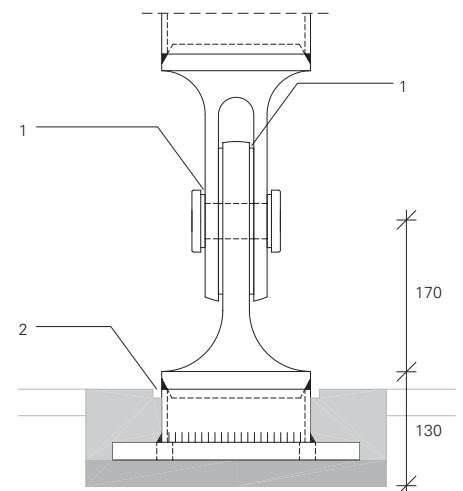
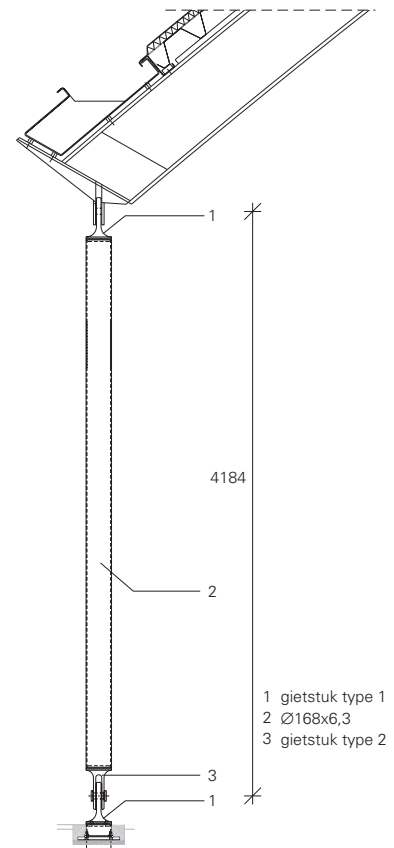
Gietstukken zijn serieproducten en kunnen niet worden aangepast op mogelijk maatverschillen. De onderstoel is aan weerszijden met de constructie verbonden via een passtuk om maatafwijkingen in de ondergrond te compenseren. De afwijkingen komen enerzijds uit de betonconstructie, anderzijds door zettingen van de kistdam. De zetting van de kistdam was bij het instorten van de ankers in 2008 nog niet volledig opgetreden, maar zou in totaal naar verwachting lokaal kunnen oplopen tot 300 mm. Om te zorgen voor een strakke uitlijning is contractueel



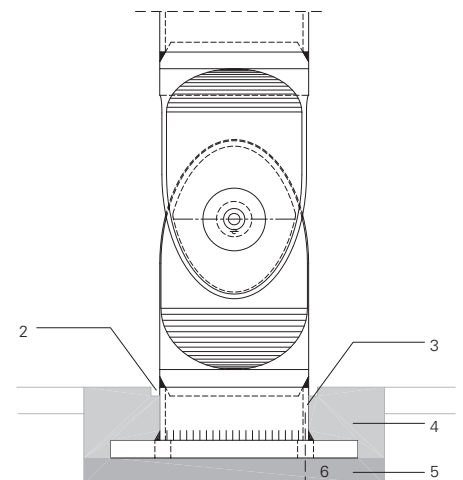
gevraagd de ankerposities in te meten tijdens het vervaardigen van de werktekeningen. Door het aanpassen van de overspanning wordt de gemiddelde zetting over de lengte van de kistdam gecorrigeerd; de unieke passtukken vangen lokale verschillen op, tot 200 mm. Uiteindelijk blijkt de zetting zo gering dat enkel gebruik is gemaakt van de correctiemogelijkheid van het passtuk.

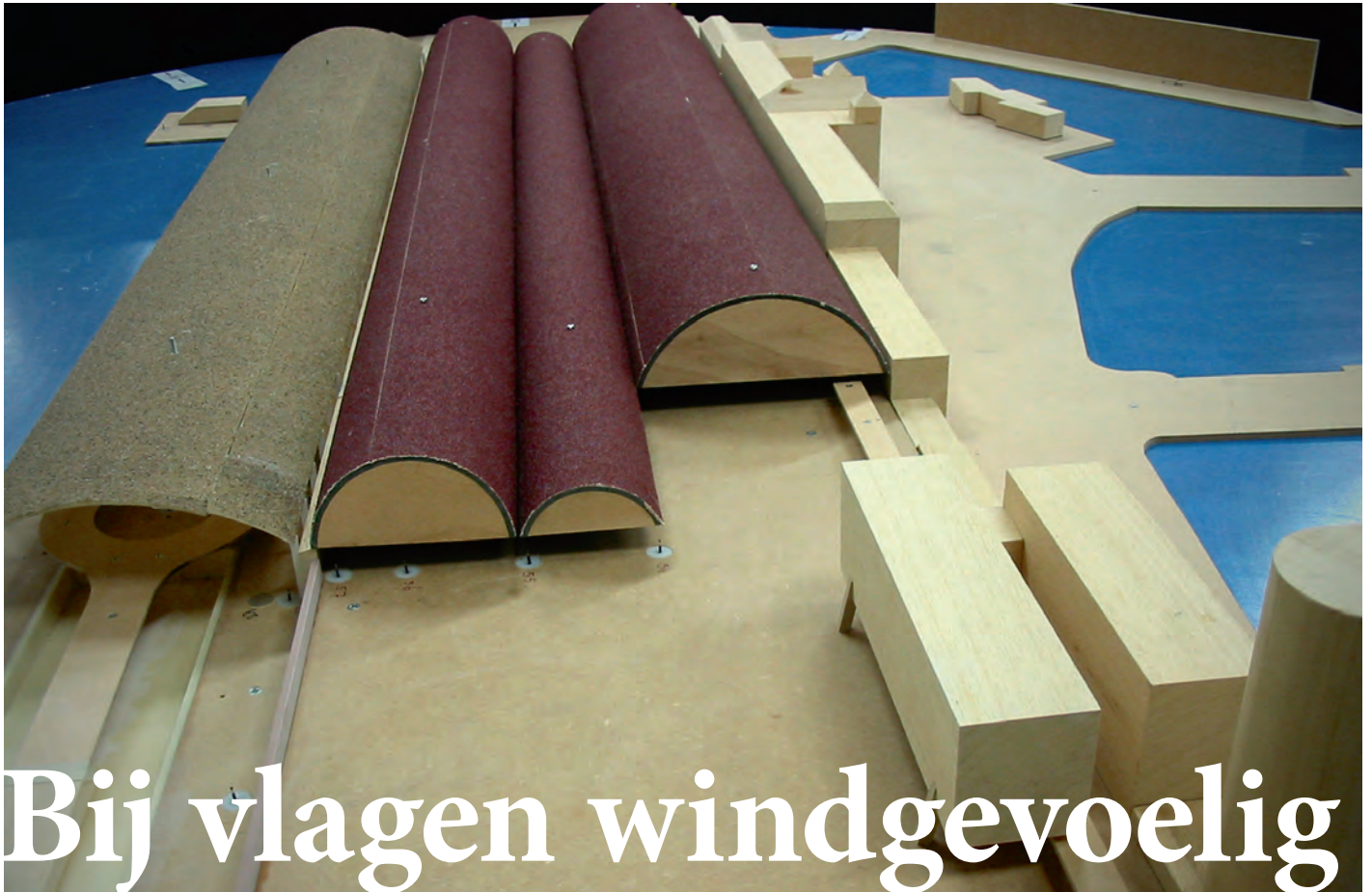
Verankering

Bogen hebben gewoonlijk een naar buiten gerichte spatkracht; deze spanten wijken af. Door het lage eigengewicht én de grote opwaartse windbelastingen kan ook een naar binnen gerichte horizontaalkracht optreden. Vanwege de grootte en de wisselende richting is een dook gebruikt om de horizontaalkracht op te nemen. De ankers kunnen op deze manier volledig worden benut voor het opnemen van de momenten in de verbinding. Aan de oever zijn de passtukken verankerd aan de betonnen onderconstructie met ingestorte 4.6-ankers. Aan de stationszijde zijn de gietstukken op de kolommen bevestigd via 8.8- en 10.9-voorspanankers. De voorspanning moet hier een kier voorkomen tussen het beton en het passtuk. Door de kleine arm waarmee het moment in de verbinding wordt overgebracht ontstaat wisselend trek en druk in de ankers. Door voorspanning blijft het contactvlak dus gesloten. •



- 1 rondom afkitten
- 2 afkitten
- 3 buis Ø193,7x10
- 4 aanstorten met beton
- 5 2-componenten gietmassa
- 6 4xM16, gerolde draad ingestort, lengte 600 mm





Bij vlagen windgevoelig

Voor de windberekening van de Overkapping IJsei volstaan de schema's in NEN 6702 of Eurocode niet en is een interpretatie van de norm nodig. Bij een uitgenutte, en in dit geval relatief slappe constructie is het zaak de verwachte belastingen nauwkeurig te bepalen voor zekerheid over het vereiste veiligheidsniveau. Uit onderzoek blijken de globale belastingen soms wel 60% lager te liggen, maar de lokale windbelastingen, met name op de koppen, kunnen fors hoger uitvallen dan in de normen.

ir. L.I. Vákár, ir. J.C. van Wolfswinkel en
ir. G.M. van Uffelen

László Vákár is consultant bij Movares, Jan van Wolfswinkel is senior adviseur bij Movares en Marcel van Uffelen is projectleider bij Peutz in Mook.

De vorm van de kap wijkt af van de genormeerde figuren om windvormfactoren te bepalen. Een interpretatie van de norm is nodig om de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen en te vergelijken met de resultaten van het windtunnelonderzoek.

Voor wind in dwarsrichting is gebruik gemaakt van de modellen voor tweezijdig hellende overkappingen. De windvormfactoren zijn afhankelijk van de dakhelling. De overkapping is gebogen en heeft dus een verlopende dakhelling. De windvormfactor is gekozen bij de aanwezige dakhelling. Dat wil zeggen: de factor verandert met de helling mee. Voor de wind in langsrichting is de situatie van een eenzijdig hellende overkapping ($\alpha = 0^\circ$) toegepast.

Lokale wind

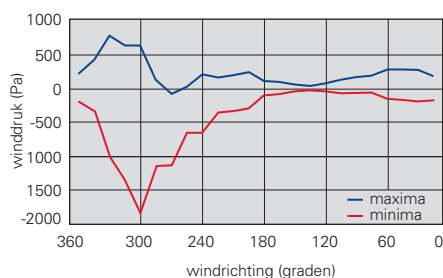
Bij de randen van de kap gelden lokale windvormfactoren. Deze zijn bepaald met NEN 6702. In de langsrichting is gerekend met

een vlak dak en in de dwarsrichting is de kap ook hier geschematiseerd tot een tweezijdig hellend dak met wisselende hoeken.

Dit resulteerde in maximale waarden voor de lokale windbelasting van $2,7 \text{ kN/m}^2$.

Windtunnelonderzoek

De winddrukken zijn gemeten in een schaalmodel – inclusief de omringende bebouwing – met een serie dynamische druksensoren. De sensoren zijn simultaan uitgelezen – door een 120-kanaals data-acquisitiesysteem – en omgerekend naar de 'werkelijkheid', op volle schaal. Hieruit volgen de representatieve waarden van overdruk en zuiging voor de referentieperiode van 50 jaar. Een grafiek met de bijbehorende maximale en minimale drukken voor een meetpunt op de rand is te zien in *afbeelding 1*. Twee frequenties zijn bekeken: voor de spanten 30 Hz (dat correspondeert met de spantmaat $60 \times 12,5 \text{ m}$) en



1. Voorbeeldgrafiek met windbelasting.

voor het glas 400 Hz (dat correspondeert met de glasmaat van 3x1 m). Hoe groter de afmetingen van een onderdeel, hoe lager de frequentie van de wind waarop de constructie wordt berekend, omdat het dan om grotere windvlagen gaat. De hogere frequenties hangen samen met lokale heftigere windwervels, die aangrijpen op de afzonderlijke glasplaten. Om de winddruk op de gordingen en andere onderdelen te bepalen, moet worden geïnterpoleerd tussen de voor de spanten en het glas gegeven winddrukken.

Onderzoek versus NEN 6702

Het onderzoek geeft voor de globale winddrukken in het algemeen lagere waarden dan NEN 6702 (tabel 1). Eén van de oorzaken hiervan is dat bij het bepalen van de in de NEN 6702 gegeven windvormfactoren voor één- en tweezijdig hellende overkappingen altijd rekening gehouden wordt met geblokkeerde doorstroming van wind. Overkapping IJsei is echter een grote open constructie, zeker in de lengte. De wind kan hierdoor niet de overdruk opbouwen waarmee in NEN 6702 rekening wordt gehouden. Voor het bepalen van de windbelasting is besloten altijd de hoogste waarde te kiezen uit de norm of het windtunnelonderzoek. In een aantal gevallen zijn de belastingen volgens NEN 6072 ongeveer drie maal hoger dan in het onderzoek is gemeten. Desondanks is de hoge belasting gekozen maar in een aantal toetsingen licht gereduceerd. De bij veiligheidsklasse 3 behorende veiligheidsfactoren worden nog steeds ruimschoots gehaald.

Voor de lokale drukken op met name de koppen liggen de gemeten waarden fors hoger door de omringende bebouwing.

Tabel 1. P_{rep} (kN/m²) volgens NEN 6702 en het windtunnelonderzoek voor verschillende onderdelen.

winddrukken	richting	norm	onderzoek
globaal			
kopsparanten	op	1,5	1,7 (2,1+1,3)/2
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	0,7 (0,8+0,65)/2
spanten	op	1,5	0,5
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	0,3
lokaal transparant			
beglazing	op	2,3	3,0
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	1,8
glasdrager	op	2,3	2,9
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	1,7
gording	op	1,8	1,5
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	0,8
randgording	op	1,8	1,5
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	0,8
gording uitkraging	op	2,1	2,8
	neer	0,2 tot 1,0 afh. van dakhelling	1,5
lokaal gesloten			
stalen dakplaat 1e veld	op	2,7	3,0
	neer	1,0	1,7
stalen dakplaat	op	2,2	2,8
	neer	1,0	1,5
gording dicht dakvlak (IPE 500V)	op	1,8	1,5
	neer	1,0	0,8
randgording (IPE 500V)	op	2,1	2,3
	neer	1,0	1,0
uitkraging koker 500	op	2,1	2,6
	neer	1,0	1,3
UPE 270 dubbel	op	2,1	2,3
	neer	1,0	1,0
goot	op	2,2	2,7
	neer	1,0	1,5

Voor het koudgebogen glas is dat geen probleem, echter wel voor de bevestigingen ervan. Waar de glasplaten op het grootste deel van de overkapping zijn gemonteerd met roestvast stalen bouten met nylon blokjes voor de vereiste 'brandhangendheid' van 30 minuten (zie p. 40-43) zijn in de zones met hoge lokale windbelasting de nylon blokjes weggelaten, omdat in de gebieden waar de lokale windbelasting erg groot is de brandhangendheid geen issue is doordat daar het busplatform ontbreekt.

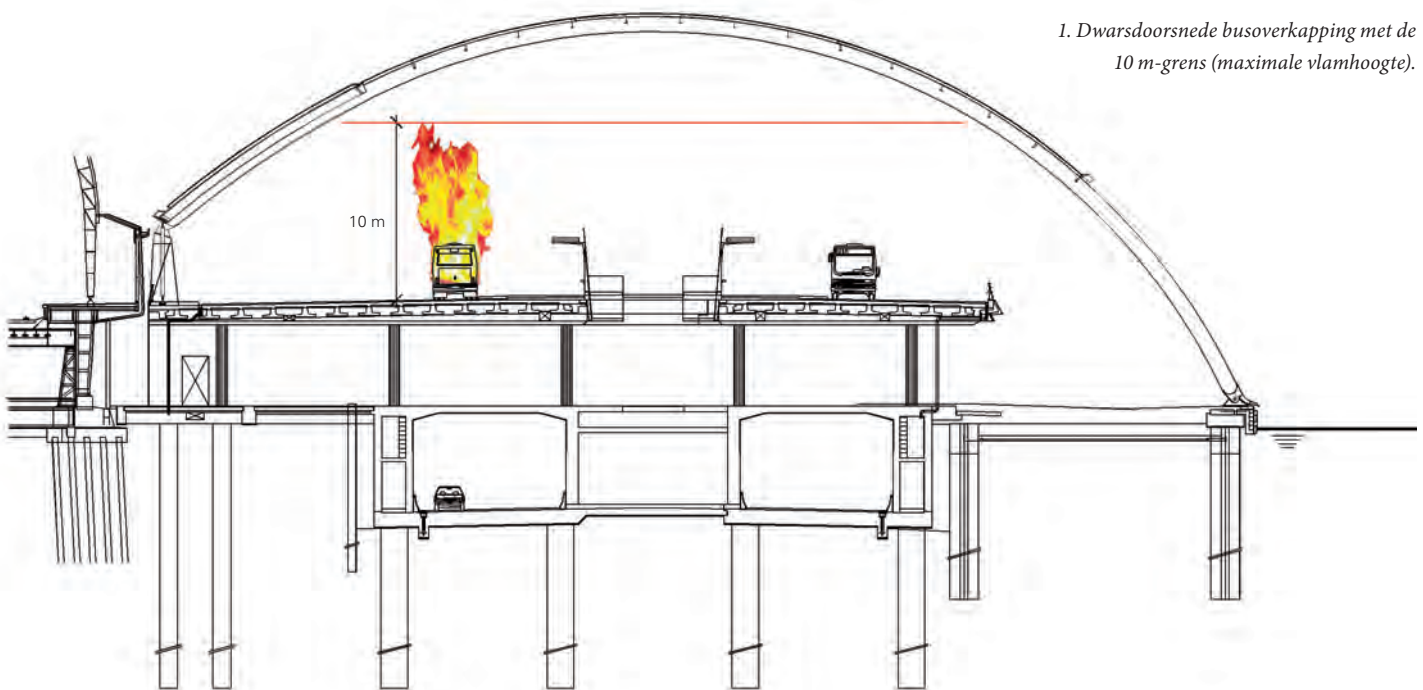
Windvlagen

Door de grote lengte van de kap is de windbelasting in dwarsrichting niet overal gelijk. Waar gewoonlijk bij grote constructies de totale windlast mag worden gereduceerd, kan dit niet bij Overkapping IJsei, omdat elk spant in dwarsrichting stabiliseert. Rekening wordt gehouden met een verschil van 50%

tussen de extreme gelijktijdig optredende windbelasting op twee naast elkaar gelegen spanten. Dit onderlinge verschil veroorzaakt tijdens een windvlaag een netto belasting op de gordingen, omdat ze een vervorming krijgen opgelegd door de verschilverplaatsing tussen twee opeenvolgende spanten waaraan ze bevestigd zijn.

De genoemde 50% is in eerste instantie een conservatieve en arbitraire waarde. Later ontstaat discussie over de afmeting van deze vlag, omdat deze waarde wel eens tot onnodig hoge kosten zou kunnen leiden vanwege de daarbij benodigde voorzieningen om het schuiven van het glas te voorkomen en/of de momenten in de gordingen op te vangen. Op basis van wetenschappelijke literatuur en een analyse van alle in de windtunnel gemeten meetreeksen van de winddrukken is de 50%-aansname getoetst: die is realistisch gebleken. •

'Brandhangendheid' cruciaal voor glaskap



1. Dwarsdoorsnede busoverkapping met de 10 m-grens (maximale vlamhoogte).

Tijdens het ontwerp van Overkapping IJsei vindt rechtspraak plaats over de Mont Blanc-tunnelbrand van 24 maart 1999, waardoor aan de kap ongebruikelijk hoge eisen worden gesteld. Volgens de destijds vigerende regelgeving is de overkapping in brandbelasting noch vorm te classificeren. Daarom zijn eisen gesteld specifiek vanuit het gebruik van het platform aan de brandwerendheid van de staalconstructie en de brandhangendheid van het glas.

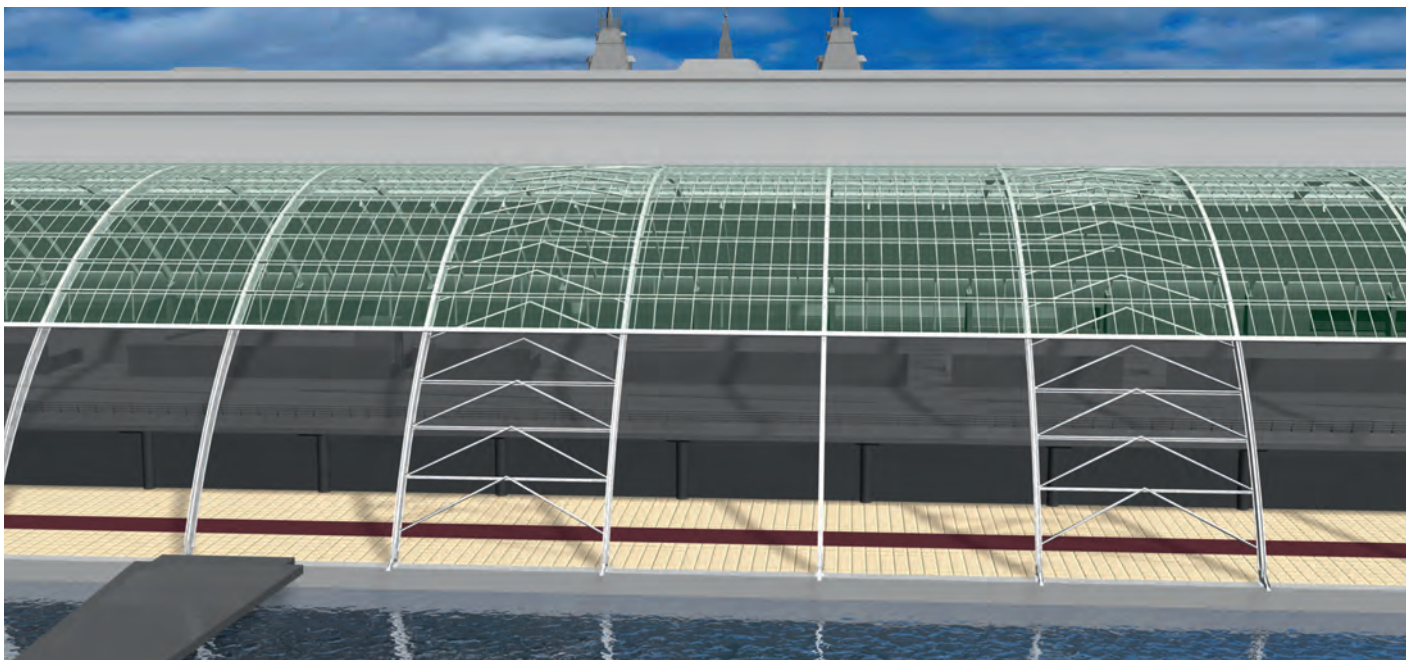
De brandwerendheidseisen zijn tot stand gekomen in overleg, op basis van gelijkwaardigheid (groot brandcompartiment) en privaatrecht, en zijn daarmee hoger dan in het Bouwbesluit staat.

De brandweer definieert een scenario van een busbrand waarbij de overkapping 30 minuten brandwerend moet zijn en er geen glas naar beneden komt. Deze laatste eis krijgt de naam *brandhangendheid*. Daarnaast is een scenario gedefinieerd voor een brandende vrachtwagen op de laad- en loszone, die over de gehele lengte van het busplatform aan de zijde van Amsterdam Centraal strekt. Aanvullend wordt gesteld dat bezwijken van de hoofddragconstructie

na 30 minuten niet mag leiden tot voortschrijdende instorting, waardoor de kap bijvoorbeeld bij de uiteinden op de toeritten van de tunnel zou kunnen vallen.

Vluchten

Voor een veilige vluchtweg is een benadering met brandcompartimenten bij een dergelijk open constructie niet zinvol. Daarom is met simulaties aangetoond dat reizigers binnen 10 minuten van het busplatform kunnen vluchten. De 10-minutengrens is aangehouden, omdat daarna – bij de gedefinieerde brand – de rookdichtheid volgens cfd-berekeningen (computational fluid dynamics) te hoog is.



2. Visualisatie (boven) en overzicht (onder) van de constructie. De spanten zijn brandwerend gecoat tot de maximale vlamhoogte.



Busbrand

Bij de busbrand luidt het scenario: twee bussen komen met elkaar in botsing en de brandstoftanks van beide voertuigen vatten op dezelfde locatie vlam. De vlamhoogte is met cfd-berekeningen bepaald op maximaal 10 m ten opzichte van het platform, waarbij geen sprake is van direct vlamcontact tegen het transparante dakdeel. Vervolgens is op basis van de brand een brandkromme vastgesteld. Deze is berekend (via cfd) op basis van een 70 MW-brand met onbeperkte zuurstofaanvoer en een piekniveau van 35 MW in 5 minuten. De vuurlast liep op tot 2 MW/m². Deze kromme wijkt af van de norm omdat het een weergave is van de

luchttemperatuur bij de dakhuid. Deze temperatuur neemt af of toe al naar gelang de afstand tot de brandhaard.

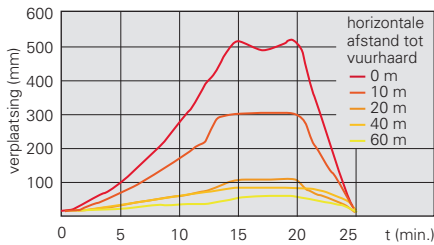
Brandwerendheid staalconstructie

Voor de staalconstructie wordt uitgegaan van een temperatuur bij brand die gelijk is aan de maximale luchttemperatuur. De bogen en gordingen zijn getoetst door in de formules een voor de optredende temperatuur gecorrigeerde proportionaliteitsgrens en E-modulus in te voeren. In de benadering van de brand is het gebied met een verhoogde temperatuur relatief beperkt. Zeker in relatie tot de afmetingen van de overkapping. Indien een of meerdere gordingen bezwijken, dan

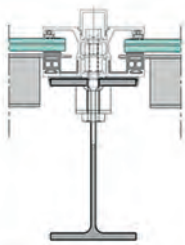
nemen naastgelegen gordingen de functie over en houden daarmee de totale samenhang van de staalconstructie in stand.

Brandhangendheid

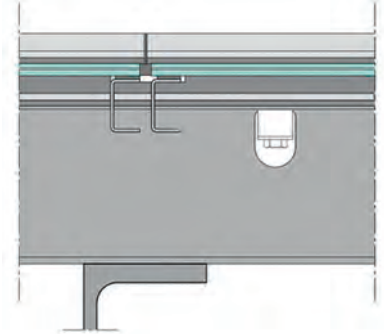
Voor het bepalen van de brandhangendheid is van belang dat glas niet goed bestand is tegen (grote) (buig)trekspanningen, vooral niet in de randen. Om de trekspanningen te minimaliseren is allereerst de breedte van het glas in de sponning beperkt. De temperatuur van het glas in de sponning zal dan minder ver achterblijven bij de rest. Dit reduceert de trekspanningen door temperatuurverschillen. Voor voldoende oplegbreedte steken de roestvast stalen C-profielen,



3. Luchttemperatuurkromme (net onder het glas).



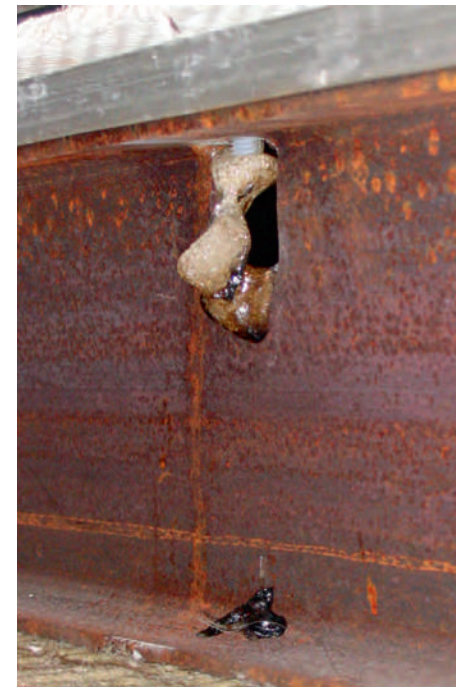
4. Details glasbevestiging met nylon blokje.



8a. Detailoverzicht voor aanvang van de proef.



8b. Verweking na ongeveer 16 minuten.



8c. De bout is geheel gesmolten na 17 minuten.

waarop het glas is gelijmd, uit ten opzichte van het glas. Hiermee wordt voorkomen dat de ruiten gaan aanliggen en daardoor aan de andere zijde van de oplegging afschuiven waardoor de ruit valt of breekt door lokale overbelasting. Om het achterblijven van de temperatuur in de glasrand verder te beperken ligt het glas op warmtegeleidend rubber. Aan het siliconenprofiel is aluminiumpoeder toegevoegd dat de isolerende werking sterk reduceert. Het stalen profiel wordt direct aangestraald door de brand en staat aan drie zijden in direct contact met de hete lucht waar de ruit maar aan één zijde wordt aangestraald. De rand van de ruit in de sponning wordt zo warmer dan het midden. Bij brand

ontstaat – door het warmtegeleidende rubber – een drukspanning in de kwetsbare rand van het glas in plaats van een trekspanning.

Nylon en koudbuigbaar glas

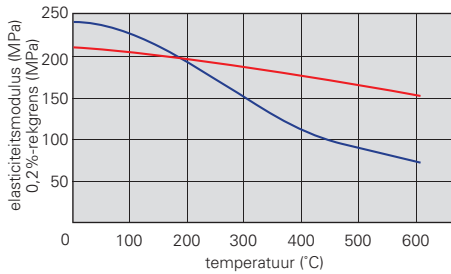
Ook kunnen trekspanningen in het glas bij brand ontstaan wanneer de ruit niet kan (mee)buigen. Het glas warmt aan de direct verwarmde onderzijde van de ruit sneller op dan aan de bovenzijde. Het glas wil omhoog krommen. Als de ruit in de sponning is gefixeerd, wordt dit verhinderd en ontstaan buigtrekspanningen in het glas die kunnen leiden tot bezwijken. Hier wordt dat beperkt door het glas bewegingsvrijheid te geven. De aluminium klemlijsten zijn grotendeels

met nylon bouten op de profielen bevestigd. De bouten zijn zodanig op de kracht van het glas afgestemd, door het oprukken aan de onderzijde van de ruit, dat de ruiten langzaam 'vrijkomen' door het verweken van de bouten bij de oplopende temperatuur. Alleen de middelste twee bouten zijn van roestvast staal om te voorkomen dat de ruiten tijdens en ná de brand los liggen en alsnog vallen.

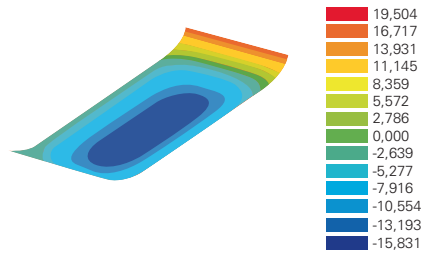
Validatie brandhangendheid

De vereiste brandhangendheid van 30 minuten is op ware grootte aangetoond met proeven. Ongeveer 14 minuten na het begin van de brand verweken de eerste nylon bouten. Vanaf dat moment wordt de kromming van

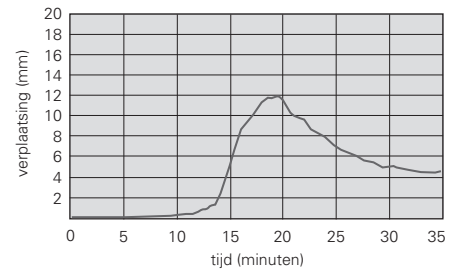
literatuur 1. L.I. Vákár, H.D.M. Kool en J.C. Wolfswinkel, 'Fire Resistant Roof Glazing Design', *Structural Engineering International* Vol. 16, nr. 2 (2006), p. 156-160.



5. Grafiek met de reducties f_p (blauw) en E (rood).



6. Berekende opbuiging van de rand van de ruit.



7. Gemeten opbuiging van de rand van de ruit.



9. De brandproef na 20 minuten. Duidelijk zichtbaar is de verkleurde, zachtborrelende kunststoffolie.

de ruit door temperatuurverschil over de dikte van het glas niet meer verhinderd. Dit is te zien aan de gemeten verplaatsingen bij de korte zijde van de ruit. De opbuiging is ongeveer 1 cm. Na zo'n 17 minuten ontstaan de eerste belletjes in de kunststoffolie. De samenhang die de kunststoffolie aan het gelaagde glas geeft, gaat snel achteruit. In de 20^e minuut is de kunststoffolie over het hele oppervlak gesmolten en vertoont het materiaal grote zachtborrelende bellen. De folie is van transparant verkleurd naar geel-bruin: een teken dat de folie een temperatuur heeft bereikt van 160 °C. Als direct na de 20^e minuut de branders uitgaan en de oven met koude lucht wordt gekoeld, trekken de bellen

weer weg. De ruiten hebben én de zware warmtebelasting én de opgelegde koeling zonder breuk doorstaan. Conclusie: de nylon bouten smelten op tijd en geven de ruiten zo inderdaad de vereiste bewegingsvrijheid. Uiteindelijk is er gekozen voor een uitvoering met roestvast stalen bouten en nylon blokjes met dezelfde werking.

Vrachtwagenbrand

De vrachtwagenbrand op de laad- en loszone wordt gedefinieerd als een oneindige brand met een maximale temperatuur van 700 °C die vanaf de eerste 5 minuten op temperatuur is. De brandlengte is 14 m en dus meer dan de hart-op-hart-afstand van de spanten

(12,5 m), zodat twee opeenvolgende bogen tegelijkertijd door brand kunnen worden belast. De vrachtwagen kan op elke plek staan. Vooral de opleggingen zijn kritisch. Deze bestaan uit een reeks onderdelen (boog, bovenstoel, as, onderstoel, bouten, voorgespannen ankers) waarvan het bezwijken in het ergste geval kan leiden tot het strekken van de boog, tot op de naastgelegen perrons. Om dit te voorkomen zijn de spanten tot waar de vlammen reiken brandwerende gecoat. Van het gesloten dakdeel wordt geaccepteerd dat dit bezwijkt bij brand. Bijkomend voordeel is dat dan een opening ontstaat waardoor de meeste warmte als vanzelf wordt afgevoerd. •

Aan de oplegging van het glas van Overkapping IJsei worden tegenstrijdige eisen gesteld. Bij brand: een zo klein mogelijke opleglengte, maar geredeneerd vanuit algemene constructieve veiligheid juist zo groot als kan. Door de directe bevestiging van glas op staal zijn ook fabricage- en montagetoleranties plus verschuivingen in de verbindingen van invloed. Schuifvast verbindingen met injectiebouten bieden een goede oplossing. Onderzoek naar de toelaatbare stuikdruk op de injectiehars leidt tot een forse beperking van het aantal bouten.

oplegbreedte varieert (+/- 6 mm). De hoekverdraaiing kan worden beperkt door schuifvast verbindingen. Hiervoor zijn pasbouten, voorspanbouten en injectiebouten overwogen.

Pasbouten vallen af vanwege de lange doorlooptijd en de staalkrullen op de bouwplaats die ontstaan bij het boren van de pasgaten. Het grote voordeel van een pasbout is wel dat met zeer beperkte vervorming de volledige afschuifkracht van een bout kan worden overgedragen.

Bij voorspanbouten blijkt het niet haalbaar de benodigde kracht schuifvast over te brengen. De opneembare kracht hangt voornamelijk af van de ruwheid van het oppervlak

lijkt uitvoerbaar vanwege de benodigde apparatuur en het gebrek aan geschoold personeel. Bij de ontwikkeling van injectiebouten in het Stevin-laboratorium blijkt de twee-componentenhars Araldite SW404 met verharder HY2404 de beste resultaten op te leveren. In de praktijk is geen goed alternatief voorhanden: Araldite is de norm. Van deze hars is veelvuldig de toelaatbare stuikdruk onderzocht^[1, 2, 4, 5] waarbij is aangetoond dat de langeduursterkte veel hoger ligt dan de aangenomen 125 N/mm², namelijk om en nabij de 200 N/mm².

Bij de ontwikkeling van de injectiebout is in de speurtocht naar een geschikt injectiemateriaal de nadruk gelegd op het langeduurge-

Besparen op injectiebouten

ir.ing. H.J. van Lint, ir. J.C. van Wolfswinkel en ir. A.M. Gresnigt

Hans van Lint is senior constructeur en Jan van Wolfswinkel senior adviseur bij Movares, Nol Gresnigt is universitair hoofddocent TU Delft

De invloed van vervormingen in de staalconstructie op de oplegging van de glasplaten is het grootst bij de verbinding van de gordingen op de bogen (afb. 2). In het detail zijn twee gordingen met flensplaten ingeklemd op het spant. Bij belasting ondergaan de gordingen aan weerszijden van die aansluiting een tegengestelde hoekverdraaiing. Dit resulteert in een vergroting of verkleining van de hartmaat van de glasoplegging boven het spant. De hoekverdraaiing ontstaat door rekken in de verschillende onderdelen en vanwege het schuiven van de gording tussen de flensplaten als gevolg van de aanwezige boutgatspeling (M27 in Ø 30 mm). Het buigend moment kan pas volledig worden overgedragen wanneer alle contactvlakken op stuik aanliggen. De optredende hoekverdraaiing (gerekend in de bruikbaarheidsgrenstoestand) is relatief groot. De hartmaat van de glasdragers en daarmee de beschikbare

(wrijvingscoëfficiënt). Bij een normaal verfsysteem is de opneembare kracht slechts een fractie van de afschuifkracht. Het opruwen van het schuifvlak is technisch mogelijk maar bij de IJsei-constructie niet praktisch binnen het conserveringssysteem. Het wordt de injectiebout.

Hars is bepalend

De kracht die kan worden overgebracht met een injectiebout hangt onder andere af van de eigenschappen van de injectiehars. De toelaatbare stuiksterkte van de hars ($f_{b, \text{resin}}$) is noch in NEN 6772 noch in Eurocode 3 voorgeschreven. Een courante waarde is 125 N/mm². Met de stuikdruksterkte is de maximaal opneembare afschuifsterkte van de verbinding te bepalen. Omdat deze waarde lager is dan de afschuifsterkte van een reguliere boutverbinding verdubbelt het aantal verbindingsmiddelen. Reden om de eigenschappen van de injectiebout en die van de hars in het bijzonder te onderzoeken.

Algemeen onderzoek

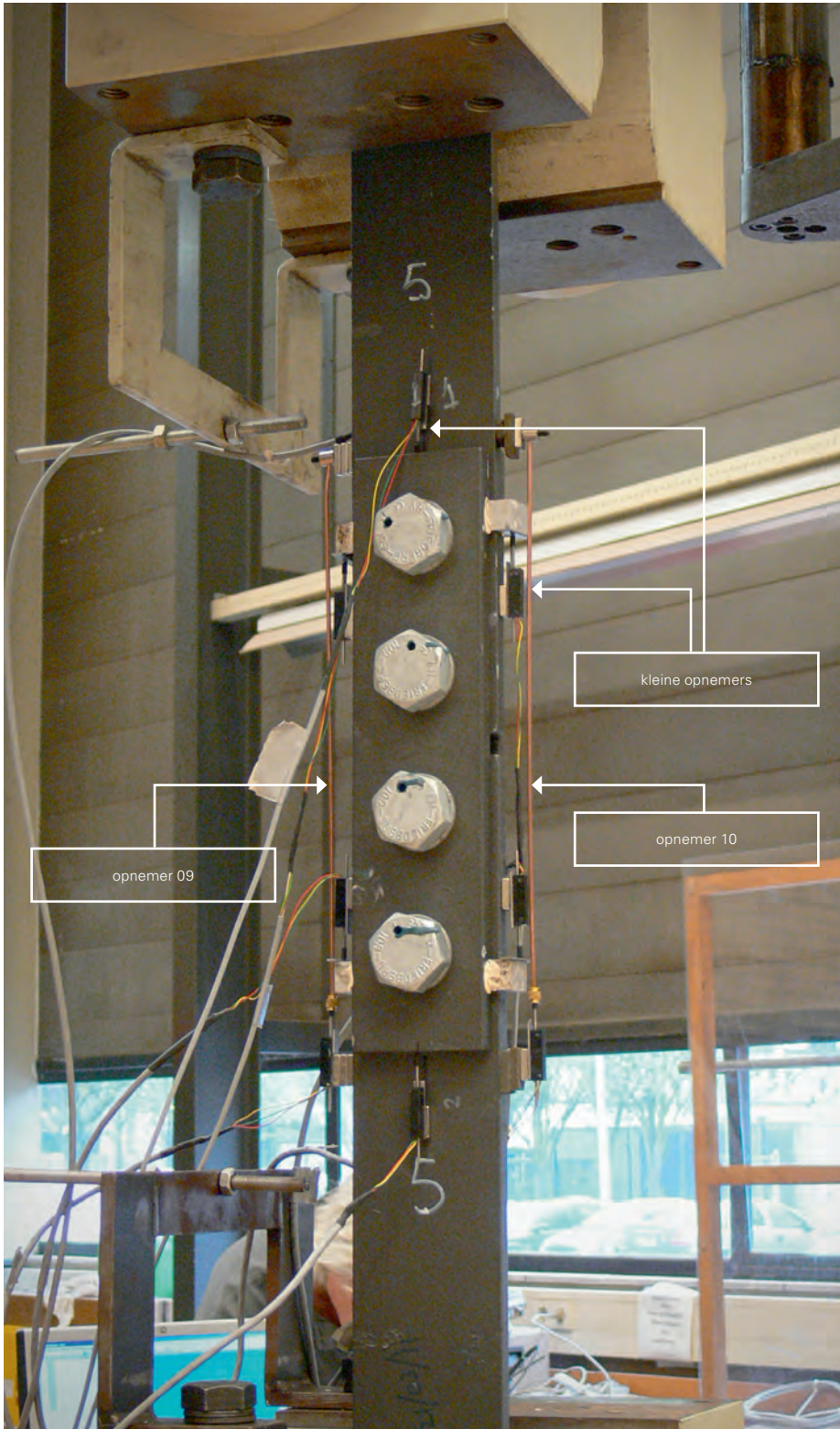
Injectiebouten zijn ontwikkeld naar aanleiding van schade aan klinknagelverbindingen in bruggen. Klinknagels vervangen is moei-

drag onder constante belasting. Het effect van een kortdurende belasting met een kleinere rol voor kruip is beperkt bekeken. Prof. D. Beg uit Ljubljana heeft vergelijkbare proeven uitgevoerd met overeenkomende resultaten die worden gepresenteerd in een gezamenlijke publicatie^[3].

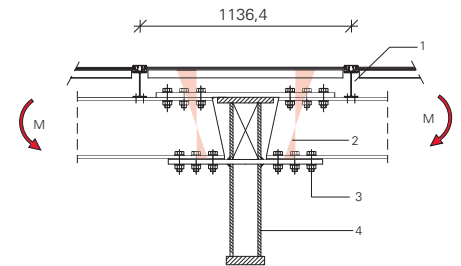
Onderzoek IJsei

Het is zeer waarschijnlijk dat voor kortdurende belastingen de toelaatbare stuikspanning door het ontbreken van kruipeffecten nog weer fors hoger ligt dan de langeduursterkte. Omdat bij Overkapping IJsei de hoogste spanning in de injectiehars ontstaat door kortdurende windvlagen is het mogelijk dit effect te benutten.

Om de toelaatbare korteduurstuikspanning te kwantificeren zijn zes proeven uitgevoerd (afb. 1). De proefstukken zijn gemaakt door de aannemer van de overkapping en hebben dezelfde (on)nauwkeurigheid als in de praktijk. Hun geometrie is conform NEN 6772 bijlage B waarbij plaatdiktes en boutdiameters overeenstemmen met de detaillering van de kap; de belasting op het proefstuk wordt door 2xM27 bouten in een 15 mm dikke plaat overgebracht. Om de montage

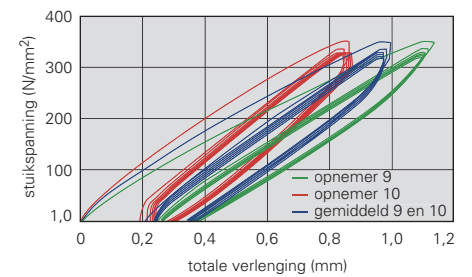


1. Proefstuk 5 in de opstelling met verplaatsingsopnemers: 8 kleine opnemers en 2 opnemers over de gehele verbinding (opnemer 09 en 10).

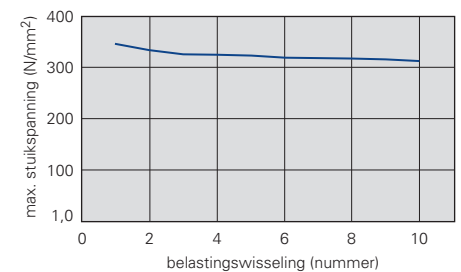


- 1 glasdrager IPE 140 A.
- 2 horizontale verplaatsing door boutgatspeling.
- 3 M27 10.9, gerold.
- 4 spant samengesteld uit platen.

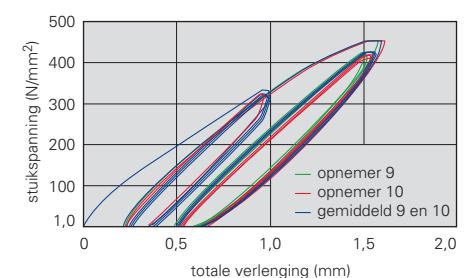
2. Opbouw glasondersteunende constructie.



3. Stuijspanning als functie van de opgelegde verplaatsing proefstuk 1.



4. Maximale stuijspanning bij achtereenvolgende belastingswisselingen in proefstuk 1.



5. Maximale stuijspanning bij achtereenvolgende belastingswisselingen in proefstuk 5.

van de gordingen te vereenvoudigen, zijn de gordingen voorzien van ruime gaten (+ 5 mm); de 15 mm dikke plaat heeft daarom evenals de gording een ruim gat.

De verplaatsingsopnemers 09 en 10 (afb. 1) zijn voor Overkapping IJsei de belangrijkste. Als toelaatbare vervorming in de injectiebout wordt 0,3 mm aangenomen, gelijk aan de maximale vervorming van een voorspanverbinding^[4]. De eerste proevenserie is afgebroken wanneer een (gemiddelde) verplaatsing van 0,95 mm is bereikt. Deze waarde is opgebouwd uit de verplaatsing van twee rijen verbindingen en een vooraf ingeschatte verplaatsing door rek van 0,35 mm in het proefstuk.

In ieder proefstuk zijn tien belastingcycli uitgevoerd waarbij gestuurd is op het gemiddelde van de opnemers 09 en 10. De verschillen volgen uit het niet helemaal recht zijn van het proefstuk. Het gemiddelde geeft de verplaatsing in het hart van de verbinding. De tijdsduur van één cyclus bedraagt ongeveer 30 seconden.

In afbeelding 3 is de stuikspanning in proefstuk 1 uitgezet als functie van de opgelegde verplaatsing. Daaruit blijkt dat na iedere belastingwisseling de maximale belasting iets kleiner is dan bij de voorgaande belastingwisseling. De vermindering is na de eerste belastingwisseling het grootst en convergeert daarna naar een eindwaarde, zie afbeelding 4. Let op dat bij de laatste belastingwisseling de opgelegde vervorming iets kleiner is dan bij voorgaande wisselingen waardoor de maximale stuikspanning ook iets kleiner uitvalt.

In enkele andere testen zijn na de tien belastingwisselingen nog tien belastingwisselingen met een grotere opgelegde verplaatsing uitgevoerd, namelijk tot 1,55 mm (afb. 5). Tabel 1 is een samenvatting van de belangrijkste proefresultaten. Vermoedelijk zijn de verschillen in de gemeten stuikspanningen voornamelijk veroorzaakt door verschillen in de positie van de injectiebouten in de gaten.

Bij de montage van de proefstukken (het injecteren) zijn de bouten op willekeurige posities terecht gekomen (zoals ook in de werkelijkheid het geval zal zijn). De verplaatsingen in de injectiehars worden beïnvloed

door de dikte van de harslaag en dus door de positie van de bouten in de gaten. Opgemerkt wordt dat in de standaardbeproeving volgens EN 1090-2 de bouten op de uiterste stand worden gezet (de meest ongunstige positie).

Bij een minimaal vereiste overschrijdingskans van 95% is met deze gegevens een spanning van 284 N/mm² toelaatbaar voor kortduurbelastingen. De verbindingen in Overkapping IJsei zijn getoetst aan de onderzoeksgegevens:

$$- f_{b,resin, lange\ duur} = 200 \text{ N/mm}^2;$$

$$- f_{b,resin, korte\ duur} = 280 \text{ N/mm}^2.$$

Bij onderscheid in kortdurende en langdurende belasting moet worden bedacht dat dit onderscheid conform NEN 6702 of Eurocode enkel van toepassing is op constructies waarbij kruip relatief veel tijd in beslag neemt (beton- en houtconstructies). In de kruipcombinatie volgens NEN 6702 of de Nationale Bijlage van NEN-EN 1990 worden windbelasting, sneeuwbelasting en temperatuurverschillen daarom genegeerd ($\psi = 0$). Het kruipgedrag van de injectiehars verloopt veel sneller.

Windbelasting zal geen kruip veroorzaken, sneeuwbelasting en temperatuurverschillen zijn daartoe wel in staat.

Om een goede inschatting te maken van de (middel)langdurende belasting zijn, in afwijking van de norm, ook de invloed van sneeuw en temperatuur meegenomen.

Aanvullend

In het project Overkapping IJsei is de injectiebout een belangrijk middel gebleken om de vervorming van het staal in relatie tot de glasoplegging te beperken.

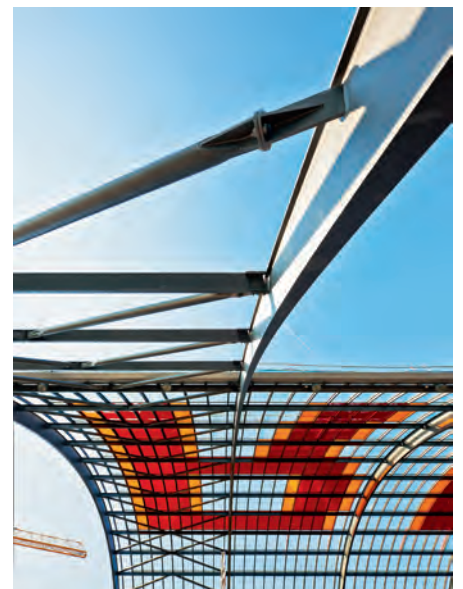
De algemeen gehanteerde grenswaarden voor stuikspanning van de injectiehars zijn conservatief.

Met laboratoriumproeven is het gelukt om het aantal injectiebouten per verbinding te beperken en zo op kosten te besparen.

Het verdient aanbeveling om in de rekenvoorschriften (Eurocode 3, deel 1-8) aanvullende regels op te nemen voor combinaties van langeduur- en kortduurbelastingen. •

Tabel 1. Samenvatting proefresultaten na 10e belastingcyclus.

proefstuk	$f_{b,resin}$ (N/mm ²)
1	317
2	287
3	298
4	323
5	309
6	299



Literatuur

1. A.M. Gresnigt, G. Sedlacek, M. Paschen, 'Injection bolts to repair old bridges', *Connections in Steel Structures IV*, Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures, 2000, Roanoke, VA, USA.
2. *European recommendations for bolted connections with injection bolts*, ECCS publicatie 79, ECCS, Brussel 1994.
3. A.M. Gresnigt, D. Beg, F.S.K. Bijlaard. 'Injection bolts in steel structures with short duration high loads', *Connections in Steel Structures VII*, Seventh International Workshop on Connections in Steel Structures, 2012, Timisoara, Romania.
4. *NEN-EN 1090-2* (Het vervaardigen van staal- en aluminiumconstructies - Deel 2: Technische eisen voor staalconstructies), 2008 + A1, 2011. 5.
5. *NEN-EN 1993-1-8* (Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen), 2006 + C2, 2011 + NB, 2011.



Met Movares reikt uw budget verder

Als uw staal-glasconstructie écht licht moet zijn

- Innovatief
- Duurzaam
- Verantwoord

Bouwen op afspraak

Bouwen op het stationseiland van Amsterdam is bouwen op de spreekwoordelijke postzegel waarbij de grens van de bouwplaats gelijk is aan het volume van de constructie. Direct aan en onder de bouwplaats liggen drukke verkeersstromen. Bouwmateriaal wordt op afspraak aangevoerd. Met 3 mm tolerantie monteren twee ploegendiensten de 4500 glasplaten het etmaal rond.

ing. B.H. Hesselink, ir.ing. H.J. van Lint,
ing. D. Markwat

Bert Hesselink en Hans van Lint zijn respectievelijk directievoerder en senior constructeur bij Movares Utrecht. Dick Markwat is projectleider bij Hollandia in Capelle aan den IJssel.

Ieder bouwproject heeft randvoorwaarden voor de uitvoering. Een deel is voor elke uitvoering gelijk: de bouwer draait routinematig op ervaring. Het andere deel is projectspecifiek. De bouw van Overkapping IJsei is zo specifiek dat vrijwel de gehele uitvoering op maat is. De Overkapping IJsei wordt in fasen gebouwd. De eerste fase heeft in 2011 plaatsgevonden en betreft de bouw van het oostelijk en westelijk kapdeel van respectievelijk 105 en 168 m, zodat inmiddels 75% van de kap is gerealiseerd. Het middendeel van de kap wordt gefundeerd op een betonconstructie die deel uitmaakt van de Noord/Zuidlijn en kan pas worden gebouwd zodra deze gereed is. Het middendeel is ook het deel waarin een van de definitieve windverbanden is gesitueerd. De huidige gerealiseerde delen worden daarom grotendeels door tijdelijke windverbanden (geel geschilderd) gestabiliseerd.

Stromen

De constructie overkapt een busplatform dat al in december 2009 in gebruik is genomen. Het busplatform ligt een niveau boven maaiveld. De ruimte eronder is deels werkterrein, maar biedt ook ruimte voor de reizigersstro-

men vanuit CS naar bijvoorbeeld de IJ-pontjes. Bovendien loopt ook de De Ruijterkade als drukke verkeersader door het te overkappen gebied. Het stationseiland is niet alleen een druk verkeersknooppunt, maar er wordt ook volcontinue gewerkt aan andere bouwprojecten op en rondom het station.

Afspraken en coördinatie

Voor de eerste fase zijn voorafgaand aan de montage afspraken gemaakt met de betrokken omgevingspartijen. Met de busmaatschappijen is overlegd over het gebruik van het stationseiland. Voor de bouw van het oostelijke deel van de kap is het busvervoer vier weken ondergebracht in een tijdelijk busstation. Tijdens de bouw van het westelijk kapdeel opereerde het busvervoer vanuit het gerealiseerde oostelijk kapdeel. Zo is het mogelijk om de bussen door te laten rijden tijdens de montage. De operatie vraagt een gedetailleerde coördinatie. Iedere stap in het werk ligt vast in een draaiboek inclusief bijvoorbeeld de kraanpositie(s) en wat er geheesen moet worden. Per dag is vastgelegd hoe de verschillende verkeersstromen moeten worden gestuurd met afzettingen en borden. Voor de bouw van de oostelijk kap zijn dertig routepaaltjes en vijftig routeplaatjes nodig.

Opslag

Bouwen op het overvolle stationseiland betekent ook een beperkte opslag. Alle onderdelen worden geleverd volgens just-in-time-principe: op het moment dat deze daadwerkelijk kunnen worden gemonteerd. De spanten worden per stramien aangevoerd. Het hiervoor benodigde transport is 37 m lang en 4 m hoog. Vooraf is getest of een dergelijk transport het stationseiland kan bereiken. Ook is gekeken of een vol beladen transport, mocht deze op het laatste moment toch niet kunnen worden gelost, de stad weer uit kan. Tijdens de montage neemt de chauffeur van het transport – vóór de afslag IJburg – contact op met de monteurs op de bouwplaats. Bij een go neemt hij de afslag.

Segmenten

De spanten worden in drie segmenten aangevoerd en op de bouwplaats samengesteld. Per boog worden derhalve twee stuiken op het werk gelast. Bij de assemblage worden twee hulptorens gebruikt, zodat elk spant op zijn definitieve positie in elkaar kan worden gezet. De tijdelijke torens hebben een werkbak en zijn uitgerust met stel mogelijkheden om de segmenten exact te positioneren. Alle in het werk gemaakte stuiklassen worden gecontroleerd met lasonderzoek.

Tolerantie

De spanten van de kap zijn gebouwd binnen een tolerantie van 5 mm, de glasdragers zelfs binnen 3 mm. Om dit te realiseren is een jaar eerder in de werkplaats al begonnen met maatvoeringscontrole en een proefmontage. Tijdens de montage worden alle 20.264 boutgaten voor de bevestiging van het glasprofiel gesteld en gecontroleerd. Hierbij is 24 uur per dag een maatvoerder aanwezig.

Korte bouwtijd

De beschikbare tijd voor de bouw van de beide kapdelen is kort: voor het oostelijk deel staat vier en voor het westelijk deel zeven weken. Om de planning niet in de war te sturen, moet volcontinue worden doorgevoerd, in nachtelijke uren, tijdens feestdagen en in de vakantieperiode. Voor de aannemer is het een hele puzzel om hiervoor voldoende personeel te krijgen. Werktijden zijn wettelijk en menselijkerwijs beperkt. Met eigen personeel en bedrijven, waarmee al jaren wordt samengewerkt, wordt de personele puzzel ingevuld. Voor de oostelijke kap wordt in drie ploegendiensten van acht uur gewerkt. Bij wisseling van de wacht blijkt de (informatie-)overdracht veel tijd in beslag te nemen. Voor de westelijke kap wordt daarom in ploegen van 12 uur gewerkt en het personeel verblijft in een nabijgelegen hotel. Dit geeft meer rust en minder informatieverlies bij overdracht, en het blijkt daardoor effectiever. •

Foto: Movares



Foto: s. Hollandia

