

BRIEFRAPPORT

Retouradres: Postbus 6012, 2600 JA Delft

Gemeente Rotterdam
T.a.v. V. Sjardee
Wilhelminakade 179
3072 AP ROTTERDAM

**Onderwerp**

Review windtunnelonderzoek De Kuip

Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 22 00

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

E-mail

chris.geurts@tno.nl

Doorkiesnummer

+31 888 663 16 2

Geachte contactpersoon,

Door Gemeente Rotterdam is TNO gevraagd een beoordeling uit te voeren van de voorliggende rapportage van het windtunnelonderzoek naar het geplande nieuwe Feyenoord Stadion te Rotterdam. Dit onderzoek is in opdracht van RoyalHaskoningDHV (verder afgekort tot RHDHV) uitgevoerd door RWDI uit de UK.

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeerd bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op www.tno.nl. Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

Beschikbare informatie

De volgende informatie is door de Gemeente Rotterdam aan TNO gestuurd:

- [1] Rapport: FEYENOORD STADIUM, ROTTERDAM, THE NETHERLANDS: WIND-INDUCED STRUCTURAL RESPONSES, RWDI #1902583, September 18, 2019, Auteurs: F. Faseli, J.B. Lankin, E. Ozkan
[2] RoyalHaskoningDHV, kenmerk BF3499IBNT2004201445, Interpretatie Windtunnelonderzoek Stadion Feyenoord

Daarnaast zijn de volgende tekeningen aangeleverd:

- [3] 'bijlage 2.8 16 doorsnedes stadion OMA versie1_13_09_2019'; Stadion met afmetingen zoals in de windtunnel doorgemeten.
[4] 'bijlage 2.18 16 doorsnedes stadion OMA versie1_06_05_2020'; aangepast ontwerp.

Algemeen

Het rapport [1] omvat een windtunnelonderzoek uitgevoerd naar de windbelastingen op de constructie van het beoogde nieuwe Feyenoord stadion te Rotterdam.

Het stadion is voorzien van een dak dat dicht kan. Er zijn twee situaties doorgemeten: het stadion met het dak open en het stadion met het dak dicht. In beide situaties zijn voor de omliggende bebouwing twee varianten beschouwd: de variant met alle omringende bebouwing aanwezig, en de variant waarbij de omliggende bebouwing tot op 15 meter is afgetopt.

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

2/8

De metingen bestaan uit metingen van de drukken die ten gevolge van de wind worden uitgeoefend op de constructie. Deze drukken worden gecombineerd om de totale belasting op de draagconstructie te bepalen.

In memo [2] is een vertaling gegeven van de resultaten van [1] naar de belasting ten behoeve van de berekening van de constructie.

Hieronder wordt allereerst de belangrijkste conclusies gegeven. Daarna volgt een uitgebreide behandeling van de stukken. Eerst wordt rapport [1] behandeld.

Daarna volgt rapport [2]. Op basis van een checklist die is opgesteld op basis van CUR Aanbeveling 103, hoofdstuk 10 is een overzicht samengesteld van de aanwezige informatie in de stukken die door TNO zijn bestudeerd. Dit overzicht is in bijlage A weergegeven.

Belangrijkste conclusies

Het windtunnelonderzoek door RWDI is een uitgebreide studie aan de hand van drukmetingen. In de rapportage ontbreken specifieke gegevens over het model, meettechniek en analyses. Hiervoor wordt verwezen naar de bijgevoegde checklist. De volgende aandachtspunten volgen uit deze review:

- In het windtunnelonderzoek wordt (voor zover af te leiden) gebruik gemaakt van reducties op de stuwdruk met de windrichting. Aanbevolen wordt de mate van reductie te beperken tot de toepassing van een coëfficiënt $c_{dir} = 0,8$ en niet lager.
- RWDI adviseert een absolute waarde voor de interne onder- dan wel overdruk in het stadion. TNO adviseert hiervoor de berekende waarde conform NEN EN 1991-1-4 te hanteren.
- Door RHDHV is een vergelijking gemaakt tussen een berekening met NEN EN 1991-1-4 en het windtunnelonderzoek. TNO heeft kanttekeningen gezet bij een aantal interpretaties. Aanbevolen wordt dit memo aan te passen op basis van deze bevindingen.

Windtunnelonderzoek van RWDI [1]

Het rapport heeft de volgende opbouw:

- Hoofdstuk 1 geeft een korte introductie op het onderzoek en geeft als doel het bepalen van de 'overall' windbelasting ten behoeve van de hoofdconstructie van het stadion. Er is dus geen analyse uitgevoerd voor de lokale belastingen.
- Hoofdstuk 2 beschrijft dat gebruik is gemaakt van drukmetingen die worden geïntegreerd om daarmee de totale belastingen te verkrijgen. Een beknopte omschrijving van de modellering van gebouw en omgeving is gegeven.
- Hoofdstuk 3 is een algemene beschrijving van de methode waarmee de gemeten drukken worden omgerekend naar totale belastingen.
- Hoofdstuk 4 omschrijft welke de in rekening te brengen belastinggevallen zijn. Onder 4.1 wordt verwezen naar een extern bestand Table 1.xlsx'. De inhoud van deze spreadsheet is weergegeven in het rapport (Annex 1 en Annex 2)
- In hoofdstuk 5 staan bepalingen ten aanzien van het gebruik van de resultaten.

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

3/8

- Appendix A geeft een lijst van gebruikte tekeningen voor het bouwen van het model (deze tekeningen zijn niet meegeleverd).
- Appendix B geeft de procedures die van toepassing zijn in het windtunnelonderzoek.
- Appendix C is de omschrijving van de methodes voor de analyse van het windtunnelonderzoek om de belasting op daken te bepalen.
- Annexen 1 en 2 geven in tabelvorm de belastingen die horen bij de in hoofdstuk 4 beschreven belastinggevallen.

Deze hoofdstukken en bijlagen worden hieronder stuk voor stuk gereviewed.

Hoofdstuk 1

Dit hoofdstuk geeft kort weer wat het doel van de meting is (totale belasting voor de berekening van de draagconstructie van het Feyenoord Stadion). Er wordt in het rapport niet ingegaan op de lokale belastingen (ten behoeve van gevels en dakbedekking). Deze is daarom niet door TNO beschouwd.

Hoofdstuk 2

2.1.1. beschrijft de schaal van het model en de bestudeerde configuraties. Deze eigenschappen komen overeen met de aanbevelingen van CUR Aanbeveling 103. De tekeningen op basis waarvan het model is gemaakt zijn niet beoordeeld.

Onder 2.1.2. wordt de specificatie van de terreinruwheid in algemene zin beschreven: "terrain conditions similar to Eurocode Category's II and III". Er zijn geen waarden voor de ruwheidslengte gegeven. Informatie over de profielen van de gemiddelde windsnelheid en turbulentie intensiteit is niet gegeven.

Onder 2.1.3. is omschreven hoe met het windklimaat is omgegaan. Verwezen wordt naar data van vliegveld Rotterdam. De gebruikte bron van deze data is niet gegeven. De meetperiode die is gebruikt voor de analyse van het windklimaat is niet gegeven. Ook is niet omschreven of en hoe er correcties zijn doorgevoerd voor de vertaling van de meteometingen naar de basis omstandigheden conform de Eurocode. TNO merkt op dat KNMI gegevens openbaar beschikbaar zijn in de vorm van potentiële windsnelheden ($z_0 = 3$ cm, uurgemiddelden) voor lange meetperiodes, en dat dit afwijkt van de definitie van de basis windsnelheid in de Eurocode ($z_0 = 5$ cm, 10 minuten gemiddelden).

In figuur 3 (onderste figuur) is de relatie tussen windsnelheid en herhalingsstijd gegeven. Uit deze figuur volgt een waarde van 27 m/s bij een herhalingsstijd van 50 jaar voor Rotterdam. Dit is de waarde die in de nationale bijlage als basiswaarde voor windgebied II wordt gebruikt, waarmee (impliciet) aangesloten wordt bij de definitie van NEN EN 1991-1-4, en het resultaat van de meting ook als zodanig van toepassing is.

Er is in figuur 3 een windroos gegeven voor de extreme windsnelheden (rechter figuur). Gebruik van deze windroos impliceert het toepassen van een factor $c_{dir} < 1$ voor de meeste windrichtingen. Gebruik van deze waarden moet worden verantwoord in het rapport. Deze verantwoording ontbreekt. Door TNO wordt

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

4/8

geadviseerd om de reductie voor windrichtingen te beperken. Een minimale waarde van $c_{dir} = 0,8$ wordt aanbevolen. Dit houdt in dat per windrichtingen altijd minimaal $0,8 \cdot 27 = 21,6$ m/s als basiswindsnelheid wordt toegepast. In figuur 3 is in elk geval voor de windrichtingen tussen 0 en 180 graden een lagere windsnelheid gegeven. Geadviseerd wordt de bijbehorende belastingcombinaties te baseren op ten minste deze minimaal te hanteren basiswindsnelheid.

Onder 2.2 'criteria' wordt verwezen naar NEN EN 1991-1-4, artikel 1.5. Er wordt niet nader gemotiveerd waaruit blijkt dat voldaan wordt aan dit artikel. Opgemerkt wordt dat NEN EN 1991-1-4 (via de NB) verwijst naar CUR Aanbeveling 103. In het rapport van RWDI is geen expliciete verwijzing naar die aanbeveling gemaakt. In het memo van RHDHV [2] wordt omschreven dat het onderzoek conform CUR Aanbeveling 103 is uitgevoerd.

Hoofdstuk 3

Hoofdstuk 3 geeft de generieke omschrijving hoe de belastingen zijn bepaald uit de uitgevoerde drukmetingen. Verwezen wordt naar bijlage C voor een uitgebreide omschrijving van de achtergronden bij de methode.

De volgende belastingen worden beschreven:

- Overall vertical loadings on the Roof
- Overall vertical loadings on each part of the roof (North Super Truss, South Super Truss, North Fixed Roof, South Fixed Roof, Full Central Roof, East Central Fixed, West Central Fixed, East operable panel, West Operable Panel, North East Corner, South East Corner, South West Corner, North West Corner);
- Unbalanced Vertical Loadings on selected portions of the roof related to the roof mode shapes;
- Vertical loading on each of the trusses
- Overall lateral loadings

Een duidelijke omschrijving van wat bedoeld wordt met 'unbalanced vertical loadings' en 'overall lateral loadings' ontbreekt. De overall lateral loading is, zoals blijkt uit de resultaten, de horizontale belasting op de constructie.

Er is in de resultaten ook rekening gehouden met de dynamische respons van de constructie. Ook hier wordt een 'lateral' trilling beschreven zonder heldere definitie wat ermee wordt bedoeld.

Er is beschreven dat de mode shapes en eigenfrequenties zijn ontvangen en verwerkt. De bijbehorende waarden zijn niet genoemd. Aangegeven is dat voor de 'overall lateral loads' deze informatie niet beschikbaar was (deze is waarschijnlijk niet relevant, omdat het stadion een hoge stijfheid heeft).

TNO adviseert om expliciet te benoemen wat onder de unbalanced vertical loading wordt verstaan, en de gebruikte uitgangspunten voor de dynamische respons vast te leggen in de rapportage.

Er is omschreven dat voor de interne druk waarden gelijk aan 0,2 kPa of -0,2 kPa zijn gebruikt. Deze waarden zijn niet gebaseerd op een interne drukcoëfficiënt, maar zijn absoluut gegeven. In het memo van RHDHV is een interne coëfficiënt van +0,2 en -0,3 gegeven, wat, met de gebruikte referentiestuwdruk van 1,43 kN/m², een interne druk geeft van +0,28 kPa of -0,43 kPa. De motivering van

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

5/8

toepassing van 0,2 kPa door RWDI ontbreekt en komt dus niet overeen met de waarde die door RHDHV is afgeleid op basis van NEN EN 1991-1-4. Aanbevolen wordt uit te gaan van de waarden zoals die uit NEN-EN 1991-1-4 volgen.

Hoofdstuk 4

Hoofdstuk 4 geeft het overzicht van de in rekening te brengen belastinggevallen. Als uitgangspunt is geformuleerd: "The wind loads provided in this report are based on the 27 m/s 10-minute mean wind speed described in Section 2.2." Het is niet expliciet gemaakt of dit betekent dat de windrichtingsafhankelijkheid wel of niet is meegenomen in de analyse. (vermoedelijk is dit wel gebeurd, wat blijkt uit vergelijking van load cases voor windrichtingen die 180 graden ten opzichte van elkaar zijn gedraaid).

Een ander uitgangspunt betreft: "To make some allowance for possible future changes in surroundings, the pressures in these load cases do not go below a minimum of +0.2 kPa and -0.4 kPa"

Deze motivering is impliciet, niet duidelijk is wat de begrenzing is van deze motivering, ofwel wanneer past een toekomstige verandering wel of niet binnen de gemaakte keuzes. Dit zal nooit dichtgetimmerd kunnen worden, maar een aantal voorbeelden van situaties die hier wel of niet toe behoren kan veel verduidelijken. Het kiezen van een minimum belasting voor overdruk of onderdruk is een keuze die door TNO onderschreven kan worden.

Hoofdstuk 5

In dit hoofdstuk staat toegelicht wat de invloed is van de omgeving, en hoe met toekomstige ontwikkelingen moet worden omgegaan.

Er wordt voor de belastingen gerefereerd naar de informatie over eigenfrequenties en trilvormen die in juli en augustus 2019 door RWDI zijn ontvangen. Deze informatie is echter niet opgenomen in het rapport. Ook ontbreekt een referentie naar de documenten waar deze informatie is terug te vinden. Geadviseerd wordt deze informatie expliciet te benoemen.

Figures

Foto's van model in de windtunnel zijn gegeven. Daarnaast zijn tekeningen gegeven van de zones die zijn gedefinieerd om de gemeten drukken te vertalen naar belastingen op de hoofdconstructie.

Appendix A

Deze appendix geeft een lijst met tekeningen (de tekeningen zelf zijn niet meegeleverd) die zijn gebruikt voor het maken van het windtunnelmodel.

Appendix B

Deze bijlage geeft een beschrijving van de windtunnelprocedures van RWDI voor het bepalen van de windbelasting op de buitenschil. Het is een generieke omschrijving van de analyse stappen die worden uitgevoerd en van de meettechniek die wordt gebruikt. In deze bijlage worden geen concrete uitgangspunten en tussenresultaten gegeven die specifiek zijn voor het windtunnelonderzoek aan het Feyenoord stadion. Dergelijke specifieke informatie betreft onder meer de profielen van gemiddelde windsnelheid en turbulentie, de bemonsteringsfrequentie en informatie over de totstandkoming van het

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

6/8

windklimaatmodel en de wijze waarop dit model leidt tot de gepresenteerde resultaten. Deze zijn niet in het rapport terug te vinden. Paragraaf B.1.4 is niet relevant voor de bepaling van de belastingen op de draagconstructie.

Appendix C

Deze bijlage geeft de achtergrond bij het bepalen van windbelastingen op daken met aandacht voor met name de analyse van drukmetingen om tot de geïntegreerde belastingeffecten op het constructief systeem te komen.

Onder C.2 wordt de procedure gegeven om tot de belastinggevallen te komen, op basis van enerzijds de uitkomsten van het windtunnelonderzoek en anderzijds de wijze waarop de constructie de krachten afdraagt. Hierbij wordt aangegeven dat deze gevallen in overleg met de constructeur worden bepaald. Onduidelijk is of dit overleg heeft plaatsgevonden. RHDHV komt in [2] met een nadere interpretatie van het windtunnelonderzoek op basis van de resultaten van RWDI.

C.3 geeft aan hoe C.2 wordt gebruikt bij windtunnelonderzoek.

C.4 geeft aan hoe de dynamische respons van de constructie wordt verrekend bij de bepaling van de belastingen op het dak. C.5 en C.6 beschrijven de verdere bewerkingen om te komen tot belastingen waarbij zowel de achtergrondfluctuaties (ten gevolge van turbulentie) en de dynamische fluctuaties (als gevolg van resonantie) zijn verrekend. Er is niet omschreven hoe dit specifiek voor het Feyenoord Stadion is toegepast, welke uitgangspunten zijn gehanteerd, eventuele tussenresultaten en hoe dit heeft geleid tot de van toepassing zijnde belastinggevallen. Aanbevolen wordt deze informatie ter beschikking te stellen.

Annex 1: Results Closed Roof en Annex 2: Results Open Roof

Deze bijlagen geven voor de situaties met respectievelijk het gesloten dak en het open dak een overzicht van de in rekening te brengen belastinggevallen. Hiervoor zijn per zone (per meetpunt) de voor dat belastinggeval in rekening te brengen karakteristieke waarde voor de belasting (in kPa) gegeven.

Deze waarden zijn daarnaast in een afzonderlijke Excel tabel aangeleverd.

Per belastinggeval is beschreven bij welke windrichting de maatgevend situatie wordt gevonden en welke de waarden zijn die (gegeven die windrichting) van toepassing zijn.

De maatgevende windrichting is bij de verschillende belastinggevallen verschillend. Het is niet expliciet gemaakt in het rapport hoe omgegaan is met windrichtingsafhankelijkheid (de windroos, zie opmerkingen bij hoofdstuk 2). Als deze meegenomen is in de gerapporteerde belastinggevallen heeft deze een grote invloed met name voor de belastinggevallen bij de oostelijke helft van de windroos.

Door TNO wordt aanbevolen om, ten opzichte van de situatie waarbij geen rekening gehouden wordt met de windrichtingen, een equivalent voor C_{dir} te hanteren van 0,8 of hoger, ofwel een maximale reductie van 36% van de belastingen ($0,8 \cdot 0,8 = 0,64$ als factor op de belasting).

Als in de belastinggevallen die nu zijn gepresenteerd gebruik is gemaakt van de reducties in de windroos op basis van hoofdstuk 2, wordt aanbevolen de berekende waarden te corrigeren voor dit verschil, voor de windrichtingen met een $C_{dir} < 0,8$. In dat geval worden de belastingen bij de oostelijke windrichtingen

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

7/8

hoger, en dit kan ook betekenen dat mogelijk een andere windrichting maatgevend wordt. Dit is door TNO niet in te schatten op basis van de voorliggende informatie.

Memo RoyalHaskoningDHV “interpretatie windbelastingen” [2]

Dit memo is geschreven om een vergelijking te maken tussen het windtunnelonderzoek en een interpretatie van de norm (NEN-EN 1991-1-4). Tevens is het windtunnelonderzoek nader geïnterpreteerd ten behoeve van de constructieberekening.

Voor de belasting op de onderbouw (horizontale belasting door wind) wordt door RHDHV geen gebruik gemaakt van het windtunnelonderzoek maar worden de factoren uit NEN-EN 1991-1-4 gebruikt. Dit is een conservatieve aanname ten opzichte van het windtunnelonderzoek.

Voor de kapconstructie is voor de gesloten situatie een vergelijking gemaakt tussen EN 1991-1-4 en het windtunnelonderzoek. Voor de open situatie is beargumenteerd dat een dergelijke vergelijking niet mogelijk is. Deze situatie is niet opgenomen in de norm.

Bij de interpretatie van de normgegevens wordt (pagina 3) aangegeven dat voor zone A uit figuur 7.11 van NEN-EN 1991-1-4 een interpolatie wordt toegepast. Interpoleren tussen een positieve en negatieve drukcoëfficiënt is niet geoorloofd, omdat dan tussen twee fysisch verschillende fenomenen wordt geïnterpoleerd (drukopbouw versus stromingsloslating). Omdat het hier een situatie betreft waarbij de f/d verhouding zeer laag is bij een $h/d < 0,5$, ligt het voor de hand dat de druk coëfficiënten eerder naar die voor platte daken bewegen. De c_{pe} voor zone A zal dan ongeveer op -1,0 uitkomen. Geadviseerd wordt om voor zone A zowel de waarde -1,0 te gebruiken als een waarde gelijk aan +0,1

Er wordt een ‘gemiddelde’ druk coëfficiënt van -0,58 gegeven. Dit is het gemiddelde van -0,43, 0,75 en -0,55. Bij deze middeling lijkt geen weging te zijn toegepast voor het oppervlak waarop deze coëfficiënten werken. Met een coëfficiënt voor zone A van -1,0 in plaats van -0,43 verandert ook deze gemiddelde coëfficiënt. Geadviseerd wordt dit aan te passen.

Op pagina 4 wordt een vertaling gemaakt van de belastinggevallen die door RWDI zijn gerapporteerd tot contourplots waarin de ongunstigste waarden voor zowel de naar beneden gerichte als de naar boven gerichte belasting zijn opgenomen.

In de tabel op pagina 4 is een vergelijking gegeven tussen het windtunnelonderzoek en de inschatting van RHDHV op basis van NEN-EN 1991-1-4. Hierbij zijn belastingen voor neerwaarts en opwaarts gegeven van 0,5 respectievelijk -0,92 kN/m². Onduidelijk is hoe deze waarden zijn gevonden als resultaat uit de gepresenteerde contourplots.

Daarbij is in deze tabel voor het windtunnelonderzoek de interne druk gebruikt zoals RWDI die aanhoudt. Geadviseerd is om daarvoor uit te gaan van NEN EN 1991-1-4 zoals door RHDHV in haar eigen berekeningen gedaan, en ook om voor zone A een hogere waarde voor zuiging te gebruiken ($c_{pe} = -1,0$)

Datum

17 september 2020

Onze referentie

TNO 2020 M11417 Briefrapport

Blad

8/8

Op pagina 5 van het document wordt uit een vergelijking tussen de windbelasting en de verticale belasting uit eigen gewicht en sneeuw geconcludeerd dat deze maatgevend zijn voor het ontwerp van de constructie.

De windbelasting op gevel- en dakelementen is door TNO niet beschouwd.

In een laatste opmerking wordt aangegeven dat de totale hoogte van het stadion hoger is dan in het windtunnelonderzoek aangehouden. Een opschaling van de belastingen conform de verhouding van de stuwdrukken is uitgevoerd. Dit wordt als een redelijk uitgangspunt beschouwd.

Aanbevolen wordt de waarden in dit memo aan te passen op basis van hierboven gegeven commentaren:

Aanpassen interne druk in samenhang met de windtunnelresultaten.

Herbeschouwing van de windbelasting op de gebogen dakvorm (zones A, B en C).

Hoogachtend,



Dr.ir. C.P.W. Geurts
Senior Research Consultant

Review



Ir. A.J. Bronkhorst
Research Consultant

Goedkeuring



Dr.ir. T.G.H. Basten
Research Manager Structural Dynamics