

Dynamische belastingen door treinen op openstaande diepwandsleuf in Almelo

Samenvatting

In Almelo wordt de spoorlijn over een lengte van circa 1100 meter verdiept aangelegd. Het treinverkeer wordt tijdens de bouw over een hulpspoor geleid. Vlak naast het hulpspoor wordt een diepwand gemaakt. De stabiliteit van de openstaande met bentoniet gevulde diepwandsleuf wordt nadelig beïnvloed door het passeren van de treinen. Het bepalen van de stabiliteit in deze situatie is specialistisch werk. De invloed van de treinpassage op de ondergrond is met berekeningen vastgesteld. Hieruit bleek dat de stabiliteit van de sleuf op enkele locaties kritiek was. Vanwege de onzekerheden in de berekeningen en de lokaal kritieke situatie zijn metingen in de ondergrond verricht gedurende het passeren van de treinen. Deze metingen zijn geanalyseerd en hebben geleid tot een verhoogd inzicht in de belasting op de ondergrond en de stabiliteit van de diepwandsleuf.

◀ **Figuur 1** Locomotief van de goederentrein.

Projectbeschrijving

De spoorlijn Almelo - Hengelo doorkruist de binnenstad van Almelo over ca 3 km. Hier passeren gemiddeld 12 treinen per uur. In dit traject bevinden zich tussen het viaduct over de Wierdensestraat en station Almelo de Riet de overwegen in Nieuwstraat-Zuiderstraat en Violierstraat - Schoolstraat, waar regelmatig ongevallen gebeuren. Het project Almelo Verdiept zorgt er voor dat deze 2 overwegen komen te vervallen en worden vervangen door overbruggingen over een verdiept aangelegd spoor. Door het spoor verdiept aan te leggen verbetert ook het leefklimaat in de directe omgeving van het spoor, neemt de barrièrewerking van het spoor in de binnenstad af, reduceert het geluid van de treinen naar de omgeving en bevordert het de verkeersdoorstroming. Rijen auto's voor gesloten overwegbomen behoren tot de verleden tijd.

De totale lengte van de verdiepte spoorligging bedraagt circa 1 km inclusief de toeritten. Het bestaande spoor ligt ingeklemd tussen de Ambtstraat en de Raveslootsingel/Anjelierstraat waardoor er geen ruimte is om de verdiepte constructie naast de bestaande spoorbaan te bouwen. Omdat gedurende de bouw van de verdiepte ligging het spoorverkeer normaal afgehandeld moet kunnen worden is, in overleg en met toestemming van de vervoerders op het spoor, gekozen voor de aanleg van een enkel-sporig 'hulpspoor' naast de bestaande spoor

waarna het mogelijk werd het bestaande spoor op te breken en op die plek de verdiepte bak te realiseren. Dit betekende niet dat er alle ruimte was om de verdiepte bak naast het hulpspoor te bouwen. De buitenzijde van de wanden van de bak bevinden zich verlopend tussen 3,20 meter en 5,60 meter uit hart hulpspoor. Het project Almelo Verdiept is door ProRail als D&C-contract op de markt gezet en in oktober 2005 gegund aan Van Hattum en Blankevoort. Het aanbiederontwerp voorziet in een verdiepte bakconstructie bestaande uit (verankerde en onverankerde) diepwanden en een betonvloer. De fundatie bestaat uit GEWI-palen. Op de betonvloer wordt het ballastbed en de spoorconstructie aangebracht.

Geotechnische beschrijving ondergrond

Het maaiveld ligt ter plaatse van het project op circa NAP + 11 m. De ondergrond bestaat voornamelijk uit zand. Op de meeste plaatsen is er sprake van een profiel dat bestaat uit twee afzonderlijke zandlagen (2-laags grondprofiel). Lokaal is er een kleilaag aanwezig die de beide zandlagen van elkaar scheidt (3-laagsgrondprofiel). Voor de berekening is een onderscheid gemaakt tussen de twee grondprofielen. Daarnaast is voor enkele specifieke plaatsen, waar de bodemopbouw afwijkt van de genoemde profielen, een extra berekening gemaakt. Voor de grondwaterstand is een ontwerpwaarde van NAP +9,7 m aangehouden. De rekenwaarde van de hoogste grondwaterstand bedraagt NAP +10,3 m.

Kritieke doorsnede

De afstand tussen de te maken diepwanden en het hulpspoor varieert tussen de 3,20 m en 5,60 m. (hart spoor I' buitenkant diepwand). De aannemer had berekend dat de sleufstabiliteit voldoende geborgd is als bij diepwanden op een afstand van 3,20 m een paneelbreedte van 2,90 m werd toegepast. Op een afstand van 5,60 m was de stabiliteit nog voldoende geborgd bij een paneelbreedte van 7,60 m.

De afstand van 3,20 m betreft een tweetal locaties waar in de definitieve tunnelbak vluchtwegen zijn voorzien. Naast de kortere afstand tot het hulpspoor waren deze locaties ook extra kritisch doordat ter plaatse zogenaamde Z-panels gegraven dienden te worden (zie figuur 2). Tijdens het graven van deze panelen was het niet mogelijk de effectieve sleufbreedte tot 2,90 m te beperken.

Sleufstabiliteit

De stabiliteit van de sleuven is in eerste instantie door VWS Geotechniek, het geotechnisch ontwerp bureau van Van Hattum en Blankevoort, berekend met het programma GGU-trench. Dit programma is gebaseerd op DIN 4126 (1986). Dit voorschrift werkt met overall-veiligheids waarden van de grondparameters. Het voorschrift stelt de volgende eisen:

- 1 De druk van het bentoniet is op elk niveau groter dan de waterdruk.
- 2 De microstabiliteit van de sleuf moet

voldoende zijn.

- 3 De veiligheid tegen het terugvallen van het vloeistofniveau is voldoende.
- 4 De veiligheid tegen het inschuiven van de grondmoot is voldoende (stabiliteit).

In de berekening zijn twee varianten onderscheiden. De eerste variant is het ontgraven van de sleuf. Hierin is het bentonietniveau NAP +11,2 m en het volumegewicht van het bentoniet 11 kN/m³. De tweede variant is na het ontzanden van het bentoniet. Het bentonietniveau is NAP +11,5 m en het volumegewicht van het bentoniet is 10,4 kN/m³. Dit staat dus in beide gevallen voldoende boven de grondwaterstand om aan de eerste eis te voldoen. Door de kortdurende belasting van het passeren van een trein kunnen echter wateroverspanningen in de ondergrond ontstaan, waardoor de waterdruk tijdelijk toeneemt.

De microstabiliteit is afhankelijk van de grondslag (korrel diameter) en de eigenschappen van de bentoniet suspensie. Om de microstabiliteit te waarborgen is aan de vloeigrens van de bentoniet suspensie een eis gesteld van 25 N/mm². Deze eis is voldoende voor de aanwezige grond (voornamelijk zand en leem).

Het terugvallen van het vloeistofniveau is nadelig voor de stabiliteit. Dit wordt bewaakt door het niveau regelmatig te controleren. Als het niveau teveel zakt worden maatregelen genomen.

De sleuf moet voldoende stabiel zijn. Volgens DIN 4126 is de benodigde veiligheid 1,3 als er belasting binnen een afstand van 0,7* sleufbreedte aanwezig is. Als de belasting verder weg staat is de benodigde veiligheid 1,1.

De DIN 4126 geeft niet aan hoe dynamische belasting in rekening moet worden gebracht.

Invloed treinpassages

Door het passeren van een trein ontstaan wateroverspanningen en versnellingen in de ondergrond. Dit is van invloed op de stabiliteit van de sleuf. De wateroverspanningen leiden tot een tijdelijke afname van de wrijvingsweerstand. Door de versnellingen in de ondergrond neemt de aandrijvende kracht op de sleuf toe. Beide aspecten leiden tot een afname van de stabiliteit tijdens het passeren van een trein.

Onderzoek en metingen in Duitsland

In 1996 is in Duitsland een onderzoek ingesteld naar de invloed van de dynamische belasting door treinen op de ondergrond. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van de aanleg van een bouwput met diepwanden vlak naast een spoorbaan voor metro's (S-bahn) in Berlijn. De Duitse spoormaatschappij Deutsche Bahn AG verklaarde de DIN 4126 niet van toepassing voor de vervaardiging van diepwanden in het invloedsgebied van spoorbelastingen. Daarom is in dit geval onderzoek verricht.

Het onderzoek is gericht op de dynamische effecten. Hierbij zijn de trillingsnelheden(v) op 12 punten gemeten tijdens het passeren van treinen. Uit de metingen is tevens de schuifgolfsnelheid (c_s) in de grond afgeleid. Vervolgens is de dynamische schuifrekamplitude γ berekend: $\gamma = v/c_s$.

De schuifrekamplitude is via een correlatie vertaald naar een afname van de glijdingsmodulus. Er is aangenomen dat de afname van de wrijvingshoek even groot is.

Naast de afname van de wrijvings eigenschappen van de ondergrond wordt de belasting op de ondergrond verhoogd. De verhoging is afhankelijk van de interactie tussen trein, rails, dwarsliggers en ondergrond. Uit de literatuur is bekend dat de verhogingsfactor (stootfactor) tussen de 1,1 en 1,6 ligt.

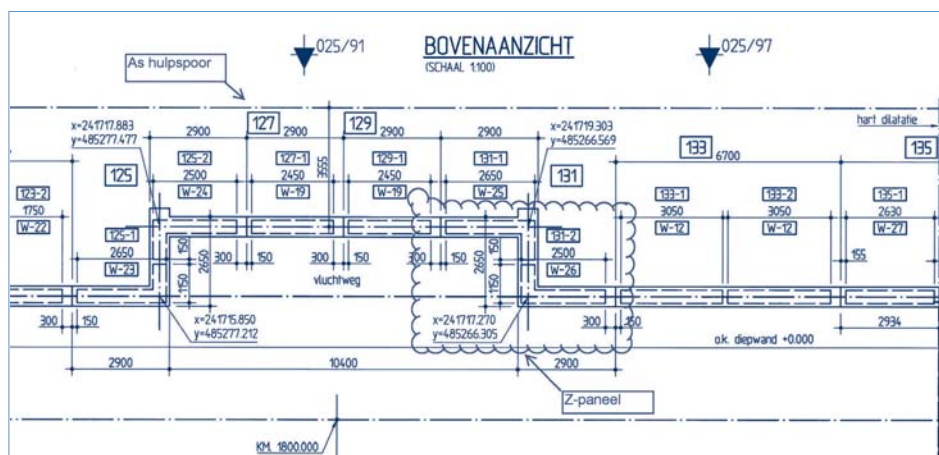
Het dynamisch effect is vervolgens verwerkt door de belasting met een factor 1,5 te vermenigvuldigen en de cohesie en interne wrijvingshoek, conform bovenstaande aanname, door een factor 1,1 te delen.

De factor op de belasting is gelijk aan de factor die in de berekeningen door VWS Geotechniek voor Almelo is gehanteerd. In deze berekeningen was de sterkte niet expliciet gereduceerd. Naderhand zijn door Deltares (destijds GeoDelft) aanvullende berekeningen gemaakt om de effecten van de dynamische belasting in te schatten. Hierbij werd de invloed van de dynamische belasting op de sterkte van de ondergrond anders benaderd. In de berekeningen voor Almelo is niet de sterkte van de ondergrond gereduceerd maar zijn wateroverspanningen ingevoerd.

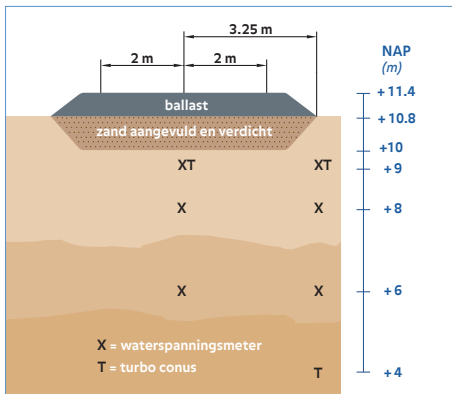
Berekeningen sleufstabiliteit

Voor Almelo zijn tweedimensionale berekeningen met Plaxis gemaakt om de invloed van de wateroverspanning te bepalen. Hierbij is een representatieve treinbelasting van 40 kN/m² ingevoerd. De belasting is gedraineerd aan en uitgezet en vervolgens ongedraineerd aangezet. De belasting geeft wateroverspanningen in de ondergrond. Onder het spoor treedt een maximale wateroverspanning van 16,5 kN/m² op. Op 3,5 m afstand t.o.v. hart spoor is de maximale wateroverspanning 13,5 kN/m². Met deze berekening is een bovengrens voor de wateroverspanningen vastgesteld omdat in werkelijkheid gedeeltelijk gedraineerd gedrag optreedt.

Uit de berekeningen met GGU trench, waarin de waterspanning is meegenomen, blijkt dat de veiligheid tegen het afschuiven van een moot grond in de diepwandsleuf voldoende is. De marge tussen de bentonietdruk en de waterdruk is echter klein. Bij een hart op hart afstand van 3,5 meter tussen spoor en sleuf is de veiligheidsfactor slechts 1,08 indien met een dynamische factor op de treinbelasting van 1,5 en de hoogste wateroverspanning wordt gerekend. Vanwege de onzekerheid over de grootte van de dynamische factor en de wateroverspanningen zijn metingen opgezet.



Figuur 2 Locatie met Z-panels vlak naast hulpspoor.



Figuur 3 Dwarsdoorsnede met meetapparatuur.

Tijd							
11.36-12.06	0.5	0.5	0.5	0.4	0.8	2.1	
12.06-12.38	0.8	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	
12.38-13.07	0.5	0.5	1.7	0.5	0.5	0.5	
13.07-13.37	0.4	0.5	0.6	0.4			
13.38-14.08	1.2	0.3	0.8	0.5	0.7	0.2	0.4
14.10-14.40	0.8	0.7	0.6	0.4			
14.42-15.12	0.4	0.5	0.3	0.6			
15.12-15.42	0.8	0.4	0.3	0.4	0.8		
15.42-16.12	0.5	0.3	0.3	0.8			
16.12-16.42	0.2	0.3	0.7	0.4	0.4		

Tabel 1 Maximale horizontale versnellingen in m/s^2 onder het spoor op 2007-07-17.

Metingen

Op één locatie zijn onder het hart van het spoor 3 waterspanningsmeters geplaatst op niveaus van NAP + 9,0 m resp. + 8,0 m en respectievelijk + 6,0 m evenals 1 versnellingsopnemer (turboconus) op NAP + 9 m. De versnellingsopnemers meten in drie richtingen. (Zie figuur 3)

Op een afstand van circa 3,25 m uit hart hulp-spoor zijn eveneens 3 waterspanningsmeters geplaatst op dezelfde niveaus. Hier zijn 2 turboconussen op NAP + 9 m en NAP + 4 m geplaatst.

Er werd twee dagen gemeten. De eerste meetdag was voorafgaande aan het installeren van

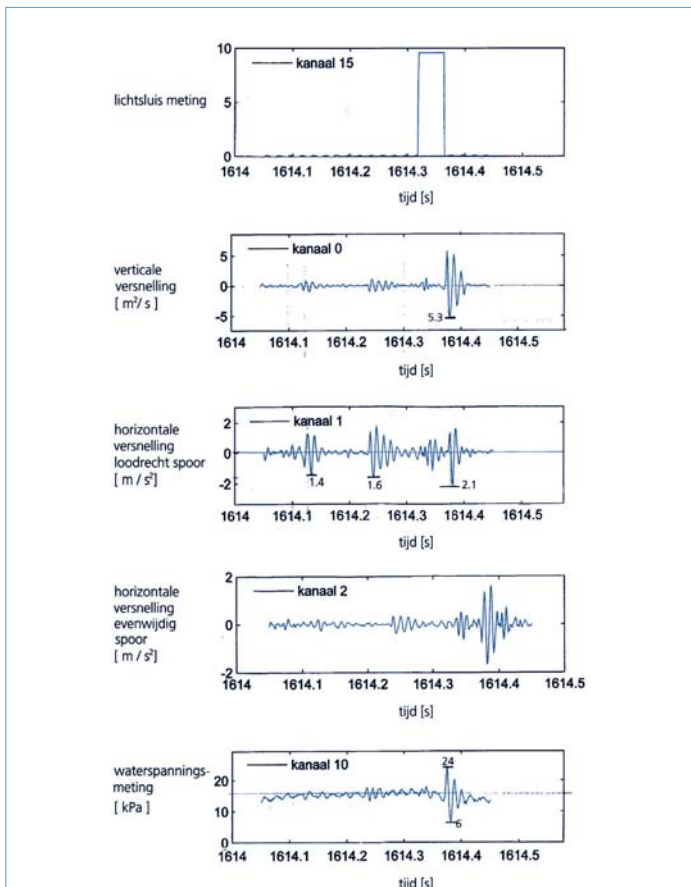
de diepwand. Op de tweede meetdag was de sleuf voor de diepwand gegraven en gevuld met bentoniet.

Er is circa 5 uur per meetdag gemeten.

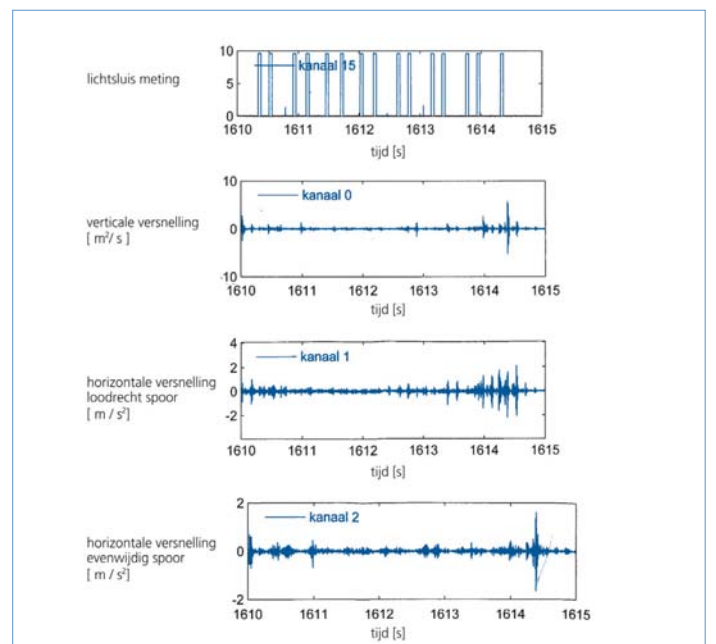
Gemiddeld passeren circa 6 passagierstreinen per half uur.

Naast deze passagierstreinen zijn er op de eerste meetdag 7 goederentreinen en 2 tweemaal 2 locs gepasseerd. Op de tweede meetdag is er naast de passagierstreinen slechts één goederentrein gepasseerd.

Uit informatie van ProRail blijkt dat de aslasten van het materieel van de Nederlandse Spoorwegen variëren tussen circa 12 ton per as en 22 ton per as. Deze hoogste waarde geldt voor een loc NSR 1700.



Figuur 4 Meetresultaten trillingen onder het spoor.



Figuur 5 Meetresultaat laatste 0,5 seconden van treinpassage.

Meetresultaten

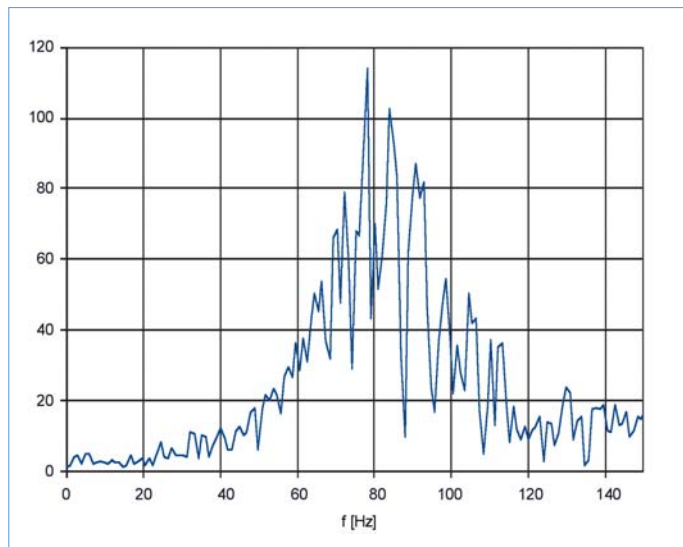
Gedurende de metingen op de twee meetdagen zijn in totaal 99 treinen gepasseerd. Voor de sleufstabiliteit is vooral de horizontale versnelling loodrecht op het spoor van belang. In tabel 1 zijn de maximale horizontale versnellingen loodrecht op het spoor voor de treinen van de eerste dag vermeld. Uit de tabel blijkt dat de maximale versnelling per trein erg varieert. De meeste treinen gaven maximale versnellingen van minder dan 1 m/s^2 . Bij 3 van de 51 treinen lag de maximale versnelling boven de 1 m/s^2 .

De gemeten maximale horizontale versnelling onder het spoor is $2,1 \text{ m/s}^2$. De maximale verticale versnelling bij deze meting was $5,3 \text{ m/s}^2$. De versnellingen zijn opgetreden op de eerste meetdag bij de passage van een goederentrein. Deze trein bestond uit 2 locs 1600 en 35 wagons. Uit lichtsluismetingen is afgeleid dat de trein een snelheid van 76 km/uur had. De maximale horizontale versnellingen bij de meeste wagons lag ruim onder de 1 m/s^2 . Bij 2 wagons was de versnelling in de orde van 2 m/s^2 . Op het oog waren de wagons vergelijkbaar qua vorm en belasting.

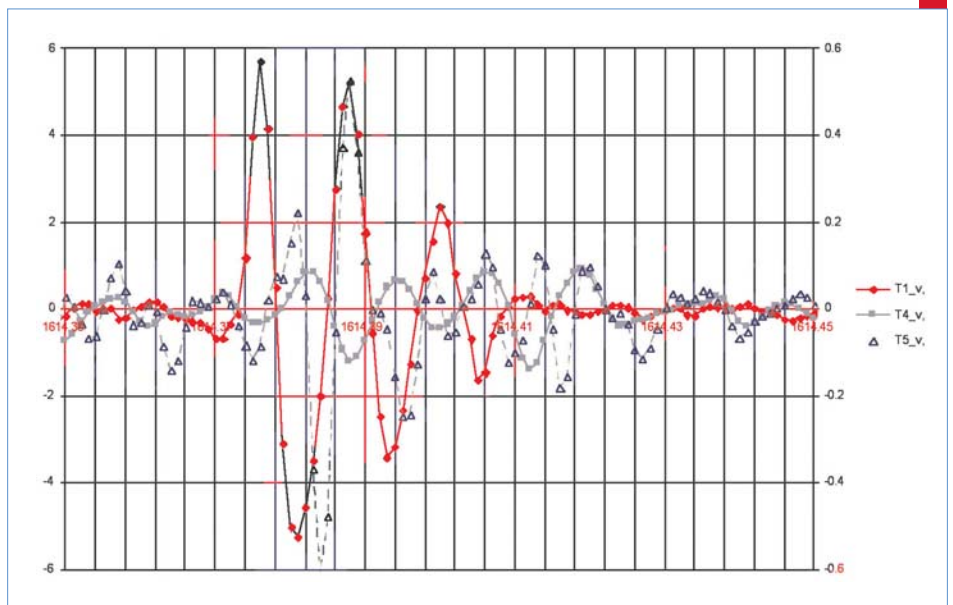
In de figuren 4 en 5 zijn enkele metingen van de maatgevende trein weergegeven. Figuur 4 toont de lichtsluismeting en de versnellingen onder het spoor van de laatste 5 seconden van de treinpassage. De lichtsluismeting toont 15 assen. Deze horen bij de laatste 8 wagons. De grootste versnellingen treden op bij de laatste wagons. In figuur 5 is de laatste 0,5 seconde uitvergroot. De laatste as passeert op 1614,3 seconde. Binnen 0,1 seconde zien we de aspassage terug in de versnellingsopnemer, die 2,4 meter onder het spoor zit. In de waterspanningsmeter op 3,4 meter onder het spoor is de aspassage ook te zien.

Alle metingen geven aan dat de versnellingen naast het spoor duidelijk kleiner zijn dan de versnellingen onder het spoor. Er is geen duidelijk verband tussen de aslast van de trein en de grootte van de versnelling. Soms geven persontreinen met relatief lage aslasten grotere versnellingen dan locomotieven met hogere aslasten.

In het algemeen is er geen duidelijk verband tussen de gemeten waterspanningen en de treinpassages. De gemiddelde waterspanning komt overeen met een grondwaterstand van circa NAP + 9,5 m. Over de gemiddelde waterspanning zit een 'ruis'. Deze ruis is circa



Figuur 6 Frequentie-spectrum verticale versnelling turboconus TC1, onder midden spoorbaan.



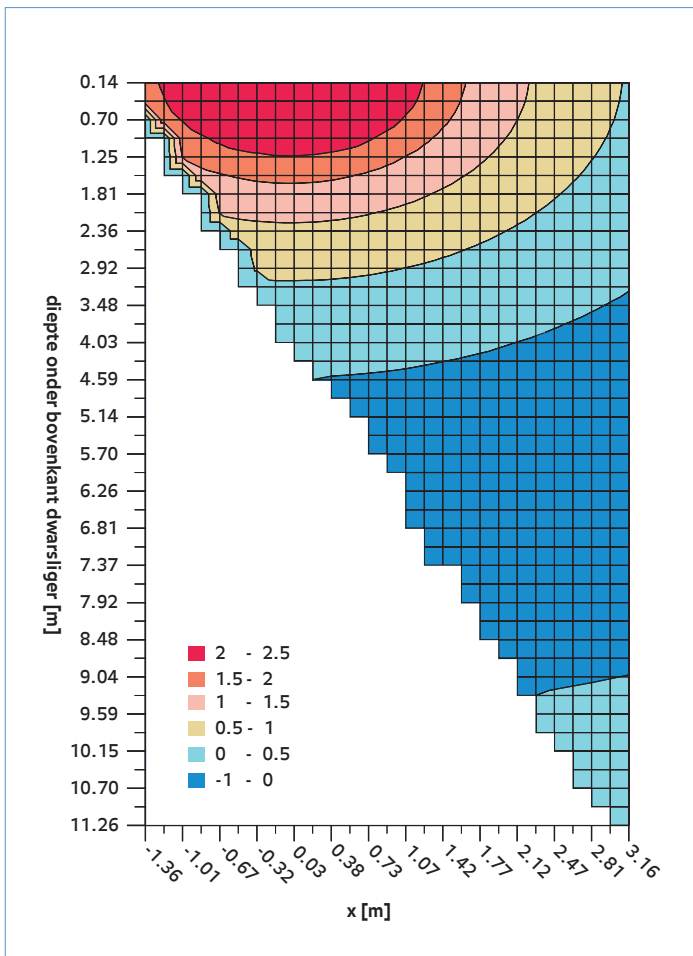
Figuur 7 Verticale versnellingen van de 3 turboconussen. Gemeten verticale versnellingen, t.b.v. bepalen loopsnelheid golven (N.B. de meetwaarde van TC1 staat langs de linker- en TC4 en TC5 langs de rechter-).

$\pm 3 \text{ kPa}$ in de bovenste waterspanningsmeters en circa $\pm 2 \text{ kPa}$ in de lagere waterspanningsmeters. In enkele gevallen is tijdens een treinpassage wel een effect op de waterspanning te zien. De in figuur 5 gepresenteerde meting is een voorbeeld hiervan. Er zijn geen duidelijke verschillen tussen de metingen op de dag zonder diepwand en de dag met openstaande sleuf. Indien, zoals wel gebruikelijk, dynamische belastingen worden opgevat als quasi-statische bestaande uit de statische met een stootfactor dan kan de hier gemeten maximale verticale versnelling van $5,3 \text{ m/s}^2$ worden vertaald in een stootfactor van $(9,81 + 5,3) / 9,81 = 1,54$.

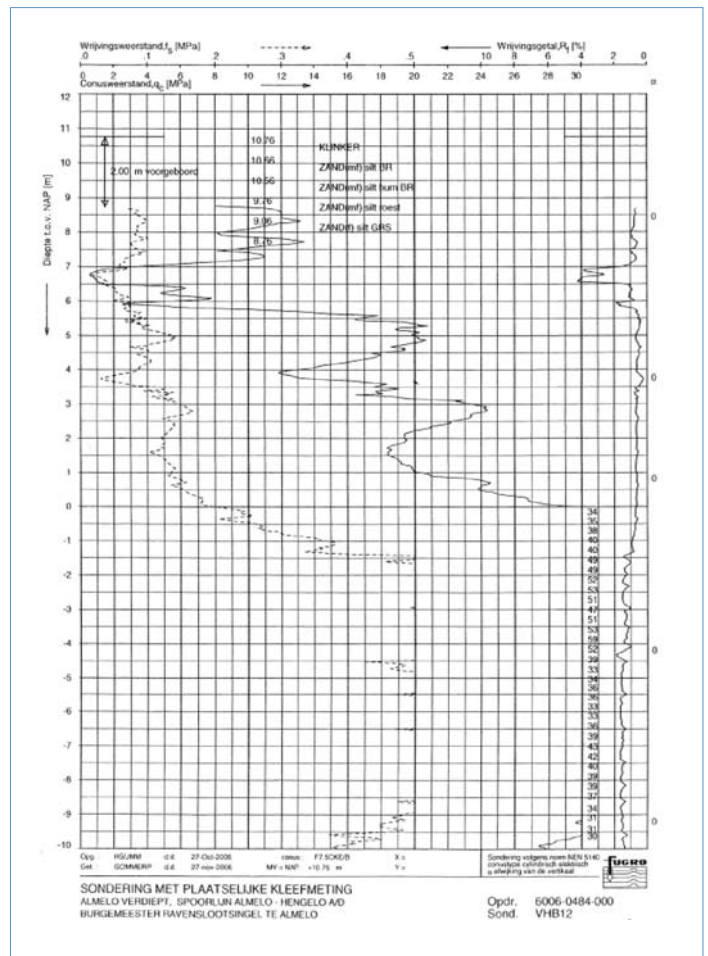
Horizontale grondversnelling door de trein

Naast de methode om de dynamische belasting in de stabiliteit berekeningen te verdisconteren door de stootfactor over de verticale belasting te zetten kan ook rechtstreeks uit de horizontale versnelling worden afgeleid wat de extra afschuivende belasting is. Deze is namelijk het resultaat van de verticale en horizontale versnellingen.

De maximaal gemeten horizontale versnelling is $2,1 \text{ m/s}^2$. Deze waarde treedt op bij de turboconus onder het hart van het spoor. De invloed van deze versnelling is verwerkt door het invoeren van een horizontale kracht. Deze is



Figuur 8 Voorbeeld van berekende horizontale versnellingen in grondwig.



Figuur 9 Sondering met plaatselijke kleefmeting.

berekend volgens de methode die is vermeld in DIN 4085 Berechnung des Erddrucks, 1987-02.

In geval van een oneindig lange wand treedt door de versnelling een extra horizontale kracht op gelijk aan:

$$E_{a,dyn} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot 0,75 \cdot b_h / g$$

Hierin is:

- b_h de horizontale versnelling;
- g de zwaartekrachtsversnelling;
- γ het volumegewicht van de afschuivende grondwig;
- h hoogte grondwig.

Voor de stabiliteit van de afschuivende grondwig is de gemiddelde horizontale versnelling op deze grondwig maatgevend. De horizontale versnelling is op 3 plaatsen gemeten. De gemeten waarden zijn vertaald naar een gemiddelde horizontale versnelling op de afschuivende

grondwig. De gemiddelde horizontale versnelling is afhankelijk van de grootte (breedte en diepte) van de grondwig en de golfvoortplantingsnelheid. Voor de grootte van de grondwig zijn de resultaten van GGU-trench gebruikt.

Bepaling gemiddelde versnelling in de ondergrond

Uit een analyse van de trillingsmeting tussen $t = 1614$ s en $t = 1615$ s (zie figuur 6) volgt dat de frequentie van het versnellingssignaal ongeveer 80 Hz is.

Uit een analyse van de trillingsamplitude is afgeleid dat de loopsnelheid van de golven ongeveer 800 m/s is. Voor volledig verzadigd zand wordt een waarde voor de snelheid van de drukgolf van ongeveer 1500 m/s verwacht. De gevonden waarden representeert waarschijnlijk de snelheid van de drukgolf in gedeeltelijk verzadigd zand.

'Gemiddelde' horizontale versnelling wil in dit verband zeggen de gemiddelde waarde op een bepaald tijdstip van de aanwezige versnellingen over het beschouwde gebied. Deze gemiddelde waarde wordt bepaald uit:

- Verdeling van de piekwaarde over het gebied;
- Verdeling van de momentane waarde, rekening houdend met de faseverschuiving tussen bron en beschouwd punt;
- Bepaling van het ongunstigste moment (fase).

Bij een grote grondwig zal de versnelling niet overal in fase zijn. Dit effect is in rekening gebracht door middel van een faseverschuiving. De momentane versnelling op een punt op afstand r vanuit het nulpunt volgt uit:

$$a_{hor} = 3,1 \cdot r^{-1,4} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot r / L + \varphi)$$

Hierin is L de golflengte en φ een additionele fasehoek.

Een voorbeeld van de berekende horizontale versnellingen in de beschouwde afschuivende

grondwig is in *figuur 8* gegeven.

In de figuur is duidelijk te zien dat de versnellingen niet in fase zijn. In het paarse gedeelte heeft de versnelling een andere richting dan in de andere delen van de figuur. De berekende gemiddelde horizontale versnelling voor een glijvlak dat loopt vanaf onderkant diepwand tot maaiveld bedraagt $a_{hor} = 0,51 \text{ m/s}^2$.

De uit de horizontale versnellingen volgende kracht is vermenigvuldigd met de sleufbreedte en opgeteld bij de statische gronddruk $E_{a,stat}$ en meegenomen in de evenwichtbeschouwing met de totale (effectieve) druk van de steunvloeistof. Wateroverspanningen door de treinpassage Bij de maatgevende wagonpassage is de gemeten wateroverspanning maximaal 8 kN/m^2 op een niveau van NAP + 8,2 m onder het hart van het spoor. Bij de andere waterspanningsmeters is op dit tijdstip geen merkbare invloed van de passage van de wagon.

Uit geen van de metingen van de waterspanningsmeters op het niveau van NAP + 6,2 m en NAP + 6 m blijkt wateroverspanning door treinpassages op te treden. Daarom zijn vanaf dit niveau geen wateroverspanningen in rekening gebracht.

Resultaten berekeningen voor paneel met sleufbreedte 2,9 meter

Op basis van de gemeten versnellingen en wateroverspanningen is een analyse van de sleufstabiliteit gemaakt voor de doorsnede bij vluchtweg oost. Bij deze doorsnede is de afstand tussen hart spoor en sleuf minimaal, namelijk 3,2 m.

Inde analyse van de sleufstabiliteit is de maximale horizontale versnellingen gecombineerd met de gemiddelde wateroverspanning van 5 kPa over de afschuivende wig in rekening gebracht. De berekende veiligheidsfactor bedraagt 1,16. Dit is lager dan de volgens DIN 4085 vereiste factor van 1,3.

Deze veiligheidsfactor is bij de passage van één treinas gedurende in het totaal 10 uur meten, gevonden. De tijd waarin de veiligheid minder is dan de vereiste 1,3 is minder dan 0,01 seconde. Bij de overige circa 10.000 passages van treinen is de veiligheidsfactor voldoende. De kans op instabiliteit van de sleuf door het passeren van een trein wordt daarom aanvaardbaar geacht, te meer daar de grond onder deze zeer kort durende belastingen sterker is dan onder permanente belasting. Dit zogenaamde load rate effect ligt bij zand in de orde van 5 tot 10% (Huy et al, 2006).

In alle gevallen is de bentonietdruk voldoende hoog ten opzichte van de waterdruk, inclusief

de wateroverspanning.

Uitvoering Z-panelen

Bij het graven van de Z-panelen is het veiligheidsniveau verhoogd door een tijdelijke bemaling toe te passen waarbij de grondwaterstand met circa 1 meter is verlaagd. Tijdens de uitvoering zijn geen vervormingen van het hulpspoor opgetreden.

Conclusies

In Nederland wordt de DIN 4085 veelvuldig gebruikt voor de verificatie van de sleufstabiliteit van met bentoniet-suspensie gesteunde sleuven ten behoeve van diepwanden. In dit voorschrift wordt niet aangegeven hoe de dynamische belasting op het maaiveld naast de sleuf in rekening moet worden gebracht. Metingen uit de literatuur laten zien dat dynamische belastingen door treinpassages leidden tot een verhoging van de statische belasting met een factor 1,1 tot 1,6.

Omdat kortdurende belastingen op het maaiveld door treinpassages niet alleen versnellingen in de grond veroorzaken maar mogelijk ook wateroverspanningen werden veldmetingen verricht. Deltares heeft versnellingen en waterspanningen

in de grond onder en naast de baan gemeten tijdens treinpassages.

De metingen tonen aan dat het gecombineerde effect van een horizontale versnelling en wateroverspanning maatgevend is en kritischer dan het alleen rekening houden met een stootfactor gelijk aan 1,5.

Een opbouw van wateroverspanning gedurende een treinpassage werd in deze betrekkelijk doorlatende zand bodem niet geconstateerd. Daardoor is de tijdsduur van de kritische belasting gelijk aan de as-passage, dat wil zeggen in de orde van 10 milliseconde. Opvallend is dat de hoogste versnellingen niet optraden bij passage van het zwaarste materieel. Het lijkt dat de sterkste versnellingen meer worden veroorzaakt door toevallige meer afgesleten wielen of assen. Verder blijken in dit geval de hoogste waterspanningen niet samen te vallen met de hoogste versnellingen. ■

Reacties op dit artikel kunnen tot 29 november 2008 naar de uitgever worden gestuurd.



Figuur 10 Werk in uitvoering (foto Volker Staal en Funderingen).