

Metingen laten zien wat paalmatras krijgt te verduren

In een paalmatras bij Woerden worden metingen uitgevoerd, die onder meer een beeld geven van wat er gebeurt tijdens de passage van een vrachtwagen. Een aangepast ontwerpmodel voor paalmatrasen blijkt betere overeenkomsten met de metingen te geven dan de huidige richtlijn CUR226.

IR. S.J.M. VAN EEKELN / PROF.DR.IR. A. BEZUIJEN /
ING. P.G. VAN DUJNEN

In 2010 is de Nederlandse ontwerprijlijn voor paalmatrasen uitgebracht, CUR226. Om deze verder te optimaliseren, zijn laboratoriumproeven uitgevoerd. Deze hebben geleid tot een voorstel om het ontwerpmodel aan te passen, wat een besparing op de aanlegkosten van een paalmatras kan geven. Veldmetingen in een paalmatras bij Woerden moeten aantonen of het verantwoord is deze aanpassing door te voeren.

Ontwerpmodel paalmatrasen

De verticale belasting op en in een paalmatras wordt in twee stappen omgerekend naar een rek in de geokunststof wapening (GR, Geosynthetic Reinforcement). Stap 1 splitst de belasting in twee delen. Het eerste belastingdeel (A) gaat rechtstreeks naar de palen. Door boogwerking is belasting deel A relatief groot – daarom noemen we A ook wel de 'boogwerking'. Het andere deel (de 'rest') is de invoer voor stap 2, die de rek in de GR berekent. Hiervoor wordt alleen de GR-strook tussen twee palen beschouwd.

CUR226 gaat ervan uit dat de restbelasting een driehoekige verdeling heeft, met de maximale belasting in het midden tussen twee palen.

IN 'T KORT - MONITORING

- Verticale belasting op paalmatras wordt omgerekend naar rek in geokunststof wapening
- Na laboratoriumproeven aanpassingen voorgesteld op Ontwerprijlijn CUR226
- Langetermijmetingen in paalmatras Woerden gestart in voorjaar 2010
- Belastingverdeling lijkt meer op inverse driehoek dan op driehoek uit richtlijn



Aanbrengen van de meetinstrumenten in de paalmatras bij Woerden.

Na laboratoriumproeven stelt Deltares voor om een inverse driehoek te gebruiken, met de maximale belasting aan de rand van de paal. Dit model geeft kleinere GR-rekken. Hierdoor is voor een bepaalde geometrie een minder sterk GR nodig, of kunnen bij gelijkblijvende GR de palen verder uit elkaar worden geplaatst.

Metingen Woerden

In juni 2010 is een nieuwe, ruimere afslag van de A12 bij Woerden in gebruik genomen. Een groot deel ervan is aangelegd op een paalmatras, omdat de heterogene ondergrond bestond uit een zeer slap lagenpakket, tot wel 17 meter dik. Bovendien was de beschikbare aanlegtijd gering.

De verkeersbelasting, de belastingsverdeling, vervormingen en rekken van de GR worden continu iedere tien minuten gemeten. Daarnaast zijn op 6 september 2011 hoogfrequente metingen uitgevoerd, met 500 Hz. De metingen betreffen onder meer de passage van twee vrachtwagens: vrachtwagen 1 heeft zes assen en een totale aslast van 32 ton, vrachtwagen 2 heeft vier assen en een totale aslast van 14,4 ton.

Zowel met CUR226 als met het inverse-driehoekmodel zijn voorspellingen gemaakt van de metingen die één jaar na in gebruikname worden uitgevoerd. Voor het bepalen van de rekenwaarde van de verkeersbelasting zijn de aslasten en asafstanden van de twee vrachtwagens vertaald naar een gelijkmatige belasting boven meetpalen 692 en 693. Dit is gedaan volgens de Boussinesq-methode, die is gegeven in CUR226. Uitgangspunt bij de berekeningen is dat de ondergrond zover is ingeklonken dat hij geen ondersteuning meer levert.

Boogwerking

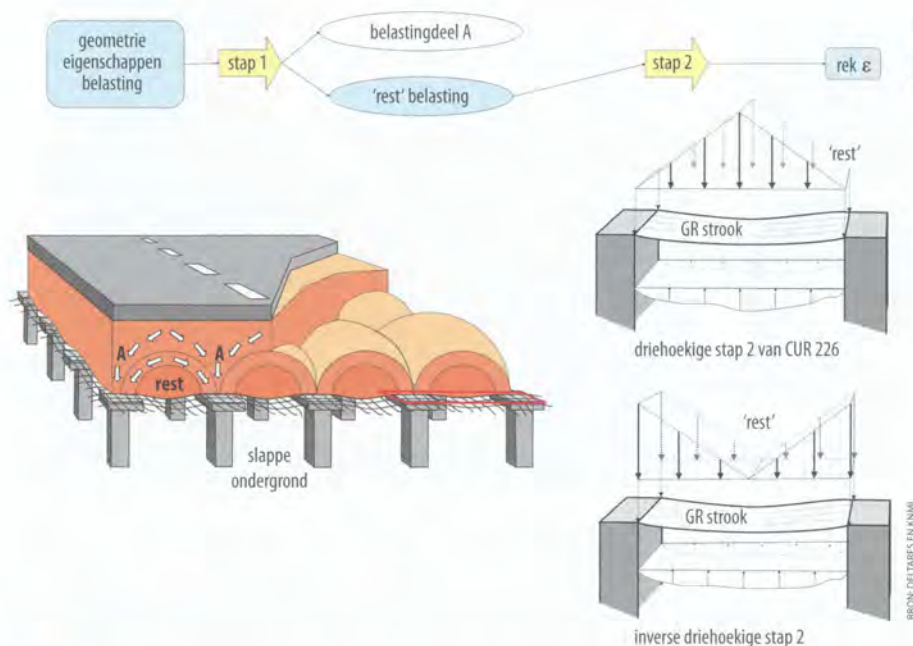
De meetpalen hebben ronde paaldeksels gekregen met hetzelfde oppervlak als de andere, vierkante paaldeksels. Boven deze paaldeksels en boven de GR wordt de boogwerking A gemeten met een drukopnemer, die dezelfde grote diameter van 0,84 meter heeft. Dit meetsysteem is eerder met succes toegepast, maar gaf in dit geval complicaties door de grote maat.

Tussen GR en het paaldeksel zit nog een laagje zand. Dit laagje zand blijkt niet vlak te blijven,

| Paalfundering | Geokunststof wapening (GR) | Aardebaan en wegconstructie |
|--|---|--|
| Zes prefab-palen over de breedte van de baan, hart-op-hart afstand dwars op de baan 2,2 m en langs de baan 2,26 m ² ; paaldeksels vierkant 0,75 x 0,75 m ² . De meetpalen (692, 693 en 695) hebben een ronde paaldeksel met diameter 0,84 m, dus hebben hetzelfde oppervlak. Boven de paaldeksels ligt een zandlaag van 0,05 tot 0,16 m. | Onderlaag: dwars op wegas: Stablenka 600/50 Bovenlaag: langs wegas: Fortrac T 600/50 | Puingranulaat 0-40 mm, fundering 0,25 Agrac (asfalt-granulaatmengsel), 0,18 m asfalt, helling in dwarsrichting 1:20. Afstand paaldeksel tot wegdek is gemiddeld 1,94 m bij de monitoringlocatie. Grondwater blijft onder de paaldeksels. |

PAALMATRAS

Specificatie van de paalmatras bij de monitoringlocatie.



REK

De berekening van de rek in de geokunststof wapening (GR) bestaat uit twee stappen. Stap 1 berekent de belasting rechtstreeks op de paal, belasting (A, kN/paal), de boogwerking. Stap 2 berekent de rek in de GR. CUR226 rekent in stap 2 met een driehoekige belastingsverdeling, het voorgestelde alternatief met een inverse driehoekige belastingsverdeling.

waardoor de drukopnemer een deel van zijn ondersteuning kwijtraakt. De druk die wordt gemeten, is de druk die wordt uitgeoefend op de ondersteuning van de opnemer. Door zorgvuldig analyseren is bepaald dat de ondersteuning van de drukopnemers een vlak moet zijn met een diameter van ongeveer 0,75 meter. Dit introduceert een onzekerheid in de metingen.

Hoe groter de boogwerking, hoe minder de GR wordt belast. De gemeten (boogwerking) A wordt steeds groter. Dit komt vermoedelijk vooral door een toename van de schuifsterkte van de aardebaan. Vooral gedurende de droge periode van de lente van 2011 kan de dichtheid van de uitdrogende aardebaan flink toenemen door de voortdurende verkeersbelasting. Daardoor kan de sterkte toenemen (toename wrijvingshoek).

Het blijkt dat een toenemende wrijvingshoek in het rekenmodel ook een flinke toename van de boogwerking geeft, die redelijk overeenkomt met de gemeten toename. Hieruit blijkt dat een toenemende wrijvingshoek kan worden mee-

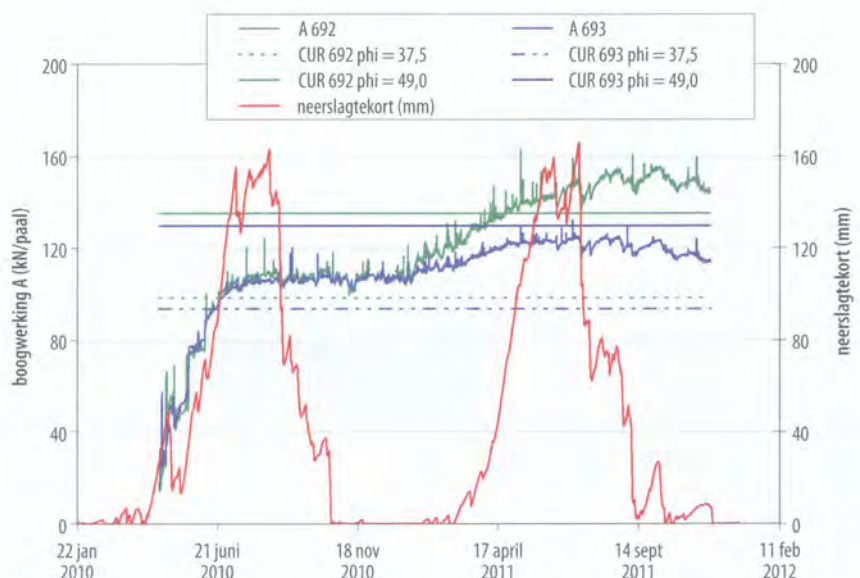
genomen in ontwerpberoeeningen. Dit geldt echter niet voor een toename van cohesie (door het ontstaan van chemische binding). Deze kan weer verdwijnen bij een extreme belasting of omstandigheid. De gebruikte 49 graden wrijvingshoek lijkt extreem hoog, maar is wel gemeten in grote-schaal triaxiaalproeven op vergelijkbaar granulaair materiaal.

De boogwerking kan ook toenemen doordat de ondergrond bij de lage grondwaterstand inklinkt. Als de ondergrondondersteuning afneemt, neemt de boogwerking toe. Dit is eerder ook gemeten in de laboratoriumproeven, maar wordt door CUR226 niet meegenomen in de berekeningen. Dit kan leiden tot een conservatieve voorspelling van de boogwerking, ofwel een veilig ontwerp. Uit de zettingsmetingen blijkt echter dat de GR tussen november 2010 en oktober 2011 nergens meer dan 0,021 meter is gezakt. Dat is te weinig om een dergelijke grote toename van boogwerking te verklaren.

Zettingsmetingen

Het wegdek is in de eerste zestien maanden van het weggebruik vijf maal ingescand met 3D-laserscanning. Hieruit blijkt het wegdek niet meetbaar te zakken; er zijn geen zettingen gemeten. De nauwkeurigheid van de scantechniek is 1 tot 2 millimeter.

Dieper in de aardebaan zijn de zettingen gemeten in zettingsmeetslangen. Uit deze zettingsmetingen zijn meerdere zaken te concluderen. Uit de vorm van het vervormde GR is te bepalen dat de totale GR-rek ligt in de orde van 0,92 procent. Deze rek is te beschouwen als een bovengrens, omdat het de rek is inclusief de overtollige GR-lengte, die initieel altijd in een paalmatras aanwezig is. Het is namelijk niet mogelijk (en ook niet nuttig) om de GR geheel strak neer te leggen. Deze rek van 0,92 procent komt dicht bij de gemiddelde berekening met het inverse-driehoekmodel dan bij de gemiddelde berekening van CUR226.



BOOGWERKING

Boogwerking A, vergelijking van gemeten en berekende verdeling van de permanente belasting (resultaten van rekenstap 1 boven meetpalen 692 en 693).

De tweede afgeleide van de vervormde GR is lineair evenredig met de verticale belasting op de GR. De tweede afgeleide nemen geeft wat ruis, zelfs na het nemen van het voorschrijdend gemiddelde over telkens twee meetwaarden. Toch valt duidelijk te zien dat de gevonden vorm veel meer lijkt op een inverse driehoekige belasting dan op een driehoekige.

Passerende vrachtwagen

De vorm van de vrachtwagens is goed te herkennen in de metingen. De rekmetingen worden het best benaderd door de voorspellingen met het model met de inverse driehoek.

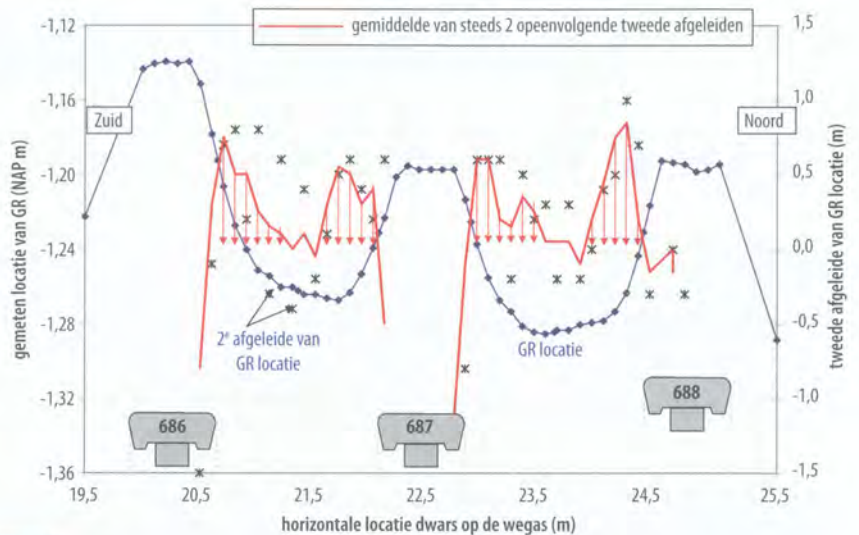
De metingen van de verdeling van de belasting van de vrachtwagen komen redelijk overeen. Dit betekent dat de hoogte van de 'rest'belasting ook ongeveer in de juiste orde ligt. De drukopnemers die midden tussen de palen in liggen, geven echter hooguit 50 procent van de druk die gemiddeld wordt verwacht. Dit is het geval bij een meting midden tussen vier palen en in vergelijking met de berekening met een wrijvingshoek van 49 graden. Op de locatie tussen twee palen wordt zelfs helemaal geen drukverhoging gemeten door de passages. Dit wijst erop dat de belasting zich inderdaad verdeelt volgens het idee van de inverse driehoek: midden tussen twee palen weinig belasting, en rondom de palen meer.

Bevindingen

De langetermijnmetingen in de paalmatras bij Woerden zijn gestart in het voorjaar van 2010 en zullen in totaal tien jaar lopen.

De gemeten verdeling van de permanente belasting (stap 1) laat zien dat de boogwerking (A) is vergroot. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het verdichten van de aardebaan door de droogte gedurende de lente van 2011. De boogwerking verbetert hierdoor.

De gemeten vervormingen van de GR laten zien dat de belastingsverdeling op de GR-strook meer lijkt op een inverse driehoek dan op een



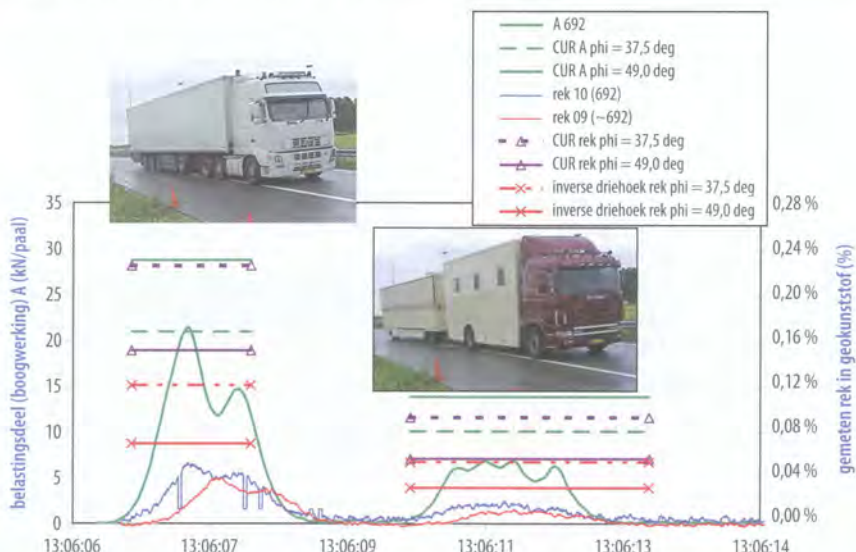
ZETTING

Meting van de GR-locatie (de geokunststof wapening), gemeten in zettingsslang 3, die direct op de GR ligt, en over de palen 686, 687 en 688 voert. De metingen zijn uitgevoerd op 17 oktober 2011. De metingen zijn elke 0,1 meter uitgevoerd, terwijl om de 0,5 meter normaal is in zettingsmeetsslagen. Dit is gedaan omdat dit beter past bij de afstand van circa 1,5 meter tussen de paaldeksels.

| | Vrachtwagen 1 (input-verkeersbelasting 7,52 kPa) | | | Vrachtwagen 2 (input-verkeersbelasting 3,62 kPa) | | |
|--------------|---|----------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|
| | Belastingdeel A | Rek GR ϵ_{CUR226} | Rek GR $\epsilon_{inverse\ driehoek}$ | Belastingdeel A | Rek GR ϵ_{CUR226} | Rek GR $\epsilon_{inverse\ driehoek}$ |
| | kN/paal | % | % | kN/paal | % | % |
| Paal 692 | | | | | | |
| Geen verkeer | 98 (135) | 1,94 (1,30) | 0,66 (0,37) | 98 (135) | 1,94 (1,30) | 0,66 (0,37) |
| Vrachtwagen | 119 (164) | 2,17 (1,45) | 0,78 (0,44) | 108 (149) | 2,03 (1,36) | 0,72 (0,40) |
| Verskil | 21 (19) | 0,23 (0,15) | 0,12 (0,07) | 10 (14) | 0,09 (0,06) | 0,05 (0,03) |
| Paal 693 | | | | | | |
| Geen verkeer | 93 (130) | 1,95 (1,32) | 0,66 (0,37) | 93 (130) | 1,95 (1,32) | 0,66 (0,37) |
| Vrachtwagen | 114 (158) | 2,18 (1,48) | 0,78 (0,44) | 103 (143) | 2,04 (1,38) | 0,71 (0,40) |
| Verskil | 21 (29) | 0,24 (0,16) | 0,13 (0,07) | 10 (14) | 0,10 (0,07) | 0,06 (0,03) |

BEREKENINGEN

Resultaten van de analytische berekeningen. Wrijvingshoek $\phi = 37,5^\circ$ (tussen haakjes staan de voorspellingen voor $\phi = 49^\circ$).



driehoek of een gelijkmatig verdeelde belasting. Passerende vrachtwagens geven extra rek in de GR. Deze extra GR-rekken worden ook beter beschreven door het inverse-driehoekmodel dan door CUR226.

Op termijn zal het inverse-driehoekmodel waarschijnlijk worden opgenomen in CUR226. Gegeven een maximaal toelaatbare rek van de geokunststof zou hierdoor de sterkte van het geotextiel in dit geval ongeveer een factor 3 kunnen afnemen.

Suzanne van Eekelen is senior projectmanager R&D bij Deltares en PhD-kandidaat aan de TU Delft. Adam Bezuijn is hoofddocent aan de Universiteit van Gent en senior adviseur bij Deltares. Piet van Duijnen is specialist geotechniek bij Mobilis. De auteurs zijn dankbaar voor de financiële en/of praktische steun van de Provincie Utrecht, Rijkswaterstaat, Huesker, KWS Infra, KNMI, Geolmpuls, Deltares en Fugro.

BELASTING

Voorspelling en metingen van de reactie op de passage van twee vrachtwagens, op en rondom paal 692 of diens equivalent (paal 680-692).