



BEREKENING BEWEGINGS- MECHANISMEN

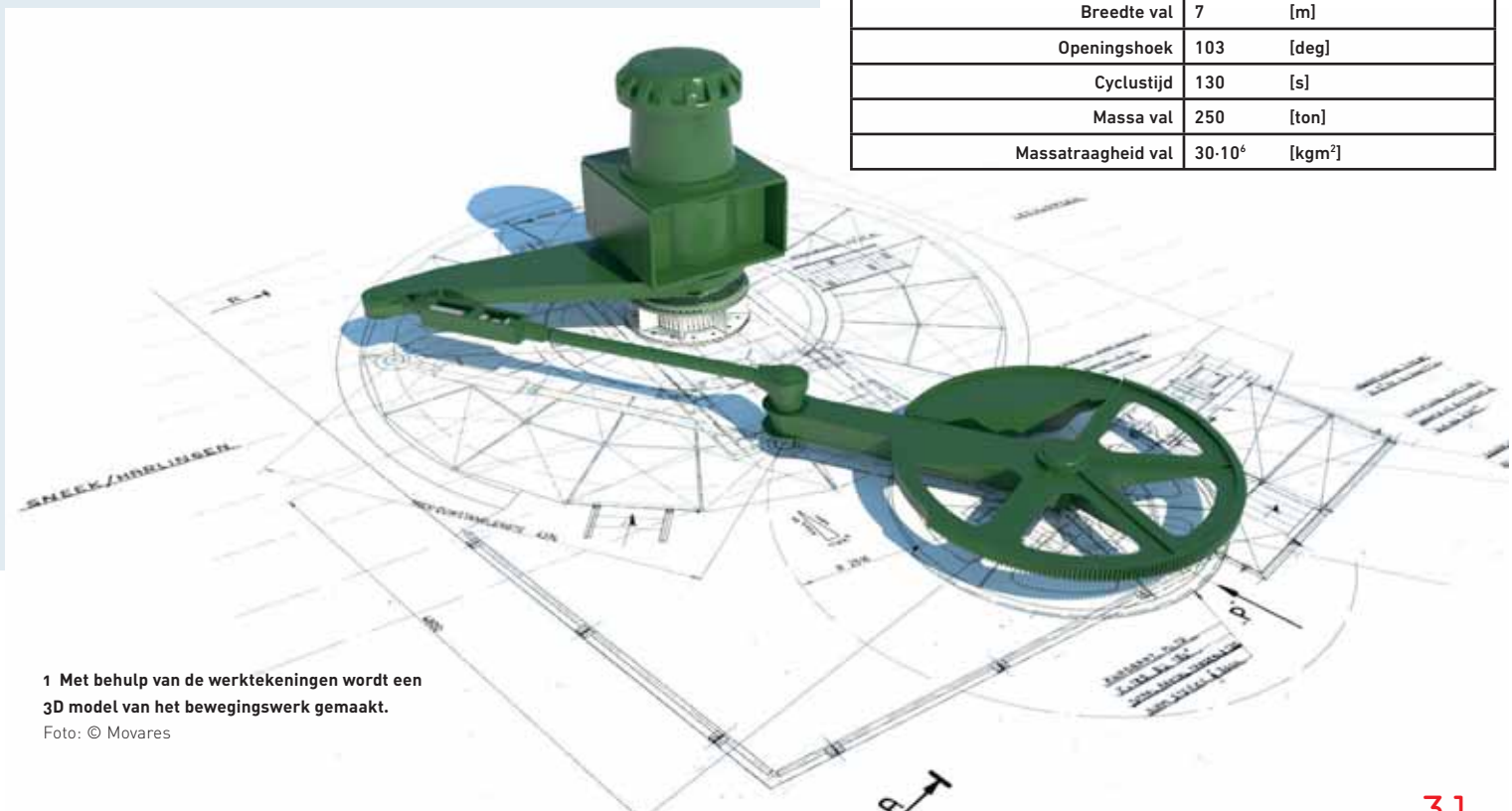
Auteur: ir. B.G. (Bob) Bijlsma, constructeur, Movares Nederland B.V.

In het maartnummer van *BRUGGEN* is aandacht besteed aan het herberekenen van beweegbare bruggen, waarbij op een empirische wijze een stappenplan is ontwikkeld om deze herberekening uit te voeren. Sindsdien houdt dit onderwerp de gemoederen bezig: Movares heeft een onderzoek op brugbewegingsmechanismen uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van dynamische simulaties en waarbij de verkregen resultaten vergeleken zijn met de belastingen, die zijn berekend met NEN 6786. De Antea Groep pakt het fundamenteel aan en kondigt een wetenschappelijk onderzoek aan dat moet leiden tot een realistisch model om de levensduur van brugbewegingsmechanismen te beoordelen.



Tabel 1 – Eigenschappen van de brug HRM103°

Brug	HRM 103°	
Vaarweg	Van Harinxmakanaal	
Spoorlijn	Leeuwarden – Harlingen/Stavoren	
Bouwjaar bewegingswerk	1977	
Lengte	37	[m]
Breedte val	7	[m]
Openingshoek	103	[deg]
Cyclustijd	130	[s]
Massa val	250	[ton]
Massatraagheid val	30·10 ⁶	[kgm ²]



1 Met behulp van de werktekeningen wordt een 3D model van het bewegingswerk gemaakt.

Foto: © Movares

DYNAMISCHE SIMULATIES MEER INZICHT IN BELASTINGEN OP BEWEGINGSWERKEN

Bewegingswerken van beweegbare bruggen moeten worden ontworpen aan de hand van NEN 6786 (VOBB:2001). De belastingen waar een bewegingswerk op wordt getoetst zijn in deze norm bepaald aan de hand van verschillende situaties die voor kunnen komen tijdens een brugbeweging. Voor elke situatie is een algemene rekenregel opgesteld, die geldig is voor de meeste brugtypen en bewegingsmechanismen. Omdat de rekenregels per definitie conservatief zijn is het niet direct inzichtelijk hoe nauwkeurig de formules de werkelijkheid benaderen.

Om beter inzicht te krijgen in het gedrag van bewegingswerken heeft Movares een onderzoek uitgevoerd waarbij gebruik is gemaakt van dynamische simulaties en hebben we de verkregen resultaten vergeleken met de belastingen die zijn berekend met NEN 6786.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee spoorbruggen over het Van Harinxmakanaal nabij Leeuwarden, waarbij de HRM103° als voorbeeld is gebruikt in dit artikel.

2 In de grafiek is voor beide methoden de waarde van het optredend moment op de motoras weergegeven bij het uitvoeren van een noodstop.

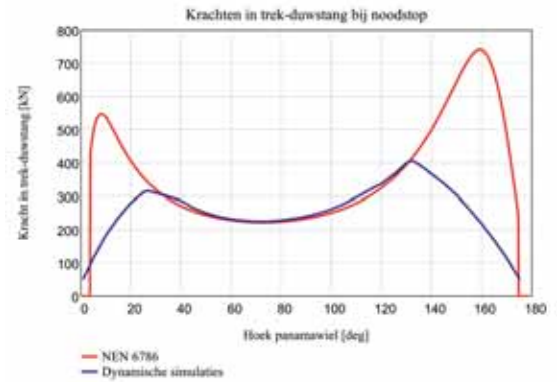
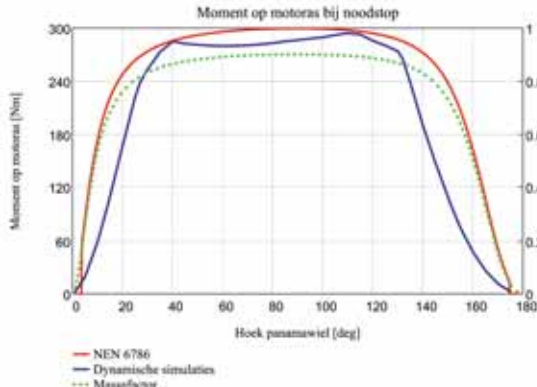
Foto: © Movares

3 In de grafiek is voor beide methoden de waarde van de kracht in de trek-duwstang weergegeven bij het uitvoeren van een noodstop.

Foto: © Movares

↓ Overzichtsfoto brugpijler HRM103°.

Foto: © Movares



Om beter inzicht te krijgen in het gedrag van bewegingswerken heeft Movares een onderzoek uitgevoerd waarbij gebruik is gemaakt van dynamische simulaties en zijn de verkregen resultaten vergeleken met de belastingen die zijn berekend met NEN 6786.

AANLEIDING

De beheerder van de twee spoorbruggen is ProRail. Mede naar aanleiding van wijzigingen aan de bruggen is besloten de bruggen van CE-markering te gaan voorzien. Het is dan noodzakelijk om onder andere de constructieve veiligheid van de bewegingswerken te toetsen aan de 'huidige stand der techniek'. Concreet betekent dit dat het bewegingswerk moet voldoen aan de vigerende normen en richtlijnen. Het stappenplan dat gehanteerd wordt bij het herberekenen van bestaande bewegingswerken van beweegbare bruggen, is toegepast voor deze twee spoorbruggen. In het maartnummer van dit jaar van het blad *Bruggen* is het stappenplan door Movares beschreven.

In beginsel moeten spoorbruggen voldoen aan de Ontwerpvoorschriften van ProRail, de OVS. In de OVS00030-4, 'Kunstwerken voor spoorverkeer – Beweegbare Bruggen' staat beschreven dat het bewegingswerk van een spoorbrug moet voldoen aan belastingen die bepaald zijn met NEN6786. Een belangrijk criterium in deze norm, in het kader van veiligheid, is dat de tijd waarbinnen de bruggen tot stilstand moeten zijn gebracht bij het uitvoeren van een noodstop (stopcategorie 0) niet meer dan 6 seconden mag zijn. Op basis van een globale toets is gebleken dat beide spoorbruggen niet aan deze noodstopeis voldoen.

Als het remkoppel van de bruggen zodanig hoog wordt afgesteld dat wel aan de noodstopeis wordt voldaan, dan blijkt vervolgens dat veel onderdelen van het bewegingswerk niet meer voldoen.

Het uitvoeren van verfijndere berekeningen kan er toe leiden dat de constructieve integriteit van de onderdelen die aanvankelijk niet voldoen, alsnog kan worden aangetoond. Verfijndere berekeningen kunnen onder andere betrekking hebben op de capaciteit van de onderdelen of op de optredende belastingen. Het uitvoeren van dynamische simulaties is een manier om beter inzicht te krijgen in de optredende belastingen en kan naast, of als toevoeging op NEN 6786 worden toegepast.

Voor het maken van een vergelijking tussen de bestaande rekenregels in NEN 6786 en het toepassen van dynamische simulaties, zijn met beide methodes de optredende belastingen bepaald in een specifieke situatie dat er een noodstop wordt uitgevoerd tijdens de brugbeweging.

NEN 6786

De rekenregel om de maximale belasting bij een noodstop te berekenen, wordt aangeduid als 'Invallen van remkoppel op volle snelheid' en wordt berekend met de formule:

$$M_{UGT;d} = \phi_a \cdot \varepsilon \cdot M_{br;d} + |1 - \phi_a \cdot \varepsilon| \cdot M_{S;d}$$

is de dynamische vergrotingsfactor en is in NEN 6786 gelijk gesteld aan 1,9.

De massafactor is in de norm gedefinieerd als:

$$\varepsilon = \frac{1,2 \cdot I_2}{I_1 + 1,2 \cdot I_2}$$

De massafactor is afhankelijk van de stand van de brug omdat de grootte van I_2 (het massastraagheidsmoment van de brug herleid naar de motoras), afhankelijk is van de overbrengverhouding tussen de brug en de motor, het verloop is weergegeven in afbeelding 2 met een groene stippellijn. De hoek van het panamawiel is uitgezet op de horizontaal, omdat deze vrijheidsgraad bij veel bewegingswerken 180 graden is. De rekenwaarde van het remkoppel is zodanig bepaald dat de noodstoptijd van 6 seconden niet wordt overschreden.

Een ongelijkmatige windbelasting op de (flank van de) brug kan ervoor zorgen dat er een moment wordt uitgeoefend op de draai-as van de brug. Dit koppel is verwerkt in en is de rekenwaarde van het statisch koppel op het bewegingswerk. Interne wrijvingen in het systeem hebben een gunstig effect op de noodstoptijd en zijn daarom conform de norm niet meegenomen in de berekening.

Het verloop van het moment op de motoras is met een rode lijn weergegeven in figuur 2. De maximale waarde voor is gelijk aan 300 Nm.

Om beide methodes goed met elkaar te vergelijken, is het moment op de motoras omgerekend naar de kracht in de trek-duwstang, weergegeven met de rode lijn in figuur 3. In deze grafiek zijn duidelijk twee pieken zichtbaar waar de kracht in de trek-duwstang maximaal is. De vorm van deze grafiek is karakteristiek voor draaibruggen met dit type bewegingswerk. Bij de hoek waar de maximale kracht optreedt, is de combinatie van het remkoppel, de stand van de brug en de hoeksnelheid dusdanig dat de kinetische energie van de brug voor het grootste deel in veerenergie wordt omgezet. De maximale waarde van de kracht is gelijk aan 720 kN en treedt op als het panamawiel een hoek van 160 graden heeft gemaakt.

DYNAMISCHE SIMULATIES

Voor het uitvoeren van de dynamische simulaties is gebruik gemaakt van het programma Autodesk Inventor 2016 waarin een module is opgenomen waarmee dergelijke berekeningen op numerieke wijze uitgevoerd kunnen worden. Met behulp van een 3D-model kunnen de exacte bewegingen en de optredende krachten nauwkeurig worden berekend. Alle onderdelen van het panamakrukmechanisme zijn in het model als oneindig stijf aangenomen.

Van het panamakrukmechanisme en het brugval is een 3D-model gemaakt, de trek-duwstang is in dit model nauwkeurig gemodelleerd zodat de werking van de ingebouwde veer overeenkomt met de werkelijkheid.



↑ Brug HRM103°. Foto: © Movares

De motorsnelheid, massatraagheden en remkoppels zijn gereduceerd naar het panamawiel waardoor het systeem is vereenvoudigd tot het vierstangenmechanisme dat is weergegeven in afbeelding 1 (het brugval is niet weergegeven). De belastingen en de bijbehorende belastingfactoren die volgens NEN 6786 moeten worden gehanteerd, zijn in het dynamische model verwerkt.

Bij verschillende standen van het bewegingswerk is vervolgens een noodstop uitgevoerd waarbij de kracht in de trek-duwstang is berekend met de simulatie, het resultaat is weergegeven met de blauwe lijn in afbeelding 3. Het moment dat hierdoor optreedt ter plaatse van de motoras is weergegeven met een blauwe lijn in afbeelding 2. De maximale kracht die optreedt in de trek-duwstang bedraagt 405 kN en treedt op bij een hoek van 130 graden van het panamawiel, dus veel eerder dan volgens NEN 6786. Het maximale moment heeft een waarde van 295 Nm.

VERGELIJKING VAN DE METHODES

De twee grafieken laten heel duidelijk de gelijkenissen en de verschillen zien tussen de twee methodes. Wat opvalt is dat zodra een noodstop wordt uitgevoerd tussen de 30 en 130 graden, er nauwelijks verschil is tussen de grootte van de krachten en momenten, terwijl buiten dit gebied deze waarden juist significant van elkaar verschillen. Het feit dat met NEN 6786 zo een hoge kracht in de trek-duwstang wordt berekend, komt doordat het moment op de motoras volgens deze methode over een relatief groot gebied een hoge waarde heeft (tussen 10 en 160 graden ligt deze waarde boven de 180 Nm). De oorzaak hiervan is weer terug te leiden naar de massafactor, die hetzelfde verloop heeft. Het lijkt er op dat de massafactor juist gedefinieerd is voor het bepalen van het maximale moment (in dit geval is dit tussen de 30 en 130 graden), maar minder geschikt is voor de gehele beweging. Vooral bij bewegingswerken met een sterk veranderlijke overbrengverhouding, zoals bij dit soort bewegingswerken het geval is, kan het gebruik van de algemene rekenregels in extreme standen leiden tot onnauwkeurigheden in de resultaten. Tevens is in het dynamisch model de invloed van het verende element

in de trek-duwstang meegenomen in het bepalen van de optredende belastingen, wat niet het geval is bij de methode volgens NEN 6786.

Door gebruik te maken van dynamische simulaties is meer inzicht verkregen in het verloop van de optredende belastingen en het bepalen van de maximale optredende waarden, wat een positieve invloed kan hebben bij het (her)berekenen van bewegingswerken van beweegbare bruggen. Mogelijk kan een reductie worden gehaald van ruim 40%, waarbij als kanttekening vermeld moet worden dat het dynamisch model binnenkort gevalideerd zal worden aan de hand van praktijktesten.

BEWEGINGSWERK

Beide spoorbruggen worden geopend en gesloten via een zogenaamd panamakrukmechanisme. Het panamawiel wordt via een open tandwieloverbrenging en een tandwielkast aangedreven door een ongeregelde elektromotor. De kruk van het panamawiel is verbonden aan een zogenaamde trek-duwstang. Via de trek-duwstang wordt de bewegingsarm aangedreven die aan de brug vastzit.

In de gesloten en geheel open positie van de brug staan de arm van het panamawiel en de werklijn van de trek-duwstang in elkaars verlengde. Hierdoor heeft een rotatie van het panamawiel in deze standen nauwelijks rotatie van het brugval tot gevolg. Het brugval wordt op deze wijze langzaam versneld en vertraagd. Dit mechanisme is tot de jaren '80 (en wordt door ProRail nog steeds) toegepast bij bewegingswerken die aangedreven worden door een ongeregelde elektromotor.

TREK-DUWSTANG

In de trek-duwstang is een veer geplaatst. Met een verend element in de aandrijving kan een snelheidsverschil tussen de brug en de aandrijving worden opgevangen. Tevens kan met de veer (een deel van) de kinetische energie van de brug omgezet worden in veerenergie als er een noodstop wordt uitgevoerd. De dubbelwerkende veer is uitgevoerd als een stapeling van schotelveren en laat toe dat de trek-duwstang zowel korter als langer kan worden. De veer is voorgespannen zodat deze zich bij een normale bewegingscyclus van de brug gedraagt als een star element. De indrukking van de veer is beperkt tot 50 mm.



De trek-duwstang is nauwkeurig gemodelleerd zodat de werking van de veer overeenkomt met de werkelijkheid.

Foto: © Movares