

Onderzoek oorzaak falen fundering Prinses Margriettunnel

Eindrapportage



Onderzoek oorzaak falen fundering Prinses Margriettunnel
Eindrapportage

Auteur(s)



Partners

TNO

Onderzoek oorzaak falen fundering Prinses Margrietunnel

Eindrapportage

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud Gebouw Westraven
Contactpersoon	██████████
Referenties	offerte Deltares: 11209150-000-GEO-0003 dd. 21 maart 2023 en 11209150-000-GEO-0016 dd. 4 september 2023 opdrachtverlening Rijkswaterstaat: RWS-2023/37717 zonder datum
Trefwoorden	forensic engineering, verkeerstunnel, opdrijven constructie, veldonderzoek

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	29-09-2023
Projectnummer	11209150-004
Document ID	11209150-004-GEO-0026
Pagina's	63
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

██████████	
██████████	

Samenvatting

Op dinsdag 13 december 2022 is het tunneldeel "moot 26" van de noordelijke toerit van de Prinses Margriettunnel in de snelweg A7 nabij Sneek omhoog gekomen en is er schade aan het wegdek ontstaan. Hierdoor werd de tunnel onbruikbaar voor het wegverkeer en moest Rijkswaterstaat de tunnel tijdelijk sluiten.

Rijkswaterstaat heeft Deltares en TNO gevraagd onderzoek te doen om de oorzaak van het omhoog komen van moot 26 vast te stellen.

Het onderzoek is gestart met het verzamelen van de beschikbare informatie over het ontwerp, de bouw van de tunnel en kennis die onder andere opgebouwd is bij het onderzoek naar een vergelijkbaar incident in de Vlaketunnel in 2010. Dit heeft geleid tot een faalboom waarin alle mogelijke oorzaken systematisch geordend zijn.

Op basis van deze faalboom zijn steeds mogelijke scenario's beoordeeld. Bij deze beoordeling heeft de nadruk gelegen op het verzamelen van informatie in de tunnel en onderzoek aan de fundering van de tunnel om de verschillende scenario's te beoordelen en onderbouwd te accepteren of af te wijzen. Door de systematiek van de faalboom te volgen is elke volgende stap in het onderzoek gebaseerd op de resultaten van de voorgaande stappen.

De belangrijkste bevindingen van dit onderzoek zijn:

1. Moot 26 van de toerit noord is gefaseerd bezwaken. Circa anderhalf jaar voorafgaand aan het volledig bezwijken was de oostwand al circa 4-5 mm omhoog gekomen ten opzichte van de overige moten. Naar nu is gebleken was er toen al sprake van een begin van bezwijken. Bij moot 15 van de toerit zuid is in december 2022 een vergelijkbare verplaatsing van de westwand gemeten, hetgeen eveneens een begin van bezwijken is gebleken.
2. De moten zijn omhoog gekomen doordat de paalfundering niet meer in staat was om de opwaartse belasting door het water te weerstaan. Zeer waarschijnlijk is er sprake van een afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd en niet van een overbelasting door bijvoorbeeld een substantiële waterstandsverhoging.
3. De afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd is zeer waarschijnlijk veroorzaakt door het breken van voorspanstaven in de trekpalen en niet door een afname van de geotechnische sterkte van de paalfundering. Bij alle zeven onderzochte palen van moot 26, bij vijf van de eenentwintig onderzochte palen van moot 15 en bij twee individuele palen van de moten 18 en 21 is de voorspanstaaf gebroken aangetroffen.
4. Alle onderzochte breukvlakken van de gebroken voorspanstaven vertonen hetzelfde bezwijkmechanisme. Deze voorspanstaven zijn zeer waarschijnlijk gebroken als gevolg van loog-spanningscorrosie. Loog-spanningscorrosie heeft kunnen optreden doordat er sprake is van onvolkomenheden in de omhulling om de voorspanstaven, waardoor cement- dan wel poriewater (loog) vanuit het beton is doorgedrongen tot aan de voorspanstaven.
5. Ten aanzien van de oorzaak van de onvolkomenheden in de omhulling op de voorspanstaven heeft het onderzoek vooralsnog geen uitsluitsel gegeven.

Om de conclusies van het uitgevoerde onderzoek verder te verifiëren wordt geadviseerd om vervolgonderzoek uit te voeren. Dit vervolgonderzoek dient tevens om meer inzicht te verkrijgen in het mechanisme dat heeft geresulteerd in de onvolkomenheden in de omhulling van de voorspanstaven.

Hoe onderzocht kan worden of hetzelfde faalmechanisme zou kunnen optreden bij andere constructies, met een vergelijkbare fundering, staat beschreven bij de aanbevelingen. Daar wordt ook aandacht besteed aan de vraag hoe deze constructies kunnen worden bewaakt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond en doel van dit rapport	8
1.2	Opbouw van dit rapport	8
2	Opzet onderzoek	10
2.1	Uitgevoerd onderzoek	10
2.2	Onderliggende gegevens	10
2.2.1	Bij de start beschikbare (historische) gegevens	10
2.2.2	Rapportages van de uitgevoerde werkzaamheden	10
3	Opbouw constructie	12
3.1	Beschrijving constructie	12
3.2	Fundering van de toeritten	14
3.3	Aangehouden coderingen	17
3.4	Situatie ten tijde van het onderzoek	18
4	Resultaten veldonderzoek - voorspanstaven in geopende conussen	21
4.1	Overzicht	21
4.2	Resultaten van de beproevingen	22
4.2.1	Gebroken staven	23
4.2.2	Spanningsniveau	24
4.2.3	Overige metingen	26
5	Scenario analyses	27
5.1	Algemeen	27
5.2	Tijdlijn van bezwijken	28
5.3	Bezwijkmechanisme	31
5.4	Startpunt van het bezwijken	34
5.5	Oorzaak afname sterkte voorspanstaven	35
5.6	Oorzaak loog-spanningscorrosie	36
6	Conclusies	37
7	Aanbevelingen	38
7.1	Vervolgonderzoek	38
7.2	Overige kunstwerken met hetzelfde type trekpalen	38
	Referenties	41

	Bijlagen	42
A	Beschrijving rapporten uit dit onderzoek	43
A.1	Tussenrapportage	43
A.2	Samenvatting historische data	43
A.3	Plan van aanpak	43
A.4	Verslag veldonderzoek	44
A.5	Impedantie-onderzoek	44
A.6	Grondonderzoek	44
A.7	Grondwateronderzoek	45
A.8	Verslag onderzoek breukvlakken	46
A.9	MIC onderzoek	46
A.10	Insar	46
B	Faalboom voor onderzoek aan de Vlaketunnel	47
C	Geopende conussen	48
C.1	Locaties van de conussen en voorspanstaven	48
C.2	Figuren van de geopende conussen met de resultaten	54
C.3	Grafieken van de trekproeven	60
C.4	Resultaten testen aanwezige kracht in voorspanstaaf	62

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel van dit rapport

Op dinsdag 13 december 2022 stelde een weginspecteur van Rijkswaterstaat schade aan het asfalt vast bij moot 26 van de Noordelijke toerit van de Prinses Margrietunnel (snelweg A7). Moot 26 bleek omhooggekomen. Hierdoor werd de tunnel onbruikbaar voor het wegverkeer en moest Rijkswaterstaat de tunnel tijdelijk sluiten.

Rijkswaterstaat heeft Deltares gevraagd een onderzoek naar de oorzaak van het falen van de tunnel uit te voeren. De resultaten van dit onderzoek kunnen van belang zijn voor de onderbouwing van een voorstel voor het herstel van de fundering, maar ook voor de risico-analyse van andere constructies die een vergelijkbare fundering hebben.

Het onderzoek is uitgevoerd door een team van onderzoekers van TNO en Deltares. Dit team heeft intensief samengewerkt met de projectleiding van Rijkswaterstaat en de medewerkers van Van Hattum en Blankevoort die het aannemerswerk voor het veldonderzoek heeft uitgevoerd en tevens informatie uit het ontwerpproces van de nieuwe fundering heeft gedeeld.

Dit rapport geeft een scenario analyse van het faalmechanisme voor moot 26. Het geeft aan waarom bepaalde faalmechanismen waarschijnlijk zijn (verificatie) en andere mechanismen niet (falsificatie). Ten behoeve van het opstellen van deze rapportage is gebruik gemaakt van deelonderzoeken die zijn uitgevoerd en zijn vastgelegd in separate rapportages.

1.2 Opbouw van dit rapport

Hoofdstuk 2 geeft een beknopt overzicht van het verloop van de verschillende onderzoeken die aan de analyses in dit rapport ten grondslag liggen. Dit hoofdstuk is vooral bedoeld om kort aan te geven welke informatie er tijdens het onderzoek beschikbaar is gekomen.

Hoofdstuk 3 geeft een korte beschrijving van de constructie inclusief de fundering. Dit is beperkt tot de informatie die nodig is om de redeneringen in dit rapport te kunnen volgen. Belangrijk onderdeel is dat de lezer de ruimtelijke indeling van de constructie overziet, zodat de verschillende onderdelen goed kunnen worden geplaatst.

Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van het veldonderzoek aan de palen dat in de periode van maart tot en met augustus 2023 is uitgevoerd.

Hoofdstuk 5 geeft een beschrijving van de mogelijke scenario's. Dit hoofdstuk beschrijft een stapsgewijs systeem waarbij aan de hand van de faalboom mogelijke scenario's worden beoordeeld op de waarschijnlijkheid. Alleen de niet-verworpen takken van de faalboom worden behandeld, waarbij steeds per stap de meest waarschijnlijke oorzaak van falen wordt achterhaald. Voor deze analyse worden de gegevens gebruikt die zijn verzameld tijdens het veldonderzoek, naast beschikbare data en globale analyses over het gedrag van de fundering en de constructie.

Hoofdstuk 6 geeft de conclusies ten aanzien van het meest waarschijnlijke scenario.

Hoofdstuk 7 kijkt tenslotte op basis van de bevindingen naar de toekomst. Dit betreft enerzijds het onderzoek naar falen, waarbij aangegeven wordt welke activiteiten nog nodig zijn om de bevindingen verder te verifiëren, en anderzijds een advies over de activiteiten die mogelijk zijn om te voorkomen dat vergelijkbare constructies door het hier gevonden mechanisme zullen falen.

2 Opzet onderzoek

Om de oorzaak van het falen te kunnen bepalen is onderzoek aan de bestaande funderingsconstructie noodzakelijk. Voor de Prinses Margriettunnel is dit onderzoek direct gestart na het falen van moot 26. Rijkswaterstaat heeft hiertoe Deltares een opdracht gegeven.

2.1 Uitgevoerd onderzoek

Op 13 november 2010 is een deel (moot 9) van de oostelijke tunnelinrit van de Vlaketunnel omhoog gekomen. De oorzaak van dat falen is toentertijd ook onderzocht. Op basis van de gevolgde aanpak bij de Vlaketunnel en de beschikbare kennis uit dat project is een plan van aanpak voor het onderzoek aan de constructie van de Prinses Margriettunnel opgesteld, zie rapport [1], en is het onderzoek gestart.

Gaandeweg het project is er extra kennis over de situatie in de Prinses Margriettunnel beschikbaar gekomen. De werkzaamheden zijn voortdurend aangepast aan de bevindingen in het project, waardoor verschillende scenario's konden worden weggestreept, en het onderzoeken van meer waarschijnlijke scenario's ander onderzoek vereiste dan oorspronkelijk was voorzien. De strategie is steeds geweest om de faalboom systematisch af te lopen. De faalboom die voor de Vlaketunnel is opgezet is hierbij het uitgangspunt geweest, zie bijlage B.

De veldwerkzaamheden die zijn uitgevoerd zijn verwerkt in de onderhavige rapportage. In de twee rapporten "Verslag veldonderzoek Prinses Margriettunnel" – "Stand van zaken juni 2023" en "Werkzaamheden juni 2023 – september 2023" is een overzicht gegeven van die werkzaamheden [3], [4].

2.2 Onderliggende gegevens

2.2.1 Bij de start beschikbare (historische) gegevens

Bij de start van het onderzoek zijn door Rijkswaterstaat de nog beschikbare tekeningen en overige gegevens van de fundering en constructie van de tunnel beschikbaar gemaakt [2]. Ook zijn recente metingen van inspecties beschikbaar.

De resultaten van het onderzoek aan de Vlaketunnel en een aantal stukken die hierover later zijn verschenen zijn opgespoord. Ook zijn, mede in verband met het noodzakelijke herstel (of verbetering) van de fundering, historische gegevens van de omgeving bijeengebracht. Deze waren voor dit onderzoek beschikbaar.

2.2.2 Rapportages van de uitgevoerde werkzaamheden

Tijdens de werkzaamheden zijn verschillende deelonderzoeken uitgevoerd. Deze activiteiten zijn in afzonderlijke documenten gerapporteerd. Voor een deel betreft dit rapporten die specifiek voor het onderzoek naar de oorzaak van het falen zijn uitgevoerd, maar ook onderzoeken die voor het herstel noodzakelijk zijn, maar mogelijk ook een bijdrage kunnen geven voor het onderzoek naar het falen. Bijlage A geeft een overzicht van de rapporten.

Dit betreft onder meer onderzoek naar:

- De eigenschappen van de ondergrond en de grondwaterstand uitgevoerd door Wiertsema en Deltares.

- De mogelijkheid om de kwaliteit van de omhulling van de voorspanstaven met elektrische methode te bepalen, uitgevoerd door C-cube International.
- De mogelijkheid om de vervormingen van de tunnel met satellietmetingen te bepalen uitgevoerd door de CIV van Rijkswaterstaat.
- De mogelijke invloed van microbiologische corrosie op het bezwijken uitgevoerd door Microbial Analysis.
- De oorzaak van de breuk in de voorspanstaven uitgevoerd door TNO.

3 Opbouw constructie

3.1 Beschrijving constructie

De Prinses Margrietunnel is een verkeerstunnel die is gesitueerd in rijksweg A7, tussen Joure en Sneek, onder het Prinses Margrietkanaal (Figuur 3.1). De tunnel is gebouwd in de periode 1976-1978 en was ten tijde van het onderzoek dus circa 44 jaar oud.



Figuur 3.1 Overzicht van de zuidzijde van de tunnel (foto Beeldbank RWS).

De constructie is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- Een half open toerit aan de zuid-oost (Joure) zijde (in het vervolg aangeduid met “toerit zuid”).
- Een gesloten aquaductmoot onder het Prinses Margrietkanaal.
- Een half open toerit aan de noord-west (Sneek) zijde (in het vervolg aangeduid met “toerit noord”).

Als eerste zijn de beide toeritten gebouwd in een droge bouwkuip. Vervolgens is de aquaductmoot gebouwd in de toerit zuid. Na voltooiing van de aquaductmoot is deze in het kanaal gevaren en afgezonken en zijn de toeritten daarop aangesloten.

Omdat de calamiteit heeft plaatsgevonden in de toerit noord, geeft het vervolg van dit hoofdstuk alleen een nadere beschrijving van de toeritten en niet van de gesloten aquaductmoot.

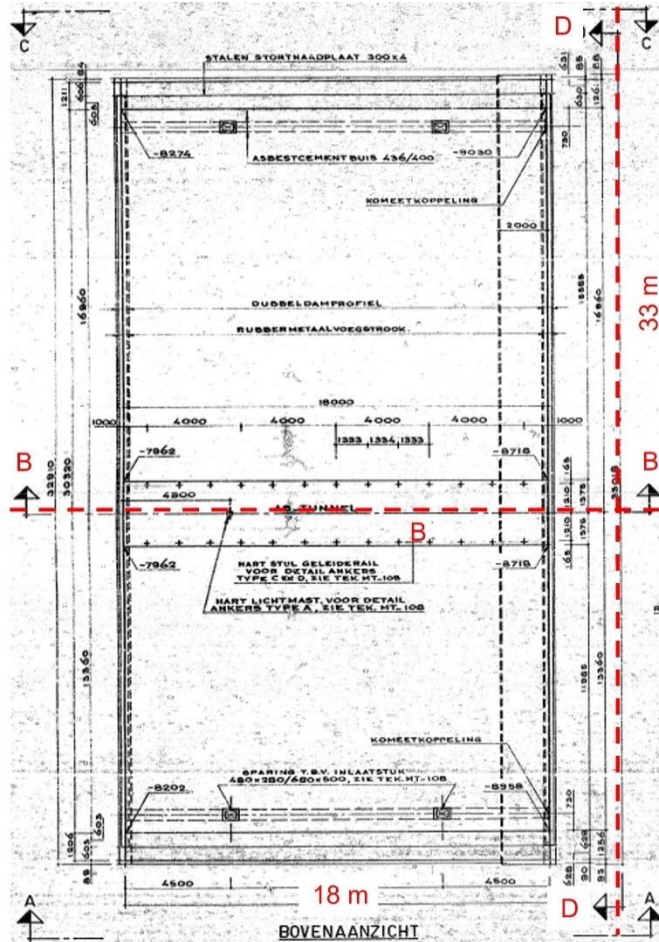
De beide toeritten van de tunnel zijn opgebouwd uit U-vormige betonmoten over de volledige breedte van de toeritten van circa 30 m. De moten hebben elk een lengte van 18 m, met tussen de moten een dilatatieprofiel (W9U profiel) voor de waterdichting.

Toerit zuid heeft 22 moten, die vanaf de zuidzijde tot aan de tunnel zijn genummerd van 1 tot en met 22. De diepst gesitueerde moot, moot 22, ligt met de onderzijde op circa -14 m NAP en heeft een vloerdikte van circa 1,8 m. Naarmate de moten hoger zijn gesitueerd neemt de vloerdikte af.

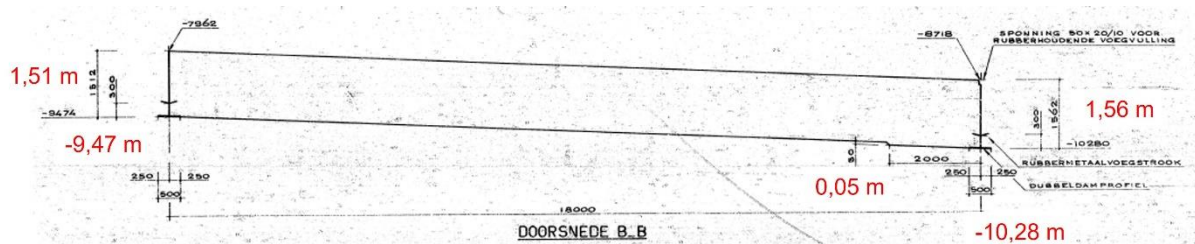
Toerit noord heeft 26 moten, die vanaf de tunnel tot aan de noordzijde zijn genummerd van 23 tot en met 48. De diepst gesitueerde moot, moot 23, ligt met de onderzijde op circa -12 m

NAP en heeft een vloerdikte van circa 1,7 m. Naarmate de moten hoger zijn gesitueerd neemt deze vloerdikte af.

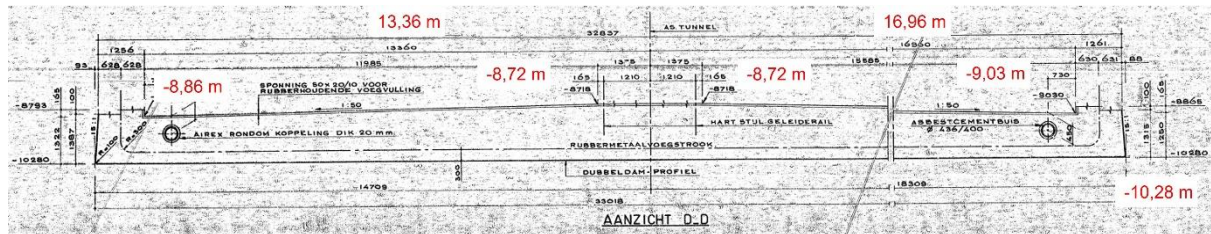
Bij de calamiteit in december 2022 is moot 26 van de toerit noord omhoog gekomen. Deze moot heeft een breedte van 33 m en een lengte van 18 m (Figuur 3.2). Ter plaatse van de tunnel-as heeft de vloer van deze moot een dikte van 1,51 m (Figuur 3.3) en deze dikte neemt richting de wanden van de moot af (Figuur 3.4). De onderzijde van de vloer van deze moot ligt aan de lage zijde op -10,28 m NAP en aan de hoge zijde op -9,47 m NAP. Aan de hoge zijde heeft de moot een totale hoogte van circa 9,3 m en aan de lage zijde circa 9,9 m.



Figuur 3.2 Bovenaanzicht vloer moot 26.



Figuur 3.3 Doorsnede vloer moot 26 ter plaatse van tunnel-as (doorsnede B-B).



Figuur 3.4 Aanzicht vloer moot 26 aan de lage zijde van de moot (aanzicht D-D).

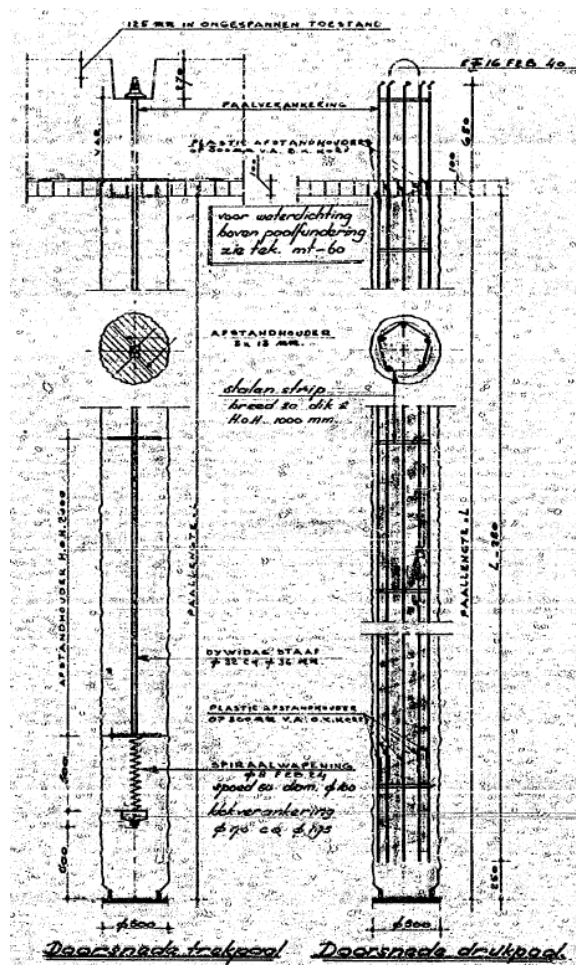
3.2 Fundering van de toeritten

De hoogst gelegen moten van de beide toeritten zijn gefundeerd op staal. Bij de toerit zuid zijn dit de moten 1-4 en bij de toerit noord de moten 39-48. De overige moten zijn gefundeerd op betonnen Vibropalen met een diameter van 450 mm. Dit zijn drukpalen van gewapend beton (voor de ondiepere moten) en trekpalen van voorgespannen beton (voor de diepere moten, Figuur 3.5). De trekpalen zijn uitgevoerd met een centrale voorspanstaaf met een diameter van 32 dan wel 36 mm. Onder de vloer van de toeritten zijn de trekpalen verticaal geplaatst; onder de wanden zijn het deels verticale palen en deels schoorpalen. De helft van de schoorpalen staat naar binnen gericht, de andere helft naar buiten gericht.

Tabel 3.1 en Tabel 3.2 geven een overzicht van het aantal en het type palen per moot. In die tabellen is tevens de gemiddelde paallengte per moot aangegeven.

De voorspanstaven in de trekpalen zijn Dywidagstaven. Teneinde aanhechting met het beton te voorkomen zijn die voorspanstaven omhuld met Densoband. Verder zijn de voorspanstaven voorzien van afstandhouders, met een hart-op-hart afstand van 2 m. De trekpalen met een voorspanstaaf $\varnothing 32$ mm zijn in het bestek aangeduid als 45-tons trekpaal met een aanvangsvoorspanning van 55 ton (550 kN). De trekpalen met een voorspanstaaf $\varnothing 36$ mm zijn in het bestek aangeduid als 60-tons trekpaal met een aanvangsvoorspanning van 70 ton (700 kN).

In het bestek en op de beschikbare constructietekeningen is geen informatie gegeven over de staalkwaliteit van de voorspanstaven. Vermoedelijk betreft het staalkwaliteit FeP 1030/1050.



Figuur 3.5 Tekening trekpaal (links) en drukpaal (rechts).

Tabel 3.1 Gegevens van de paalfundering toerit zuid.

Moot	Aantal palen per moot			Gemiddelde lengte (m)
	Drukpalen	Trekpalen met voorspanstaaf		
		Ø32 mm	Ø36 mm	
Toerit zuid				
5	24			15.65
6	24			15.05
7		16		14.45
	8			14.15
8		16		13.95
	8			13.65
9		32		13.95
10		32		12.75
11		12	24	13.60
12			36	12.95
13			36	12.05
14			50	11.55
15			54	10.85
16			56	10.25
17			73	9.75
18			78	9.25
19			80	9.05
20			86	8.95
21			82	8.95
22			90	8.45
			12	8.95

Tabel 3.2 Gegevens van de paalfundering toerit noord.

Moot	Aantal palen per moot			Gemiddelde lengte (m)
	Drukpalen	Trekpalen met voorspanstaaf		
		Ø32 mm	Ø36 mm	
Toerit noord				
23			81	8.85
			8	10.05
24			58	10.05
25			52	9.55
26			50	10.95
27			40	11.45

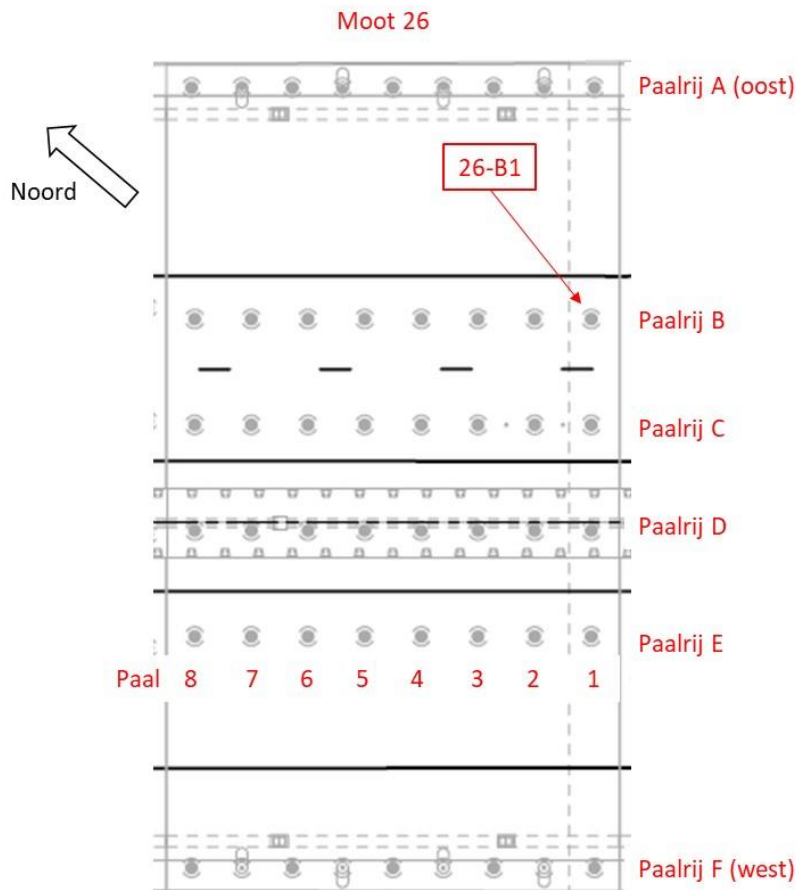
Moot	Aantal palen per moot			Gemiddelde lengte (m)
	Drukpalen	Trekpalen met voorspanstaaf		
		Ø32 mm	Ø36 mm	
Toerit noord				
28			34	11.85
29			38	12.55
30		10	24	12.35
31		8	20	12.65
32		8	20	11.65
33		20		11.95
	8			11.65
34		16		12.05
	8			11.75
35		16		12.15
	8			11.85
36		16		12.35
	8			12.05
37	24			12.75
38	24			13.05

3.3 Aangehouden coderingen

Het onderzoek heeft zich voor een belangrijk deel gericht op de trekpalen onder de moten. De individuele palen zijn in het onderhavige onderzoek gecodeerd met achtereenvolgens:

- Mootnummer.
- Paalrij: de paalrijen zijn van oost naar west gecodeerd met A, B, C
- Volgnummer paal: per paalrij zijn de palen van zuid naar noord gecodeerd met 1, 2, 3 ...

Als voorbeeld van deze codering geeft Figuur 3.6 de codering van de palen van moot 26.



Figuur 3.6 Codering van de palen in moot 26 (bovenzijde figuur is noordoost richting).

Bij de uitvoering in het veld blijkt het voor Van Hattum en Blankevoort beter te werken door de palen te tellen op de volgorde van de uitvoering van de werkzaamheden. Deze nummering is in bijlage C.1 opgenomen, zodat er een eenduidige sleutel is tussen deze twee nummeringen.

3.4 Situatie ten tijde van het onderzoek

Direct na de calamiteit is de omhoog gekomen moot 26 voorzien van ballast, teneinde de moot weer terug te brengen in de oorspronkelijke positie en verdere schade te voorkomen. In aanvulling daarop zijn de overige moten met trekpalen preventief voorzien van ballast. Als gevolg van deze ballast waren delen van de beide toeritten niet bereikbaar voor onderzoek.

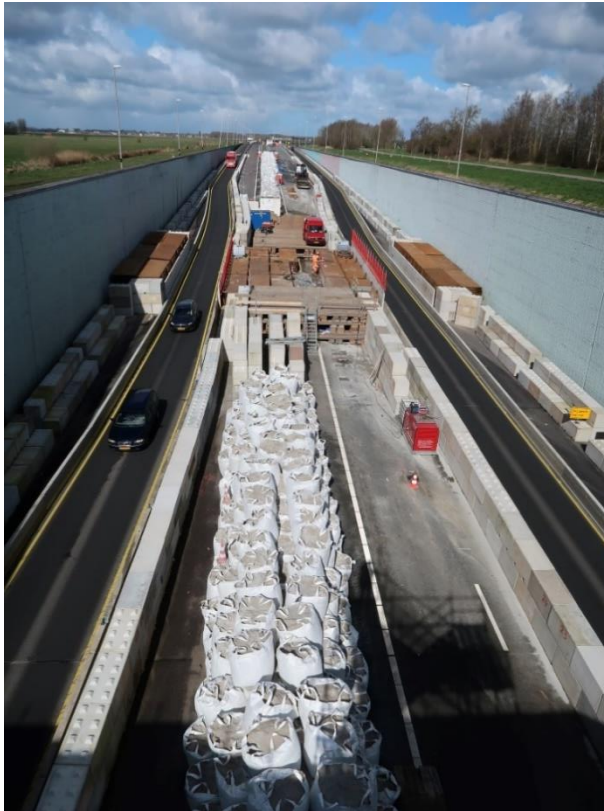
De situatie in de beide toeritten ten tijde van het onderzoek is weergegeven in Figuur 3.7, Figuur 3.8 en Figuur 3.9. Er is ballast aanwezig langs de wanden en op de middenberm. Zoals te zien is in Figuur 3.9 hebben de moten 25, 26 en 27 in toerit Noord veel meer ballast dan de overige moten.



Figuur 3.7 Situatie ten tijde van het onderzoek – toerit zuid (gezien in zuidelijke richting).



Figuur 3.8 Situatie ten tijde van het onderzoek – toerit zuid (deel nabij tunnel).



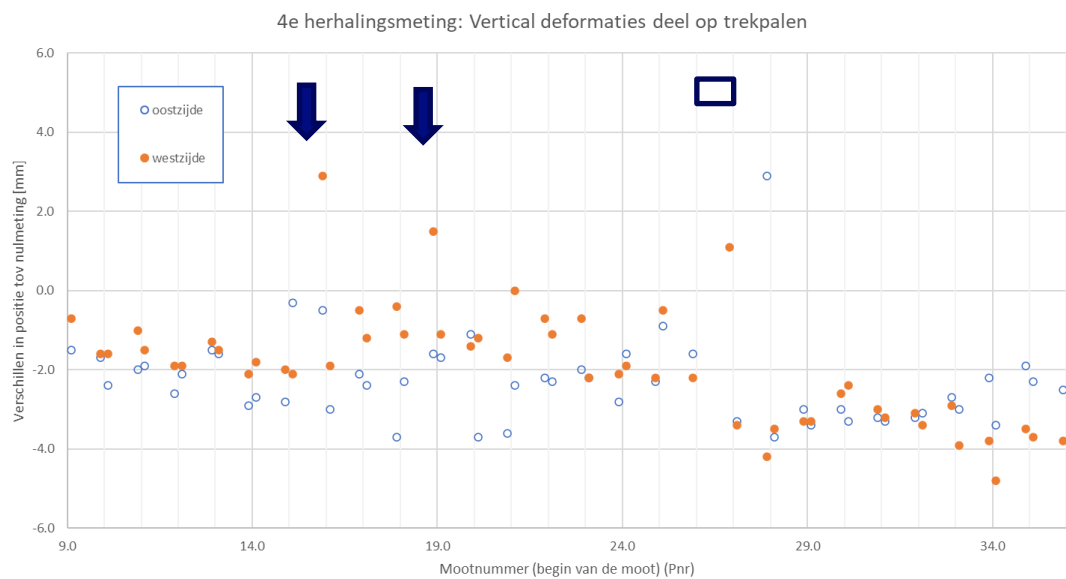
Figuur 3.9 Situatie ten tijde van het onderzoek – toerit noord.

4 Resultaten veldonderzoek - voorspanstaven in geopende conussen

4.1 Overzicht

Op basis van het plan van aanpak zijn een aantal conussen geopend. Afwijkingen ten aanzien van het plan van aanpak zijn in eerste instantie ontstaan door de aanwezigheid van de ballast, waardoor niet alle conussen bereikbaar waren. De moten 25 en 27 waren zeer beperkt toegankelijk en van moot 26 was alleen rij C toegankelijk. In de overige moten bleken in het algemeen vijf van de zes gekozen palen bereikbaar. In een later stadium is op basis van de deformatie metingen moot 15 toegevoegd aan het onderzoek. Moot 15 vertoonde in de liggingsmetingen op 21-12-2022 een relatief grote hoekverdraaiing, die vergelijkbaar is met de hoekverdraaiing die moot 26 in de meting van juni 2021 had.

Figuur 4.1 toont de verticale vervormingen in de meting van 21-12-2022 ten opzichte van de nulmeting, die in 2010 is uitgevoerd. Per moot zijn twee metingen beschikbaar. Deze zijn aan het begin en het einde van de moot getekend. In de figuur zijn de moten 15 en 18 aangegeven met een donkere pijl. Deze hebben ook een relatief grote rotatie: moot 15 heeft een verschilverplaatsing van 4.5 mm aan de westzijde, moot 18 heeft een verschilverplaatsing van 2.5 mm aan de westzijde. Omdat moot 26 in de meting voor bezwijken een vergelijkbare vervorming toonde, is besloten extra onderzoek te doen op moot 15.



Figuur 4.1 Verticale deformaties gemeten op 21 december 2023. De nummering op de horizontale as is feitelijk de voegnummering. Een moot ligt tussen twee voegen waarvan het nummer steeds één verschilt. Als voorbeeld moot nummer 9 ligt tussen de voegen nummer 9 en nummer 10. Voor elke voeg (voor elke zijde van de tunnel) zijn twee punten geplot, iets links van de verticale lijn de verplaatsing van de moot links van de voeg en iets rechts van de verticale lijn de verplaatsing van de moot rechts van de voeg. De waarden van moot 26 (ter plaatse van het blokje olopend tot 45 mm) ontbreken i.v.m. de schaal van de y-as.

Tabel 4.1 geeft in tabelvorm het overzicht van het aantal conussen dat per moot is geopend.

In het begin werd uitgegaan van de paal-positie op de ontwerptekening en werd daar de vloer opengehakt. Als de conus niet zichtbaar werd, werd besloten een groter gebied tot 1*1 m² open te hakken. Dit bleek niet overal te werken. Wel bleek dat de bovenwapening van de vloer ter plaatse van een conus veranderde: of een staaf eindigde of twee staven waren uit elkaar gebogen. Daarom is getracht de wapening eerst met non-destructieve technieken in beeld te brengen. Twee methodes zijn getest: de eerste op basis van ferro-magnetisme en de tweede op basis van radar. Deze laatste methode leverde bevredigende locatie data.

Tabel 4.1 Overzicht van geopende conussen per moot.

Moot	Aantal gepland	Aantal geopend	Opmerking
10	5	2	de plaats van één ontbrekende conus werd pas later gevonden, Twee locaties lagen te dicht bij de aanwezige ballast
14	5	5	
15	0	24	moot 15 is later op basis vervormingen toegevoegd
18	5	5	
21	5	5	
25	8	4	4 palen onbereikbaar door ballast
26	8	8	één rij (rij C) bereikbaar, volledig getest
27	8	0	alle palen onbereikbaar door ballast
30	5	4	een locatie (ontbrekende conus) pas later gevonden
34	5	3	2 palen onbereikbaar door ballast

Bijlage C.1 geeft de locatie van de conussen. Hierbij moet onderscheid worden gemaakt tussen de verwachte locatie op basis van de ontwerptekeningen en de in het veld gevonden locatie. De verwachte locaties zijn bepaald door de aannemer in verband met het ontwerp van de nieuwe fundering. De locatie in het veld is door Van Hattum en Blankevoort met GPS ingemeten. Omdat er aanzienlijke verschillen bleken te zijn, is door Van Hattum en Blankevoort definitief besloten om de plaats van alle trekpalen door middel van radar te bepalen. In de tabel zijn twee nummeringen gegeven (zie paragraaf 3.3). Bijlage C.2 geeft de figuren van de locaties, met de resultaten van de bevindingen.

4.2 Resultaten van de beproevingen

Na het openen van de conus zijn in beginsel twee beproevingen uitgevoerd:

- Een test op breuk van de Dywidag voorspanstaaf in alle geopende conussen.
- Een test op aanwezige spanning op een deel van de geopende conussen (in de praktijk wordt deze test een trekproef genoemd) als de voorspanstaaf niet was gebroken.

Het testen op aanwezige spanning is tijdelijk gestaakt, nadat de voorspanstaaf in paal 14-E8 tijdens het testen is gebroken. Deze breuk trad op bij een trekkracht van 700 kN, net boven het niveau van de aanwezige voorspanning. Aangezien dit een reductie van het trekvermogen van de fundering oplevert en dus de kans van opdrijven van een moot vergroot, is het aantal trekproeven ingeperkt ten opzichte van het oorspronkelijke plan.

Deze paragraaf geeft een samenvatting van de resultaten van dit onderzoek.

4.2.1 Gebroken staven

Het testen van de voorspanstaven op breuk is uitgevoerd met een kraan. Eerst is over het schroefdraad van de voorspanstaaf een mof geschroefd, waarna via een strop onder die mof een trekkracht is aangebracht van maximaal 50 kN. Een voorspanstaaf is als niet-gebroken aangemerkt als deze bij deze test niet omhoog kwam.

Tabel 4.2 geeft het overzicht van de gebroken staven per moot.

Tabel 4.2 Resultaten geopende conussen.

Moot	Aantal conussen geopend	Aantal staven getest	Aantal staven gebroken	Opmerking
10	2	2	0	
14	5	5	1	StAAF tijdens trekproef gebroken bij 700 kN
15	24	21	5	Moot is later, op basis van vervormingen, toegevoegd
18	5	5	1	
21	5	5	1	
25	4	4	0	
26	8	8	8	Bezweken moot; één stAAF was al gebroken ten tijde van de bouw
27	0	0	0	Conussen waren niet bereikbaar door aanwezige ballast
30	4	4	0	
34	3	2	0	

Een opvallend resultaat is dat er in vrijwel alle diepe moten een gebroken stAAF is gevonden. Bij de bezweken moot 26 is het mogelijk dat de voorspanstaven tijdens het falen allemaal gebroken zijn, daarom worden de resultaten van moot 26 niet meegeteld. Voor de overige moten wordt gevonden dat er van de 48 geteste staven 8 gebroken zijn. Dit is 16% en is onverwacht veel. Als moot 15, die al in een beginstadium van bezwijken lijkt te zijn, niet wordt meegeteld, is 3 van de 27 geteste staven gebroken, of te wel 11%. Terzijde wordt opgemerkt dat deze informatie is gebruikt om de ballast in de tunnel opnieuw te dimensioneren, zodat de veiligheid tegen opdrijven aan gestelde eis voldoet.

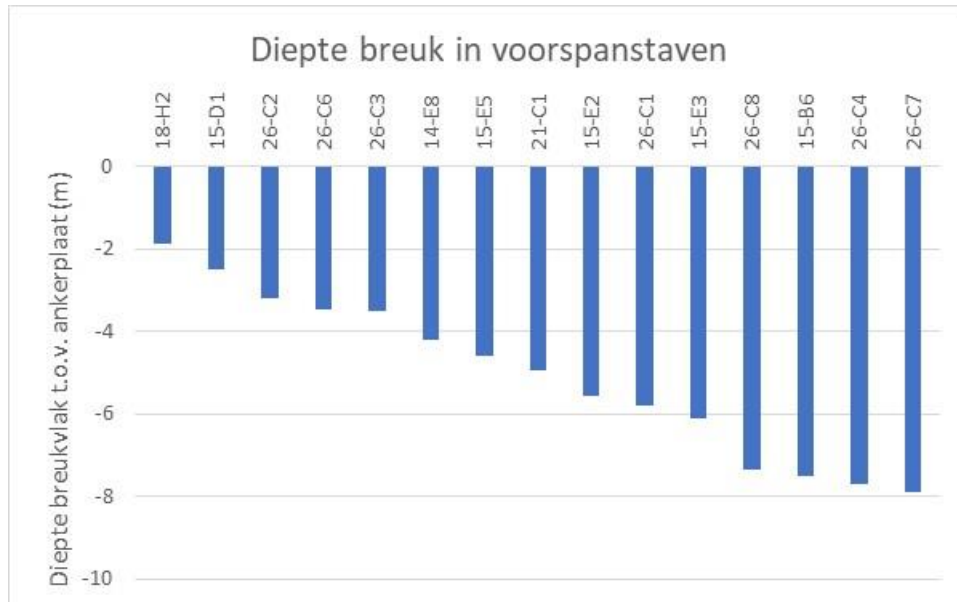
De gebroken staven zijn behoedzaam met een kraan uit de constructie verwijderd. De staven zijn visueel geïnspecteerd en de lengte van het verwijderde deel is opgemeten, waarmee de diepte van de breuk kan worden bepaald. Na droging zijn de staven in stukken gesneden. Het deel met het breukvlak en additionele delen van enkele staven zijn naar het TNO laboratorium in Petten gebracht, de overige delen zijn in een container in de tunnel opgeslagen. Details van de manier waarop de gebroken voorspanstaven zijn behandeld tijdens het verwijderen, en het daarop volgende onderzoek zijn beschreven in het deelrapport "Onderzoek voorspanstaven Prinses Margrietunnel" [6].

Figuur 4.2 geeft het niveau van de breuk ten opzichte van de onderzijde van de verankeringssmoer, in oplopende diepte. De code van de paal staat boven elke stAAF in het diagram vermeld. Het niveau is naar beneden uitgezet, zodat er een beeld over de diepte ten opzichte van de vloer ontstaat. Het niveau van de breuk ligt duidelijk over een groot deel van de lengte van de paal. Alle staven zijn ruim onder de verbinding tussen de paal en de vloer gebroken. Dit suggereert dat het niet deze verbinding (waar een maximale dwarskracht en

maximaal buigend moment door horizontale verschilverplaatsingen van vloer ten opzichte van de ondergrond wordt verwacht) is die kritisch is in de constructie.

Opgemerkt dient te worden dat bij paal 26-C5 de voorspanstaaf al tijdens de bouw is gebroken, op een diepte van 11,7 m ten opzichte van de onderzijde van de verankeringsmoer. Die staaf is niet weergegeven in de figuur.

Bij een aantal palen met een gebroken staaf kwam er een behoorlijke waterstroom op gang na het verwijderen van de staven. Dit geeft aan dat deze palen scheuren bevatten, maar deze zullen vermoedelijk na het breken van de voorspanstaaf zijn ontstaan. De plaats van de scheuren is verder niet onderzocht omdat dit als vervolgschade wordt opgevat.



Figuur 4.2 Weergave van het niveau van de breuk (oplopend op diepte t.o.v. onderzijde verankeringsmoer).

4.2.2 Spanningsniveau

Daarna is gestart met het testen van de spanning in de voorspanstaven, op de voorspanstaven in de moten 10, 14, 15, 18 en 21 die niet gebroken waren. Figuur 4.3 en Figuur 4.4 geven een impressie van het testen van de aanwezige spanning in de voorspanstaaf. Daarbij wordt een trekkracht op de voorspanstaaf aangebracht en wordt de verplaatsing van de kop van de staaf gemeten.

De belasting wordt met stappen van ongeveer 50 kN verhoogd tot maximaal 600 kN (32 mm voorspanstaaf) of 700 kN (36 mm voorspanstaaf). Na het bereiken van de maximale kracht wordt de belasting nog twee minuten vastgehouden, om na te gaan of er relaxatie optreedt. Indien de verplaatsing bij een lagere belasting versneld begint op te lopen wordt de belasting niet meer verder opgehoogd en de dan heersende kracht twee minuten vastgehouden.

Bij moot 10 zijn de vervormingen ten tijde van de trekproef op een onjuiste wijze gemeten, waardoor voor de voorspanstaven in die moot geen kracht vervormingsdiagram kon worden opgesteld. Bij de overige moten worden de vervormingen gemeten op de bovenzijde van de verlengstaaf, zie Figuur 4.3 de staaf met de 'barcode'. Omdat deze verlengstaaf niet onder voorspanning staat, zal deze verlengen onder de aangebrachte kracht, terwijl de voorspanstaaf pas zal gaan verlengen als de aangebrachte kracht boven het voorspanniveau uitkomt. Bijlage C.3 geeft de gemeten verplaatsing ter plaatse van de 'barcode' op de verlengstaaf als functie van de opgelegde trekkracht. Het knippunt in die grafieken duidt op

het overschrijden van de voorspankracht in de voorspanstaaf, omdat vanaf dat moment ook de voorspanstaaf mee vervormt.

Nadat bij het testen van de achtste voorspanstaaf (paal 14-E8) de voorspanstaaf brak, is het testen op voorspanning gestopt vanuit het oogpunt van veiligheid van de tunnel. Na het constructief toetsen van moten met eventueel gebroken voorspanstaven is besloten om het testen alleen bij moot 15 te vervolgen.

De tabel in Bijlage C.4 geeft de resultaten van alle uitgevoerde trekproeven. Deze tabel geeft de maximaal aangebrachte trekkracht en de voorspankracht in de voorspanstaven. De voorspankracht is een ingeschatte waarde, omdat de vervormingen niet continu zijn gemeten, maar stapsgewijs.

Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat alle onderzochte voorspanstaven nog onder voorspanning staan. De voorspanning over de 19 geteste palen was gemiddeld 629 kN met een standaard afwijking van 33 kN. Het is op basis van de meetresultaten niet aannemelijk dat de voorspanning in de voorspanstaven zo sterk is afgenomen dat er scheuren in de beton van de palen optreden.



Figuur 4.3 Opstelling voor het testen van de aanwezige kracht in de voorspanstaaf.



Figuur 4.4 Opname van de vervorming van de voorspanstaaf.

4.2.3 Overige metingen

De overige metingen aan de paalkop en het voorspankanaal bleken slecht uitvoerbaar en onnauwkeurig. Het meten van de diepte van de koppen van de voorspanstaaf is niet goed mogelijk, omdat het vloerniveau slecht gedefinieerd is. Het meten van de lengte van de schroefdraad is gestopt, omdat verschillende voorspanstaven waren afgeslepen, mogelijk om de dekking op de staaf na afdichten van de conus voldoende te houden.

De metingen in het voorspankanaal zijn niet uitgevoerd, omdat er in veel voorspankanalen snel een grote waterstroom op gang kwam. Omdat de staven steeds ruim onder de onderzijde van de vloer waren gebroken, is niet getracht dit probleem op te lossen, omdat de situatie aan de bovenzijde van het voorspankanaal weinig lijkt bij te dragen aan de oorzaak van het falen op grotere diepte. Figuur 4.2 bevestigt deze keuze. Opgemerkt wordt dat dit afwijkt van de situatie in de Vlaketunnel, waarin wel een aantal staven in de vloer en één staaf op de overgang was gebroken.

5 Scenario analyses

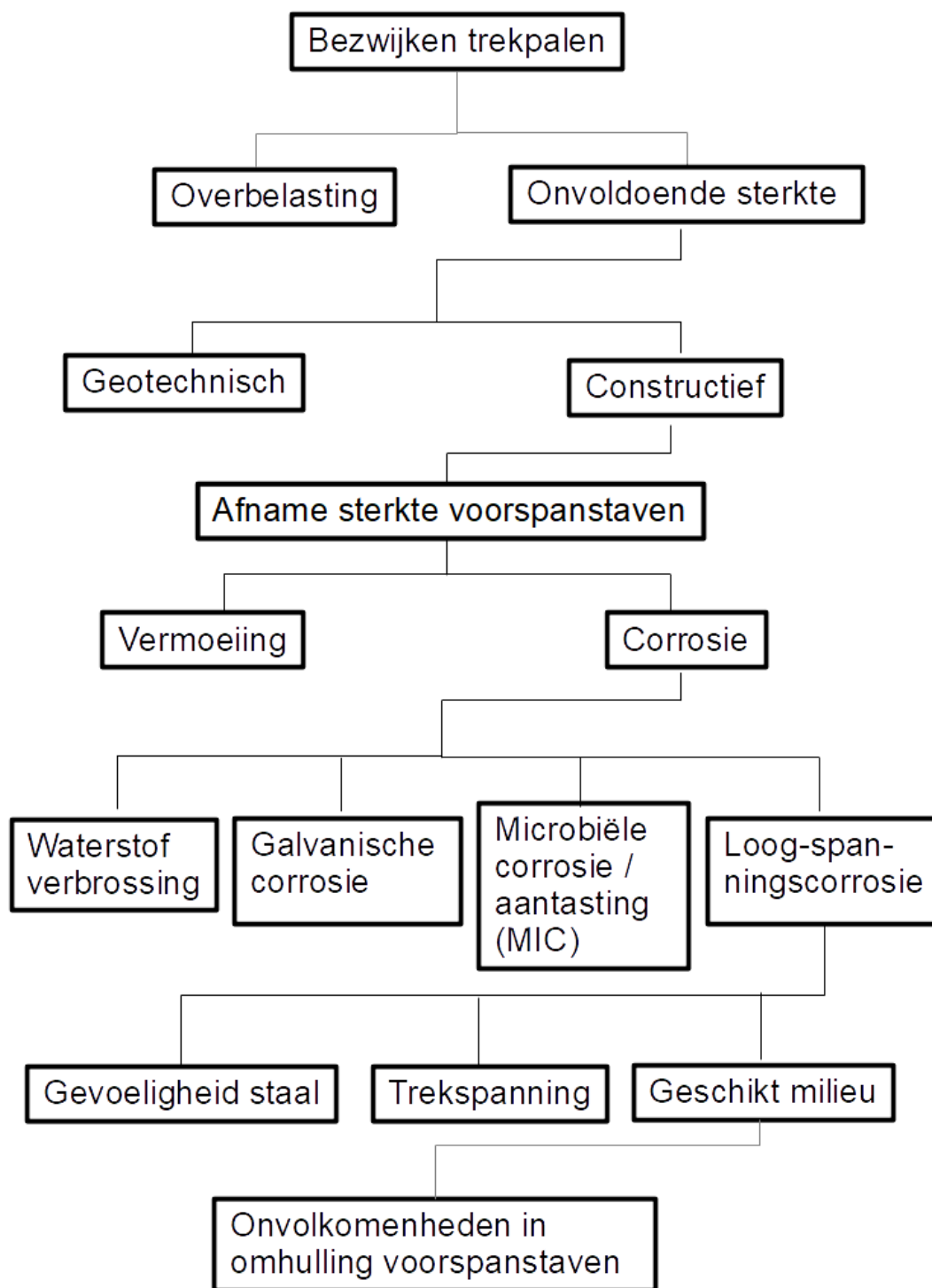
5.1 Algemeen

De calamiteit betreft het omhoog komen van moot 26 van toerit noord van de Prinses Margrietunnel. Deze moot was dusdanig ver omhoog gekomen dat deze als bezweken is beschouwd.

De beide toeritten van de tunnel zijn voor het grootste deel in het grondwater gesitueerd en ondervinden daardoor een opwaartse belasting door het grondwater. In de onbeschadigde situatie zorgt de paalfundering van de in het grondwater gepositioneerde moten dat deze niet door het water omhoog worden gedrukt. Dat moot 26 na circa 44 jaar omhoog is gekomen en is bezweken moet derhalve zijn ontstaan doordat de paalfundering niet meer in staat was om de opwaartse belasting door het water te weerstaan.

Dit hoofdstuk geeft op basis van de resultaten van de uitgevoerde onderzoeken een stapsgewijze analyse van de oorzaak van het bezwijken van moot 26. De volgende stappen zijn in deze analyse genomen, zie ook Figuur 5.1:

- **Tijdlijn van bezwijken:** Nagegaan is of moot 26 in één keer is bezweken of dat er voorafgaand al aanwijzingen waren voor het bezwijken. Het blijkt dat zowel bij moot 26 als bij moot 15 sprake is (geweest) van gefaseerd bezwijken.
- **Bezwijkmechanisme:** Nagegaan is welk mechanisme het begin van het bezwijken veroorzaakt. Dit blijkt het in de tijd afnemen van de constructieve capaciteit van palen, door een afname van de sterkte van de voorspanstaven.
- **Initiatiepunt van bezwijken:** Nagegaan is welke paal dan wel paalgroep als eerste is bezweken, teneinde onderscheid te kunnen maken in schade die initieel is ontstaan en schade die is ontstaan tijdens het bezwijken (gevolgschade). Hiervoor is moot 15 meer geschikt, omdat hier slechts beperkt sprake is van vervolgschade aan de fundering. Het is vooralsnog niet mogelijk gebleken om, binnen de moot, de plaats (de paal) waar het bezwijken begon vast te stellen. De gedachte is nu dat meerdere palen, onafhankelijk van elkaar, initieel bezweken zijn.
- **Oorzaak afname sterkte voorspanstaven:** Voor de paalgroep in moot 15 die mogelijk als eerste is bezweken is de oorzaak onderzocht voor de afname van de sterkte van de voorspanstaven. Daarbij is gebleken dat bij alle onderzochte voorspanstaven sprake is van loog-spanningscorrosie.
- **Oorzaak loog-spanningscorrosie:** Nagegaan is welke aspecten maatgevend zijn geweest voor het ontstaan van loog-spanningscorrosie. Dit kan alleen optreden als er onvolkomenheden in de omhulling van de voorspanstaven aanwezig zijn. De aard en oorzaak van deze onvolkomenheden is vooralsnog niet bekend.



Figuur 5.1 Overzicht aanpak scenario analyse.

5.2 Tijdlijn van bezwijken

Om te onderzoeken of moot 26 in één keer is bezweken is het gedrag van moot 26 in de tijd geanalyseerd. Dat is gedaan aan de hand van de deformatiemetingen die zijn uitgevoerd in 2010 (nulmeting), 2013, 2017 en 2021. In december 2022, kort na het bezwijken van moot 26, en in mei 2023 zijn vergelijkbare extra metingen uitgevoerd. Uit deze metingen blijkt het volgende (Figuur 5.2 en Figuur 5.3):

- Tot en met de meting in november 2017 was bij moot 26 geen afwijkend gedrag te zien ten opzichte van de overige moten.
- Tijdens de meting in juni 2021, circa anderhalf jaar voor het bezwijken, was bij moot 26 wel een afwijkend gedrag te zien ten opzichte van de overige moten: wand 01 (oostzijde) was aan de zijde van moot 25 circa 4-5 mm meer omhoog gekomen dan de overige moten.

Het afwijkende gedrag dat in juni 2021 is waargenomen kan duiden op het gefaseerd bezwijken van moot 26. Het Datalab van Rijkswaterstaat is nagegaan of de vervormingen van de tunnel in bestaande satellietwaarnemingen zichtbaar zijn [9]. De achteraf analyse van satellietwaarnemingen laat zien dat moot 26 vanaf november 2020 afwijkend gedrag heeft vertoond.

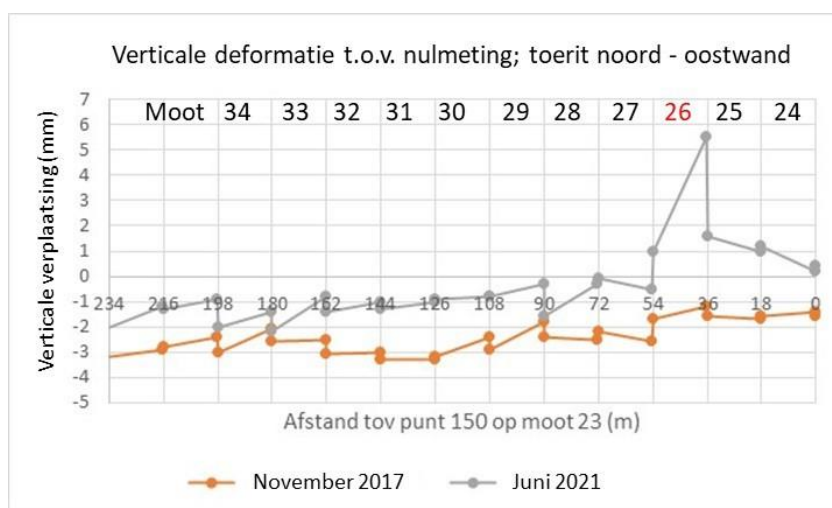
Op basis van een analyse van de deformatiemetingen van de toerit zuid blijkt dat in december 2022 bij moot 15 sprake was van een vergelijkbare situatie als bij moot 26 in 2021 (Figuur 5.4 en Figuur 5.5):

- Tot en met de meting in juni 2021 was bij moot 15 geen afwijkend gedrag te zien ten opzichte van de overige moten van de toerit zuid.
- Tijdens de meting in december 2022 was bij moot 15 wel een afwijkend gedrag te zien ten opzichte van de overige moten: wand 04 (westzijde) was aan de zijde van moot 14 circa 5 mm omhoog gekomen ten opzichte van de overige moten.

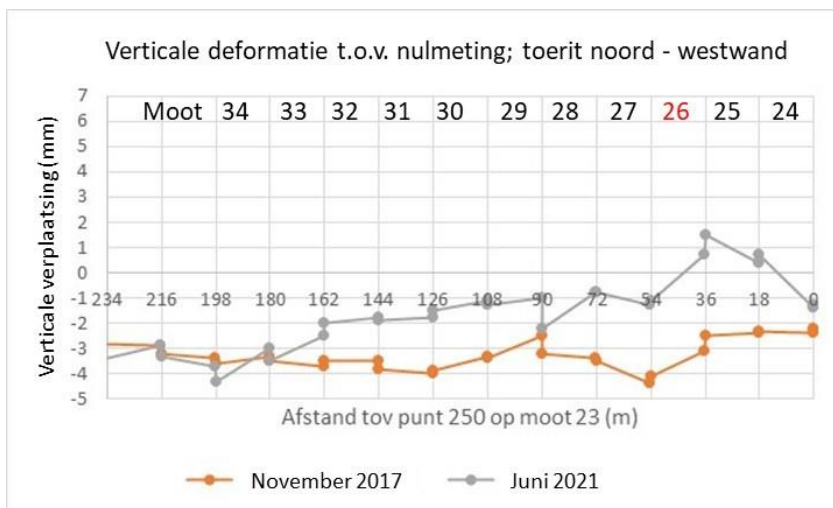
Het afwijkende gedrag dat in december 2022 is waargenomen kan ook voor moot 15 duiden op het gefaseerd bezwijken van moot 15.

Uit het bij moot 15 uitgevoerde veldonderzoek blijkt dat daar minimaal vijf palen zijn bezweken (Figuur 5.6). Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de in december 2022 gemeten verticale deformatie van deze moot daadwerkelijk duidt op het gefaseerd bezwijken van moot 15. Dit betekent enerzijds dat bij moot 26 zeer waarschijnlijk ook sprake is geweest van gefaseerd bezwijken en anderzijds dat moot 15 in de toekomst zeer waarschijnlijk ook bezweken zou zijn, als er geen maatregelen getroffen zouden zijn in de vorm van het aanbrengen van ballast.

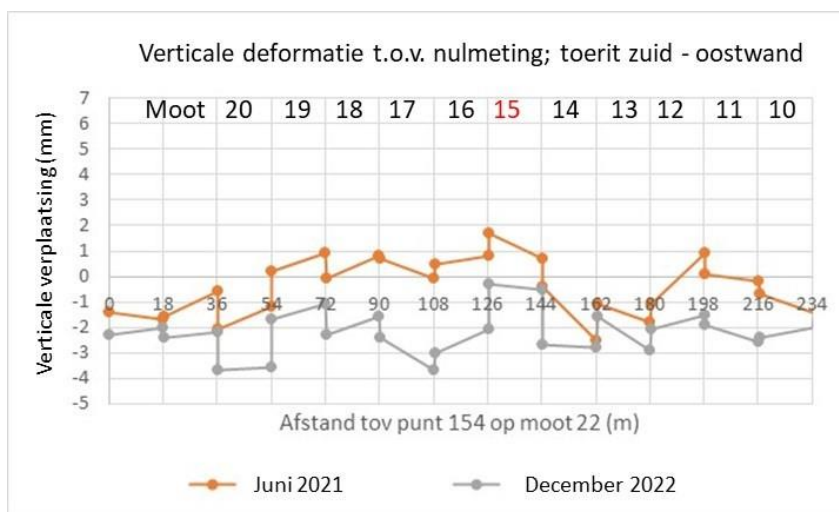
Hieruit wordt geconcludeerd dat het bezwijken van moot 26 gefaseerd heeft plaatsgevonden en dat moot 15 zich in een eerste fase van bezwijken bevond. Onderzoek van moot 15 biedt daarmee de mogelijkheid om het begin van bezwijken te onderzoeken, zonder dat de gevolgen van het volledig bezwijken van de moot extra schade heeft aangericht, zoals in moot 26 verwacht wordt. Daarom heeft de focus van het onderzoek op moot 15 gelegen.



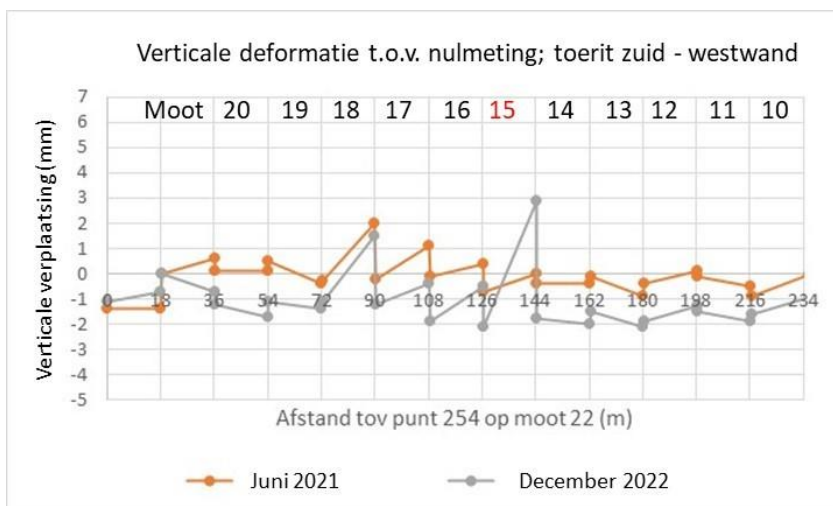
Figuur 5.2 Deformaties in verticale richting van toerit noord – wand aan oostzijde.



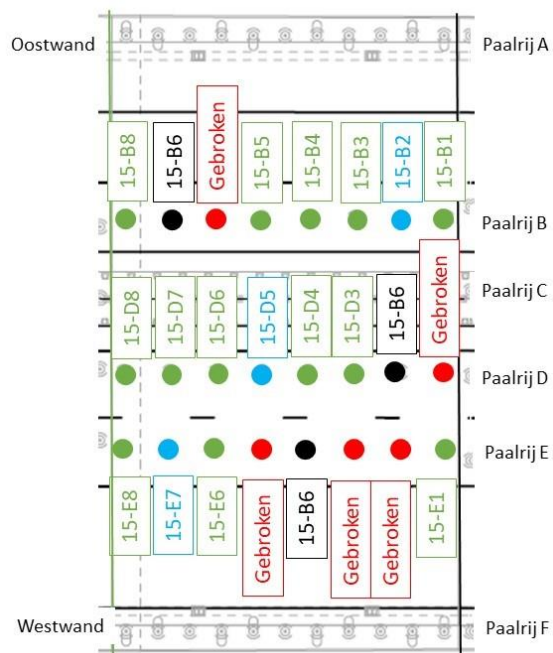
Figuur 5.3 Deformatiemetingen in verticale richting van toerit noord – wand aan westzijde.



Figuur 5.4 Deformatiemetingen in verticale richting van toerit zuid – wand aan oostzijde.



Figuur 5.5 Deformatiemetingen in verticale richting van toerit zuid – wand aan westzijde.



Figuur 5.6 Bovenaanzicht moot 15 met locaties gebroken palen (rode stippen) en niet-gebroken palen (blauwe en groene stippen); van de overige palen (zwarte stippen en de palen onder de wanden) is niet bekend of ze zijn gebroken. Noot: groene stip voorspanstaaf staat onder voorspanning, blauwe stip spanningsniveau kon niet worden getest.

5.3 Bezwijkmechanisme

Om na te gaan welk bezwijkmechanisme heeft geresulteerd in het bezwijken van de moten is het constructief gedrag van de paalfundering geanalyseerd in relatie tot de vervormingen die zijn opgetreden in het begin van bezwijken van de moten 15 en 26.

In het algemeen geldt dat het bezwijken van een moot ontstaan moet zijn doordat de paalfundering niet meer in staat was om de opwaartse belasting door het water te weerstaan. Dit moet zijn ontstaan door de volgende bezwijkmechanismen of een combinatie van beide:

1. De opwaartse waterbelasting is dusdanig ver toegenomen dat de paalfundering daardoor is overbelast en bezweken.
2. De sterkte van de paalfundering is in de loop van de tijd afgenomen, totdat de paalfundering niet meer in staat is om de optredende waterbelasting op te nemen.

Ad 1: Overbelasting paalfundering door het water

Ten aanzien van de waterbelasting geldt dat er geen aanwijzingen zijn dat er nabij de tunnel sprake is geweest van een dusdanige verhoging van de waterdruk tegen de tunnelvloer dat de paalfundering is overbelast [5] en daarmee het begin van het bezwijken van moot 15 en 26 heeft veroorzaakt.

Verder geldt dat een dergelijke toename van de waterbelasting bij alle moten tegelijk een rol speelt. Als de funderingen van alle moten volledig intact zijn, zullen bij een verhoging van de grondwaterstand de moten weinig roteren en redelijk gelijkmatig omhoogkomen. Het feit dat de moten 15 en 26 in de eerdere metingen aanzienlijk meer rotatie hadden dan de overige moten suggereert dat de fundering op dat moment al bezweken palen bevatte.

Het is waarschijnlijk dat moot 26 bij het omhoog komen in december 2022 is vastgelopen tussen de moten 25 en 27 en dat die moten in staat waren om de waterbelasting op moot 26 over te nemen. In een dergelijke situatie is het onwaarschijnlijk dat er sprake was van een overbelasting van de fundering van moot 26 door het water, omdat een dergelijke

overbelasting dan ook opgetreden zou zijn bij de moten 25 en 27 en die moten dan zeer waarschijnlijk niet in staat geweest zouden zijn om die belasting van moot 26 over te nemen. Aanvullend hieraan geldt dat de vervormingen die zijn opgetreden bij het begin van het bezwijken van moot 15 en 26 binnen de vervormingscapaciteit van de palen is gebleven. Dit betekent dat de palen niet zijn overbelast ten opzichte van de capaciteit van de palen in de oorspronkelijke, onbeschadigde toestand. Onderstaand wordt dit aspect nader uitgewerkt voor de twee aspecten die maatgevend zijn voor de paalfundering, het geotechnisch gedrag van de trekpalen en het constructief gedrag van de verbinding van de vloer met de trekpalen.

Ten aanzien van het geotechnische gedrag van de trekpalen geldt dat daarbij twee aspecten een rol spelen: het gedrag van een individuele paal en het gedrag van een groep palen. Voor het geotechnische gedrag van een individuele paal geldt het volgende:

- De capaciteit van een enkele paal wordt in hoofdzaak bepaald door de wrijving tussen de paal en de omringende grond.
- De maximale capaciteit van een paal wordt bereikt bij een verplaatsing van circa 10 mm [7].
- Bij een verticale verplaatsing van meer dan circa 10 mm is sprake van het geotechnische bezwijken van de paal. De capaciteit van de paal blijft dan nagenoeg constant, die neemt dan niet meer toe maar valt ook niet sterk weg binnen de hier opgetreden verplaatsingen.

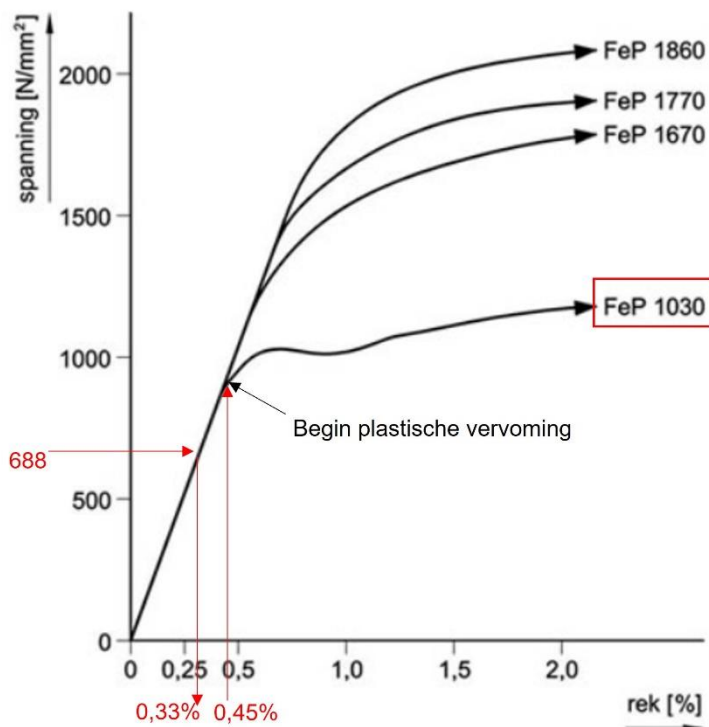
Voor het geotechnische gedrag van een groep palen geldt een vergelijkbare analyse, maar dan wordt niet een individuele paal uit de grond getrokken, maar een groep palen, inclusief het omsloten deel van de ondergrond.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de vervormingscapaciteit van een paal dan wel een paalgroep circa 10 mm bedraagt voordat deze geotechnisch bezwijkt. Bij een groep zal overigens de elastische verplaatsingscomponent groter zijn dan bij een enkele paal. Omdat het begin van het bezwijken bij de moten 15 en 26 is opgetreden bij een verticale verplaatsing die beduidend minder is dan 10 mm, namelijk circa 4-5 mm, is het zeer onwaarschijnlijk dat de palen, geotechnisch gezien, zijn overbelast.

Ten aanzien van het constructief gedrag van de verbinding van de vloer met de trekpalen geldt het volgende:

- Ten tijde van de bouw zijn de voorspanstaven $\varnothing 36$ mm in de trekpalen voorgespannen op 700 kN (circa 65 % van de karakteristieke treksterkte van de voorspanstaven, uitgaande van een karakteristieke treksterkte van 1050 MPa (FeP 1050)). Dit betreft een voorspanning van 688 MPa met een bijbehorende rek van 0,33%. Bij een staaf lengte van circa 10 m (moot 15 en 26) komt dit overeen met een verlenging van de voorspanstaaf van 33 mm.
- Indien de palen opwaarts worden belast, zal tot aan het bereiken van het voorspanniveau voornamelijk sprake zijn van een reductie van de drukspanning in het beton. Dat resulteert in een zeer geringe verlenging van de voorspanstaven.
- Bij voortgaande trekbelasting op de paal wordt het voorspanningsniveau van de trekstaaf bereikt en wordt het beton spanningsloos (aannemende dat de treksterkte van het beton nihil is). De belasting wordt dan volledig opgenomen door de voorspanstaaf.
- Bij een verder toenemende belasting ontstaat eerst een elastische verlenging van de voorspanstaven en vervolgens een plastische verlenging, alvorens de voorspanstaaf bezwijkt. Uit Figuur 5.7 volgt dat de elastische verlenging van het voorspanstaaf (kwaliteit FeP 1030 dat goed vergelijkbaar is met kwaliteit FeP 1050), vanaf de verlenging door de voorspanning (0,33%) tot aan het begin van de plastische vervorming (circa 0,45%) 0,12% bedraagt. Bij een staaf lengte van circa 10 m (moot 15 en 26) komt dit overeen met een verlenging van de voorspanstaaf van 12 mm. Dat betreft dus een verlenging die alleen is berekend op basis van een elastische verlenging van de voorspanstaaf, zonder rekening te houden met een plastische verlenging. In werkelijkheid is de vervormingscapaciteit dus beduidend groter.

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de vervormingscapaciteit van de verbinding van een trekpaal met de vloer beduidend groter is dan 12 mm, alvorens de verbinding constructief bezwijkt. Omdat het begin van het bezwijken bij de moten 15 en 26 is opgetreden bij een verticale verplaatsing die beduidend minder is dan 12 mm, namelijk circa 4-5 mm, is het zeer onwaarschijnlijk dat de palen, constructief gezien, zijn overbelast.



Figuur 5.7 Schematische weergave van het spanning-rek-diagram van voorspanstaal [10].

Samenvattend volgt uit het bovenstaande dat het zeer onwaarschijnlijk is dat het begin van het bezwijken van de moten 15 en 26 is veroorzaakt door een overbelasting van de paalfundering.

Ad 2: Afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd

Zoals bovenstaand aangegeven zijn er twee aspecten die maatgevend zijn voor het gedrag van de paalfundering, het geotechnisch gedrag van de trekpalen en het constructief gedrag van de verbinding van de vloer met de trekpalen. Een afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd betekent dus dat de geotechnische en/of de constructieve capaciteit in de tijd moet zijn afgenomen.

Ten aanzien van de geotechnische capaciteit van een trekpaal dan wel een groep trekpalen geldt in het algemeen dat die gedurende de levensduur van de paalfundering niet afneemt. Dat geldt echter niet als sprake is van een steeds wisselende belasting, maar dat is in de onderhavige situatie niet het geval.

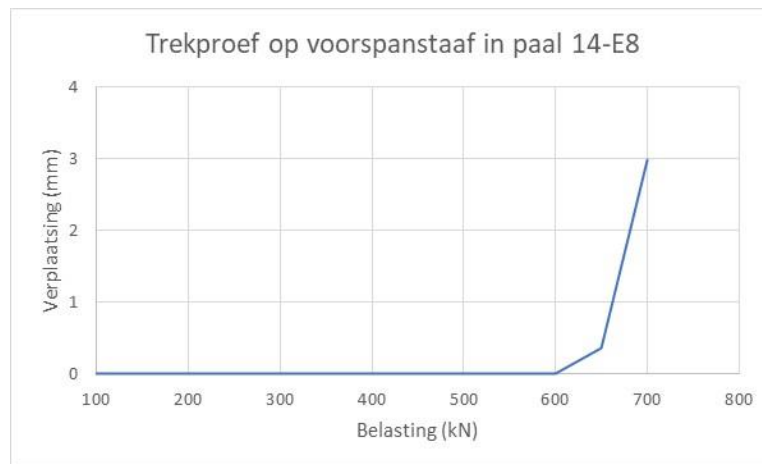
Ten aanzien van de constructieve capaciteit van de verbinding van de vloer met de trekpalen geldt dat die in hoofdzaak wordt bepaald door de voorspanstaven. De sterkte van een voorspanstaaf kan in de tijd afnemen door vermoeiing en door corrosie. Indien dat het geval is, zal een voorspanstaaf bezwijken bij een lagere vervorming dan de oorspronkelijke vervormingscapaciteit en daarmee ook bij de vervormingen die bij moot 15 en 26 zijn opgetreden tijdens het begin van het bezwijken.

Samenvattend volgt uit het bovenstaande dat het zeer waarschijnlijk is dat het begin van het bezwijken van de moten 15 en 26 is veroorzaakt door een afname van de sterkte van één of

meer voorspanstaven in de tijd en niet door een afname van de geotechnische sterkte van de paalfundering in de tijd.

Het voorgaande wordt onderschreven door het volgende:

- Bij moot 26, die volledig is bezweken, zijn zeven palen onderzocht. Deze palen zijn allemaal constructief bezweken door breuk van de voorspanstaven. Ze zijn niet geotechnisch bezweken, want bij geotechnisch bezwijken is de verwachting dat de voorspanstaaf nog intact is.
- Tijdens het onderzoek naar het spanningsniveau in de voorspanstaaf van paal 14-E8 is die voorspanstaaf bezweken bij een belasting van 700 kN en een vervorming van circa 3 mm (Figuur 5.8), die vrijwel volledig wordt bereikt in de laatste belastingstap van 50 kN. Uitgaande van een karakteristieke treksterkte van de voorspanstaaf van 1050 MPa, zou de bezwijksterkte van die voorspanstaaf 1069 kN moeten zijn. Indien de oorspronkelijke sterkte van deze voorspanstaaf voldeed aan de gestelde eisen, is de sterkte aanzienlijk afgenomen in de tijd.



Figuur 5.8 Trekproef op de voorspanstaaf in paal 14-E8 tot aan bezwijken (waarden gecorrigeerd voor vervorming trekstaaf).

5.4 Startpunt van het bezwijken

In de vorige paragraaf is geconcludeerd dat het zeer waarschijnlijk is dat het begin van het bezwijken van de moten 15 en 26 is veroorzaakt door een afname van de sterkte van één of meer voorspanstaven in de tijd en ten gevolge daarvan breuk. Zeer waarschijnlijk is zowel bij moot 15 als bij moot 26 eerst één voorspanstaaf gebroken, waardoor de capaciteit van die paal volledig is weggevallen. Daarna kunnen dan de volgende scenario's zijn opgetreden:

- De belasting op de naastgelegen palen is verhoogd en dusdanig groot geworden dat de naastgelegen palen zijn belast tot boven het voorspanniveau en de moot direct in enige mate omhoog is gekomen (het bovengenoemde begin van het bezwijken). Vervolgens heeft die verhoging van de belasting na verloop van tijd geresulteerd in het breken van meer voorspanstaven en het uiteindelijk bezwijken van de moot.
- De belasting op de naastgelegen palen is weliswaar verhoogd, maar de verhoging van de belasting op de naastgelegen palen is niet zo groot geworden dat die palen zijn belast tot boven het voorspanniveau en de moot dus ook niet omhoog is gekomen. Vervolgens heeft de verhoging van de belasting op de naastgelegen palen, na verloop van tijd, geresulteerd in het breken van meer voorspanstaven. Na het breken van meerdere voorspanstaven is de belasting op de overige palen dusdanig groot geworden dat die zijn belast tot boven het voorspanniveau en de moot in enige mate omhoog is gekomen (het bovengenoemde begin van het bezwijken). Tot slot heeft die verhoging van de belasting na verloop van tijd geresulteerd in het breken van nog meer voorspanstaven en het uiteindelijk bezwijken van de moot.

- Het mechanisme dat ervoor heeft gezorgd dat de eerste voorspanstaaf is gebroken, heeft ervoor gezorgd dat meerdere voorspanstaven zijn gebroken, onafhankelijk van het breken van de eerste voorspanstaaf. Vervolgens heeft het voorgaande scenario geresulteerd in het gefaseerd bezwijken van de moot.

Zoals eerder is aangegeven biedt het onderzoek van moot 15 de mogelijkheid om de bovenstaande scenario's nader te onderzoeken, omdat in deze moot, in tegenstelling tot moot 26, nog geen volledig bezwijken is opgetreden. Zoals weergegeven in Figuur 5.6 is in moot 15 bij minimaal vijf palen de voorspanstaaf bezweken. Op basis van de verdeling van deze palen over de moot, met name de relatief grote afstand tussen paal 15-B6 en de overige palen met een bezweken voorspanstaaf, wordt van de bovenbeschreven scenario's het derde scenario het meest waarschijnlijk geacht. Dat betekent dat initieel sprake is geweest van het onafhankelijk van elkaar breken van meerdere voorspanstaven. Dan verliest een paal zijn volledige draagkracht, wat resulteert in een verhoging van de belasting op de palen rondom de bezweken palen. Deze verhoging kan leiden tot het (sneller) bezwijken van meer palen en mogelijk het belasten tot boven het voorspanniveau. Het uiteindelijke gevolg is dat de moot steeds verder omhoog komt. Als gevolg van mogelijke asymmetrie in de fundering zal dit meestal leiden tot een rotatie, waarbij één zijde meer omhoog komt dan de andere zijde.

Vooralsnog is niet bekend of het gedeeltelijk omhoog komen van moot 15 verklaard kan worden door de vijf bezweken palen of dat er meer palen bezweken moeten zijn, bijvoorbeeld onder de wand. Om dat te verifiëren wordt geadviseerd om een constructieve analyse van de moot uit te voeren.

Samenvattend volgt uit het bovenstaande dat in moot 15 zeer waarschijnlijk meerdere palen, onafhankelijk van elkaar, initieel zijn bezweken en dat vanuit die initiaties meerdere palen zijn bezweken en/of uit de voorspanning zijn getrokken en de moot uiteindelijk gedeeltelijk omhoog is gekomen. Vooralsnog kan niet worden vastgesteld welke palen daadwerkelijk initieel zijn bezweken.

5.5 Oorzaak afname sterkte voorspanstaven

In paragraaf 5.3 is geconcludeerd dat het zeer waarschijnlijk is dat het begin van het bezwijken van moot 15 (en ook van moot 26) is veroorzaakt door een afname van de sterkte van één of meer voorspanstaven in de tijd. In paragraaf 5.4 is vervolgens geconcludeerd dat in moot 15 zeer waarschijnlijk meerdere palen, onafhankelijk van elkaar, initieel zijn bezweken en dat vanuit die initiaties meerdere palen zijn bezweken en/of uit de voorspanning zijn getrokken en de moot uiteindelijk gedeeltelijk omhoog is gekomen.

Teneinde na te gaan wat de oorzaak is van het breken van de voorspanstaven zijn de breukvlakken van drie voorspanstaven uit moot 15 metallurgisch onderzocht [6]. Daarnaast zijn ook de breukvlakken van vier andere voorspanstaven onderzocht, twee uit moot 26 en één uit de moten 14 en 18. Op basis van dat metallurgisch onderzoek is het volgende geconcludeerd [6]:

- Bij alle zeven onderzochte breukvlakken is sprake van hetzelfde bezwijkmechanisme. Dat geldt ook voor voorspanstaaf 14-E8, waar naar verwachting sprake was van een sterkteafname in de tijd (zie paragraaf 5.3).
- Loog-spanningscorrosie is zeer waarschijnlijk de oorzaak van het breken van de voorspanstaven. Dit wordt geconcludeerd op basis van de op de breukvlakken aangetroffen elementen, de interkristallijne scheurgroei in de breukvlakken en de secundaire, interkristallijne scheuren in de zone boven de breukvlakken.
- De overige mechanismen die in principe mogelijk konden zijn, zijn op basis van de kenmerken van de breukvlakken en de corrosieproducten gefalsificeerd. Dit betrof vermoeiing als gevolg van een wisselende belasting, galvanische corrosie, waterstofverbrossing en microbiële corrosie/aantasting (MIC). De falsificatie van MIC wordt onderschreven door het onderzoek dat is uitgevoerd door Microbial Analysis [8].

Omdat alle tot nu toe onderzochte breukvlakken hetzelfde bezwijkmechanisme te zien geven is het waarschijnlijk dat loog-spanningscorrosie bij alle gebroken voorspanstaven een rol heeft gespeeld, dus ook bij de voorspanstaven van de initieel bezweken palen, ongeacht of die deel uitmaakten van de onderzochte voorspanstaven. Om daar meer zekerheid over te verkrijgen wordt geadviseerd om nader te onderzoeken of bij de twee nog niet onderzochte gebroken voorspanstaven van moot 15 sprake is van hetzelfde bezwijkmechanisme.

5.6 Oorzaak loog-spanningscorrosie

Voor het breken van de voorspanstaven als gevolg van loog-spanningscorrosie zijn de volgende drie randvoorwaarden noodzakelijk:

- Het staal moet gevoelig zijn voor spanningscorrosie.
- Er moet sprake zijn van een substantiële trekspanning in de voorspanstaven.
- De voorspanstaven moeten zich in een milieu bevinden dat geschikt is voor het ontstaan van loog-spanningscorrosie.

In het algemeen geldt dat alle C-staalsoorten een zekere gevoeligheid hebben voor loog-spanningscorrosie en daarmee dus ook het staal waarmee de voorspanstaven zijn geproduceerd.

De permanente trekspanning in de voorspanstaven als gevolg van het voorspannen én als gevolg van de waterbelasting is vrijwel zeker voldoende voor het breken van de voorspanstaven als gevolg van loog-spanningscorrosie.

Ten aanzien van het milieu waarin de voorspanstaven zich bevinden is in deelrapport "Onderzoek voorspanstaven Prinses Margrietunnel" [6] geconcludeerd dat er zeer waarschijnlijk sprake is geweest van onvolkomenheden in de omhulling van de voorspanstaven, waarna cement- en/of poriewater door de omhulling is gepenetreerd en is doorgedrongen tot aan de voorspanstaven. Dit is geconcludeerd op basis van de aanwezigheid van sporen van Na, Ca, K en Mg op de beukvlakken. Dat zijn geen elementen van het staal, maar zeer waarschijnlijk elementen afkomstig uit cement- en/of poriewater.

Ten aanzien van de onvolkomenheden in de omhulling is in het bovengenoemde deelrapport geconcludeerd dat die veroorzaakt kunnen zijn:

- Door onvolkomenheden tijdens het aanbrengen van de omhulling in de bouwfase.
- Door het kantelen van de afstandhouders tijdens het in de buis plaatsen van de voorspanstaaf.
- Door impact van het beton tijdens het storten.
- Doordat een afstandhouder de omhulling bij het voorspannen heeft tegengehouden.
- Door veroudering/aantasting van de omhulling.

Het ontstaan van onvolkomenheden als gevolg van het eventueel scheuren van het beton van de palen is eveneens onderzocht maar is niet waarschijnlijk geacht. Met name omdat scheurvorming in de voorgespannen palen als gevolg van een horizontale belasting door de vloer van de moten alleen bovenin de palen mogelijk is, terwijl de meeste voorspanstaven op grotere diepten zijn gebroken.

Het uitgevoerde onderzoek heeft nog geen uitsluitsel gegeven over de meest waarschijnlijke oorzaak voor het ontstaan van onvolkomenheden in de omhulling. Geadviseerd wordt om dat nader te onderzoeken.

6 Conclusies

Op dinsdag 13 december 2022 is het tunneldeel "moot 26" van de noordelijke toerit van de Prinses Margriettunnel in de snelweg A7 nabij Sneek omhoog gekomen en is er schade aan het wegdek ontstaan. Hierdoor werd de tunnel onbruikbaar voor het wegverkeer en moest Rijkswaterstaat de tunnel tijdelijk sluiten.

Rijkswaterstaat heeft Deltares en TNO gevraagd onderzoek te doen om de oorzaak van het omhoog komen van moot 26 vast te stellen.

Het onderzoek is gestart met het verzamelen van de beschikbare informatie over het ontwerp, de bouw van de tunnel en kennis die onder andere opgebouwd is bij het onderzoek naar een vergelijkbaar incident in de Vlaketunnel in 2010. Dit heeft geleid tot een faalboom waarin alle mogelijke oorzaken systematisch geordend zijn.

Op basis van deze faalboom zijn steeds mogelijke scenario's beoordeeld. Bij deze beoordeling heeft de nadruk gelegen op het verzamelen van informatie in de tunnel en onderzoek aan de fundering van de tunnel om de verschillende scenario's te beoordelen en onderbouwd te accepteren of af te wijzen. Door de systematiek van de faalboom te volgen is elke volgende stap in het onderzoek gebaseerd op de resultaten van de voorgaande stappen.

De belangrijkste bevindingen van dit onderzoek zijn:

1. Moot 26 van de toerit noord is gefaseerd bezwaken. Circa anderhalf jaar voorafgaand aan het volledig bezwijken was de oostwand al circa 4-5 mm omhoog gekomen ten opzichte van de overige moten. Naar nu is gebleken was er toen al sprake van een begin van bezwijken. Bij moot 15 van de toerit zuid is in december 2022 een vergelijkbare verplaatsing van de westwand gemeten, hetgeen eveneens een begin van bezwijken is gebleken.
2. De moten zijn omhoog gekomen doordat de paalfundering niet meer in staat was om de opwaartse belasting door het water te weerstaan. Zeer waarschijnlijk is er sprake van een afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd en niet van een overbelasting door bijvoorbeeld een substantiële waterstandsverhoging.
3. De afname van de sterkte van de paalfundering in de tijd is zeer waarschijnlijk veroorzaakt door het breken van voorspanstaven in de trekpalen en niet door een afname van de geotechnische sterkte van de paalfundering. Bij alle zeven onderzochte palen van moot 26, bij vijf van de eenentwintig onderzochte palen van moot 15 en bij twee individuele palen van de moten 18 en 21 is de voorspanstaaf gebroken aangetroffen.
4. Alle onderzochte breukvlakken van de gebroken voorspanstaven vertonen hetzelfde bezwijkmechanisme. Deze voorspanstaven zijn zeer waarschijnlijk gebroken als gevolg van loog-spanningscorrosie. Loog-spanningscorrosie heeft kunnen optreden doordat er sprake is van onvolkomenheden in de omhulling om de voorspanstaven, waardoor cement- dan wel poriewater (loog) vanuit het beton is doorgedrongen tot aan de voorspanstaven.
5. Ten aanzien van de oorzaak van de onvolkomenheden in de omhulling op de voorspanstaven heeft het onderzoek vooralsnog geen uitsluitel gegeven.

7 Aanbevelingen

7.1 Vervolgonderzoek

Om de conclusies van het uitgevoerde onderzoek verder te verifiëren en om meer inzicht te krijgen in het mechanisme dat heeft geresulteerd in het bezwijken van de voorspanstaven wordt geadviseerd om het volgende vervolgonderzoek uit te voeren:

1. Ten aanzien van moot 15 kan nog met onvoldoende zekerheid gesteld worden welke paal of palen initieel is dan wel zijn bezweken. Alle onderzochte breukvlakken vertonen tot nu toe hetzelfde bezwijkmechanisme. Om meer zekerheid te verkrijgen over het optreden van dit bezwijkmechanisme bij de initieel bezweken palen, wordt geadviseerd om nader te onderzoeken of bij de twee nog niet onderzochte gebroken voorspanstaven van moot 15 (paal 15-B6 en paal 15-D1) sprake is van hetzelfde bezwijkmechanisme.
2. Vooralsnog is niet bekend of het gedeeltelijk omhoog komen van moot 15 verklaard kan worden door de vijf reeds bezweken palen of dat er meer palen bezweken moeten zijn, bijvoorbeeld onder de wand. Om dat te verifiëren wordt geadviseerd om een constructieve analyse van moot 15 uit te voeren met een eindige elementen programma. Daarmee kan dan tevens inzicht worden verkregen in de mate waarin gefaseerd bezwijken van een moot plaatsvindt en dus in de mate waarin er sprake is van een waarschuwend vermogen voorafgaand aan het volledig bezwijken van een moot.
3. Het uitgevoerde onderzoek heeft nog geen uitsluitsel gegeven ten aanzien van de oorzaak van de onvolkomenheden in de omhulling op de voorspanstaven. Geadviseerd wordt om het volgende onderzoek uit te voeren naar de oorzaak van die onvolkomenheden:
 - a. Nader onderzoek naar de eventuele aanwezigheid van secundaire scheuren in de voorspanstaven op verschillende afstanden van de breukvlakken. Daarmee wordt in ieder geval meer inzicht verkregen in de eventuele invloed van de afstandhouders.
 - b. Materiaalkundig onderzoek aan monsters van het vet, teneinde vast te stellen of het vet is gedegraded dan wel aangetast.
4. In de onderhavige trekpalen is zeer waarschijnlijk loog-spanningscorrosie van de voorspanstaven ontstaan, onder andere omdat het toegepaste voorspanstaal gevoelig is voor spanningscorrosie. Om te kunnen controleren of bij andere constructies gebruik is gemaakt van hetzelfde type voorspanstaal wordt geadviseerd om het voorspanstaal materiaalkundig te karakteriseren aan de hand van:
 - a. Hardheidsmetingen (Vickers hardheid HV10)).
 - b. Chemische analyses van het staal (OES).
 - c. Bepalen van de treksterkte van monsters rond 10 mm uit de voorspanstaven.
5. Loog-spanningscorrosie is niet bekend bij andere voorgespannen betonconstructies waar het voorspanstaal ook in direct contact staat met cement- dan wel poriewater van het beton. Geadviseerd wordt om nader te onderzoeken wat de oorzaak van dit verschil is. Indien dat bekend is, kan vervolgens worden onderzocht of bij meer typen voorgespannen constructies dit mechanisme zou kunnen optreden.

7.2 Overige kunstwerken met hetzelfde type trekpalen

Uit een inventarisatie van Rijkswaterstaat is gebleken dat er meer kunstwerken in Nederland zijn die een vergelijkbare fundering hebben, met hetzelfde type trekpalen, waar mogelijk ook bezwijken zou kunnen optreden als gevolg van loog-spanningscorrosie. In mei 2023 heeft het onderzoeksteam hierover al overleg gehad met Rijkswaterstaat en een concept advies gegeven ten aanzien van de mogelijkheden om dit faalmechanisme bij de andere

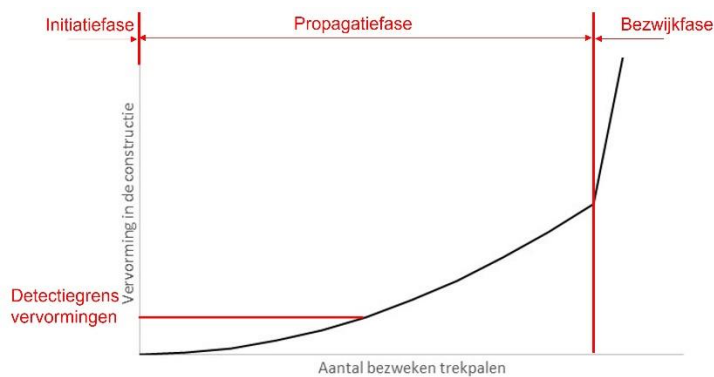
kunstwerken met hetzelfde paalsysteem te detecteren. Hieronder volgt een verdere uitwerking van dat advies.

Het faalmechanisme dat optreedt kent volgorde van de volgende fasen (zie Figuur 7.1):

- **Initiatiefase:** Bij meerdere trekpalen ontstaan initiatiepunten met loog-spanningscorrosie, op locaties waar contact is tussen de voorspanstaaf en cement- dan wel poriewater uit het beton. De voorspanstaven zijn dan nog niet gebroken, waardoor de trekpalen hun functie nog kunnen vervullen.
- **Propagatiefase:** De loog-spanningscorrosie resulteert in het bezwijken van voorspanstaven, waardoor de betreffende trekpalen hun functie niet meer kunnen vervullen. Het aantal trekpalen dat bijdraagt aan de draagkracht van de fundering neemt hierdoor af, waardoor de constructie, of een deel ervan, omhoog komt. Bij het bezwijken van de eerste trekpalen zal de mate waarin de constructie, of een deel ervan, omhoog komt waarschijnlijk nog niet detecteerbaar zijn. Naarmate er meer trekpalen bezwijken zal het omhoog komen wel detecteerbaar zijn.

Bij twee moten van de Prinses Margrietunnel (moot 26 en 15) is sprake geweest van het tweede deel van de propagatiefase, met detecteerbare vervormingen. Voor de Vlaketunnel geldt dat daar, voorafgaand aan het bezwijken, geen periodieke hoogtemetingen waren uitgevoerd, waardoor niet bekend is of daar ook sprake is geweest van het tweede deel van de propagatiefase.

- **Bezwijkfase:** Progressief bezwijken van nog meer voorspanstaven en “volledig” omhoog komen van de constructie of een deel ervan, waardoor het verkeer belemmerd wordt en de constructie lek kan raken.



Figuur 7.1 Schematisch verloop van het faalmechanisme van een tunnelmoot, in relatie tot het aantal bezweken trekpalen.

Per fase wordt vervolgens nagegaan welke mogelijkheden er voor risicobeheersing bestaan.

Initiatiefase

Er zijn vooralsnog geen onderzoekstechnieken beschikbaar waarmee in het werk kan worden vastgesteld of de constructie zich in de initiatiefase bevindt, waarbij sprake is van initiatiepunten met loog-spanningscorrosie in de voorspanstaven. Daarom wordt geadviseerd om in eerste instantie na te gaan of bij de andere kunstwerken, met hetzelfde type trekpalen, sprake is van de randvoorwaarden die nodig zijn voor het optreden van loog-spanningscorrosie. Dat betreft de volgende randvoorwaarden:

- Gevoeligheid van het staal voor spanningscorrosie. In het algemeen geldt dat alle C-staalsoorten een zekere gevoeligheid hebben voor loog-spanningscorrosie, waardoor deze randvoorwaarde dus bij alle vergelijkbare trekpalen, aanwezig is.
- Substantiële trekspanning in de voorspanstaven. Deze randvoorwaarde is in alle vergelijkbare, voorgespannen trekpalen aanwezig.
- Onvolkomenheden in de omhulling van de voorspanstaven, waardoor cement- en/of poriewater kan doordringen tot de voorspanstaven. Indien het vervolgonderzoek naar de

oorzaak van de onvolkomenheden in de omhulling van de voorspanstaven, zoals omschreven bij punt 3 van de vorige paragraaf, uitsluitel geeft over die oorzaak, kan gecontroleerd worden of bij de andere kunstwerken, met hetzelfde type trekpalen, diezelfde oorzaak kan optreden.

Als blijkt dat er funderingen zijn die voldoen aan deze randvoorwaarden, wordt geadviseerd onderzoek uit te voeren naar technieken die in deze fase kunnen worden toegepast of hierin ondersteuning kunnen geven.

Propagatiefase – tot aan detecteerbare vervormingen

Voor het vaststellen van het eerste deel van de propagatiefase, met één of meerdere trekpalen bezweken, zonder detecteerbare vervormingen, zijn er vooralsnog geen niet-destructieve onderzoekstechnieken beschikbaar. Dit is wel mogelijk door de koppen van de voorspanstaven in de trekpalen vrij te hakken en door vervolgens aan de voorspanstaven te trekken, teneinde te controleren of deze gebroken zijn. Naast het destructieve karakter van deze onderzoekstechniek is het nadeel dat het aantal bezweken trekpalen in deze fase gering is, waardoor het aantal te onderzoeken trekpalen relatief groot moet zijn om betrouwbaar vast te kunnen stellen of er sprake is van bezweken trekpalen.

Detectie van dit deel van de propagatiefase is van groot belang, omdat in deze fase mogelijk nog voldoende tijd is om funderingsherstel uit te voeren. Geadviseerd wordt:

- Om na te gaan of er technieken bestaan die in deze fase bruikbaar zijn.
- Om de grens van detecteerbare vervormingen te verlagen door middel van specifieke monitoringstechnieken of geavanceerde interpretatietechnieken van bestaande gegevens.

Propagatiefase – vanaf detecteerbare vervormingen

Voor het vaststellen van het tweede deel van de propagatiefase, met meerdere trekpalen bezweken en met detecteerbare vervormingen, kunnen periodieke dan wel continue deformatiemetingen uitgevoerd worden. Bij deze monitoring dient rekening gehouden te worden met het volgende:

- Het tweede deel van de propagatiefase begint als er een dusdanig aantal trekpalen is bezweken dat er sprake is van een detecteerbare vervorming in de constructie. Op basis van een constructieve analyse, zoals omschreven bij punt 2 van de vorige paragraaf, kan gecontroleerd worden of de bij moot 15 gemeten vervormingen gereproduceerd kunnen worden. Als dat mogelijk is, kan bij andere kunstwerken, met een vergelijkbare constructieve analyse, eveneens berekend worden hoeveel trekpalen bezweken moeten zijn voor het kunnen meten van een detecteerbare vervorming.
- Met de hiervoor genoemde constructieve analyse kan per kunstwerk worden nagegaan wat de meest waarschijnlijke bezwijkvormen zullen zijn. Dat is noodzakelijk voor het bepalen van de locaties voor de deformatiemetingen.
- Met de constructieve analyse kan per kunstwerk berekend worden hoeveel additionele trekpalen moeten bezwijken, alvorens de constructie vanaf de detecteerbare vervorming tot in de bezwijkfase komt. Dit aantal additioneel bezweken palen is mede bepalend voor de reactietijd die beschikbaar is tussen het detecteren van vervormingen en het bezwijken van de constructie.

Referenties

- [1] Deltares, rapport “plan van aanpak veldonderzoek”. kenmerk : 11209150-004-GEO-0001, datum : 23 februari 2023.
- [2] Deltares, memo Historische data, kenmerk 11209150-002-GEO-0003, datum 22 mei 2023.
- [3] Deltares, rapport “Veldonderzoek Prinses Margriettunnel, Verslag veldwerkzaamheden oorzaak falen fundering, Stand van zaken juni 2023”, kenmerk 11209150-004-GEO-0011, datum juli 2023.
- [4] Deltares, rapport “Veldonderzoek Prinses Margriettunnel, Verslag veldwerkzaamheden oorzaak falen fundering, Werkzaamheden juni 2023 – september 2023”, kenmerk 11209150-004-GEO-0025, oktober 2023.
- [5] Deltares, rapport: Stijghoogten en grondwaterstanden voor beoordeling bestaande constructie en ontwerp vervangende fundering toerit Prinses Margriettunnel - versie 4, kenmerk 11209150-006-GEO-0001, datum 23 februari 2023.
- [6] TNO, Onderzoek voorspanstaven Prinses Margriettunnel – concept, kenmerk 060.56658/01.01, datum 15-06-2023.
- [7] NEN, NEN 9997-1+C2:2017, Geotechnisch ontwerp van constructies, Deel 1: Algemene regels.
- [8] Microbial Analysis, rapport “MIC onderzoek Prinses Margriettunnel”, kenmerk 20238491/3122, datum 1 augustus 2023.
- [9] Rijkswaterstaat, Datalab, rapport “Adviesrapport Monitoring van de Prinses Margriettunnel met InSAR”, datum 12-05-2023, versie 31-08-2023.
- [10] Stubeco, Handboek Uitvoering Betonwerken, www.stubeco.nl/handboek/, geraadpleegd juli 2023.

Bijlagen

A Beschrijving rapporten uit dit onderzoek

Binnen dit project zijn verschillende activiteiten uitgevoerd. Deze bijlage beschrijft de rapporten kort. Tevens wordt per rapport de titel, het kenmerk en de datum van de thans beschikbare laatste versie.

Nummer	Onderwerp	Auteur
	Tussenrapportage	Deltares /TNO
1	Samenvatting historische data	Deltares
2	Plan van aanpak	Deltares
3	Verslag veldonderzoek	Deltares /TNO
4	Impedantie-onderzoek	C-cube International
5	Grondonderzoek	RWS GPO
6	Grondwateronderzoek	RWS GPO
7	Verslag onderzoek breukvlakken	TNO
8	MIC onderzoek	Microbial Analyses
9	Insar	RWS CIV

Voorliggend rapport is het onderdeel Tussenrapportage.

A.1 Tussenrapportage

Titel rapport: Tussenrapportage Onderzoek Prinses Margrietunnel.

Hoofdrapport.

Organisatie: Deltares en TNO.

Kenmerk rapport: 1209150-004-GEO-0014.

Datum rapport: juni 2023.

A.2 Samenvatting historische data

De historische data zijn alle gegevens die voor het moment van falen zijn bepaald (die dus zonder de kennis dat er falen is opgetreden). Het betreft vooral gegevens betreffende het ontwerp en de bouw en gegevens die tijdens of in verband met het onderhoud zijn verworven. Ook wat gegevens uit de omgeving spelen een rol. Deze gegevens waren in meerderheid al beschikbaar in het begin van het faalonderzoek, maar er zijn tijdens het onderzoek nog een aantal onderdelen toegevoegd.

Titel rapport: Memo "Historische data".

Organisatie: Deltares.

Kenmerk rapport: 11209150-002-GEO-0003.

Datum rapport: 22 mei 2023.

A.3 Plan van aanpak

Het plan van aanpak beschrijft de activiteiten die voorzien zijn in het veldonderzoek. Dit plan is gebaseerd op de op dat moment beschikbare informatie over de Prinses Margrietunnel, de ervaringen bij de Vlaketunnel en de eerste analyses. Het heeft als uitgangspunt gediend voor de start van de veldwerkzaamheden. Er is besloten om de versie die in februari 2023 is geleverd, niet aan te passen aan lopende ontwikkelingen.

Titel rapport: Plan van aanpak Prinses Margriettunnel; I.v.m. falen fundering.
Organisatie: Deltares.
Kenmerk rapport: 11209150-004-GEO-0001.
Datum rapport: 23 februari 2023.

A.4 Verslag veldonderzoek

Het verslag van het veldonderzoek geeft aan welke delen van het plan van aanpak wel en niet zijn uitgevoerd. Het wel of niet uitvoeren van verschillende werkzaamheden hangt samen met de uitvoerbaarheid (in samenhang met de aanwezige waterdruk tegen de tunnelvloer), en is lopende het onderzoek ook aangepast aan de eerste bevindingen in het onderzoek. Ook wordt aangegeven welke activiteiten zijn uitgesteld. Dit gebeurt meestal op basis van beschikbare ruimte en toegang tot de tunnel. Door de aanwezigheid van de ballast en de twee rijstroken is de ruimte voor onderzoek beperkt. Er wordt uitgebreid ingegaan op de resultaten van het onderzoek aan de voorspanstaven in de geopende conussen.

Titel rapport: Veldonderzoek Prinses Margriettunnel, Verslag veldwerkzaamheden oorzaak falen fundering. Stand van zaken juni 2023.
Organisatie: Deltares.
Kenmerk rapport: 11209150-004-GEO-0011.
Datum rapport: juli 2023.

Titel rapport: Veldonderzoek Prinses Margriettunnel, Verslag veldwerkzaamheden oorzaak falen fundering Werkzaamheden juni 2023 – september 2023.
Organisatie: Deltares.
Kenmerk rapport: 11209150-004-GEO-0025.
Datum rapport oktober 2023.

A.5 Impedantie-onderzoek

Nadat de conussen zijn geopend, zijn de voorspanstaven onderzocht op elektrische impedantie ten opzichte van een nul-pool in de grond in de nabijheid van de betreffende moot. Dit is uitgevoerd door C-cube International. De impedantie wordt gemeten in het frequentie-interval van 0.1 Hz tot 01. MHz. Doel van deze metingen is na te gaan of er een doorgaande verbinding tussen het grondwater en de voorspanstaven is. Een doorgaande verbinding geeft aan dat de voorspanstaaf in contact staat met water, wat vrijwel zeker tot corrosie van de voorspanstaaf leidt. Dit kan voor om bestaande constructies mogelijk een techniek zijn om deze te beoordelen of zelfs permanent te monitoren op de kwaliteit van de corrosiebescherming

Titel rapport: Onderzoek ankers Prinses Margriettunnel Expertise.
Organisatie: C-Cube international B.V.
Kenmerk rapport: R23-04111-3.
Datum rapport: 31 augustus 2023.

A.6 Grondonderzoek

Het grondonderzoek is in de omgeving uitgevoerd om inzicht te krijgen in de opbouw van de ondergrond en de parameters van de grond. In relatie tot mogelijk geotechnische bezwijken is dit noodzakelijke informatie. Deze informatie is veelal voor het ontwerp van de herstel maatregelen verzameld, waarbij beperkte uitbreidingen voor het veldonderzoek zijn geweest. Het eerste rapport beschrijft de locaties van het veld onderzoek en de uitgevoerde onderzoeken. Het tweede rapport beschrijft het uitgevoerde laboratoriumonderzoek. Dit is uitgevoerd door Wiertsema

Titel rapport: Geotechnisch onderzoek Prinses Margrietunnel te Sneek.
Organisatie: Wiertsema & Partners B.V.
Kenmerk rapport: 83268-1 R88702.
Datum rapport: 21 maart 2023.

Titel rapport: laboratoriumonderzoek Prinses Margrietunnel te Sneek.
Organisatie: Geolab Wiertsema.
Kenmerk rapport: 83268-5 R89862.
Datum rapport: 1 juni 2023.

Titel rapport: K-waardebepaling Prinses Margrietunnel te Sneek.
Organisatie: Wiertsema & Partners B.V..
Kenmerk rapport: 83268-2 R89130.
Datum rapport: 17 april 2023.

A.7 Grondwateronderzoek

De grondwaterstanden zijn na het falen van moot 26 gemonitord. Dit is een noodzakelijke voorwaarde voor het uitvoeren van een bemaling voor het herstel en ook om na te gaan of de waterdrukken tegen de tunnel de oorzaak van het falen kunnen zijn geweest. De onderzoeken in het veld zijn uitgevoerd door Wiertsema, de modelmatige analyses zijn uitgevoerd door Deltares.

titel rapport: Stijghoogten en grondwaterstanden voor beoordeling bestaande constructie en ontwerp vervangende fundering toerit Prinses Margrietunnel - versie 4.
organisatie: Deltares.
kenmerk rapport: 11209150-006-GEO-0001.
datum rapport: 23 februari 2023.

titel rapport: Bemalingsadvies herstel Prinses Margrietunnel.
organisatie: Deltares.
kenmerk rapport: 11209150-005-GEO-0004.
datum rapport: 4 april 2023.

De chemische samenstelling van het grondwater is beschreven in :

titel rapport: Briefrapport watermonstername Prinses Margrietunnel te Sneek.
organisatie: Wiertsema & Partners B.V..
kenmerk rapport: 83268-3 R88439.
datum rapport: 8 maart 2023.

titel rapport: Analyserapport: Aanpak prinses margrietunnel nabij Uitwellingerga.
organisatie: **SGS Environmental Analytics**.
kenmerk rapport: 13820239, versienummer: 1.
datum rapport: 23 februari 2023.

titel rapport: Analyserapport: Aanpak prinses margrietunnel nabij Uitwellingerga.
organisatie: **SGS Environmental Analytics**.
kenmerk rapport: 13827255,, versienummer: 1.
datum rapport: 6 maart 2023.

A.8 Verslag onderzoek breukvlakken

De gebroken staven zijn uit de constructie verwijderd. De breukvlakken van de gebroken staven zijn gefotografeerd en geconserveerd. Het onderste deel van de staaf is afgesneden. Deze zijn direct naar het TNO-laboratorium in Petten gebracht en daar uitgebreid onderzocht. Het deel van de staven boven de breuk is in handzame stukken gesneden. Deze zijn vooralsnog in te tunnel droog opgeslagen. Dit rapport beschrijft de bevindingen van het laboratoriumonderzoek door TNO.

titel rapport: Onderzoek voorspanstaven Prinses Margrietunnel – concept.

organisatie: TNO.

kenmerk rapport: 060.56658/01.01.

datum rapport: 15 juni 2023.

A.9 MIC onderzoek

Er wordt onderzoek gedaan naar de vraag of er microbiologisch beïnvloede corrosie (MIC) een rol kan hebben gespeeld. Er zijn momenteel twee notities aanwezig. In juni 2023 zijn op twee staven monsters voor dit onderzoek genomen. Deze worden in juli en augustus 2023 verder geanalyseerd. Voor het faalonderzoek is het van belang voldoende inzicht te hebben in de vraag in hoeverre MIC een rol kan hebben gespeeld in het falen van de tunnel. Dit is uitgevoerd door Microbial Analysis.

titel rapport: MIC onderzoek Prinses Margrietunnel, Onderzoeksrapport.

organisatie: Microbial Analysis.

kenmerk rapport: 20238491/3122.

datum rapport: 1 augustus 2023.

titel rapport: MIC dreigingsonderzoek bodem prinses Margrietunnel, Onderzoeksrapport.

organisatie: Microbial Analysis.

kenmerk rapport: 20238491/3136.

datum rapport: 1 september 2023.

titel rapport: Onderzoek contact trekstang en grondwater Prinses Margrietunnel, Onderzoeksrapport.

organisatie: Microbial Analysis.

kenmerk rapport: 20238491/3141.

datum rapport: 11 september 2023.

A.10 Insar

De dienst CIV van Rijkswaterstaat heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om de deformaties van de tunnel in het verleden te reconstrueren met satelliet metingen. Dit onderzoek kan voor het faalonderzoek in de Prinses Margrietunnel mogelijk nauwkeurigere informatie geven over het verloop van de beweging tijdens de fase voor het bezwijken van de moten. Op basis van deze kennis kan dit type metingen mogelijk worden gebruikt voor het monitoren van constructies die vergelijkbaar risico lopen.

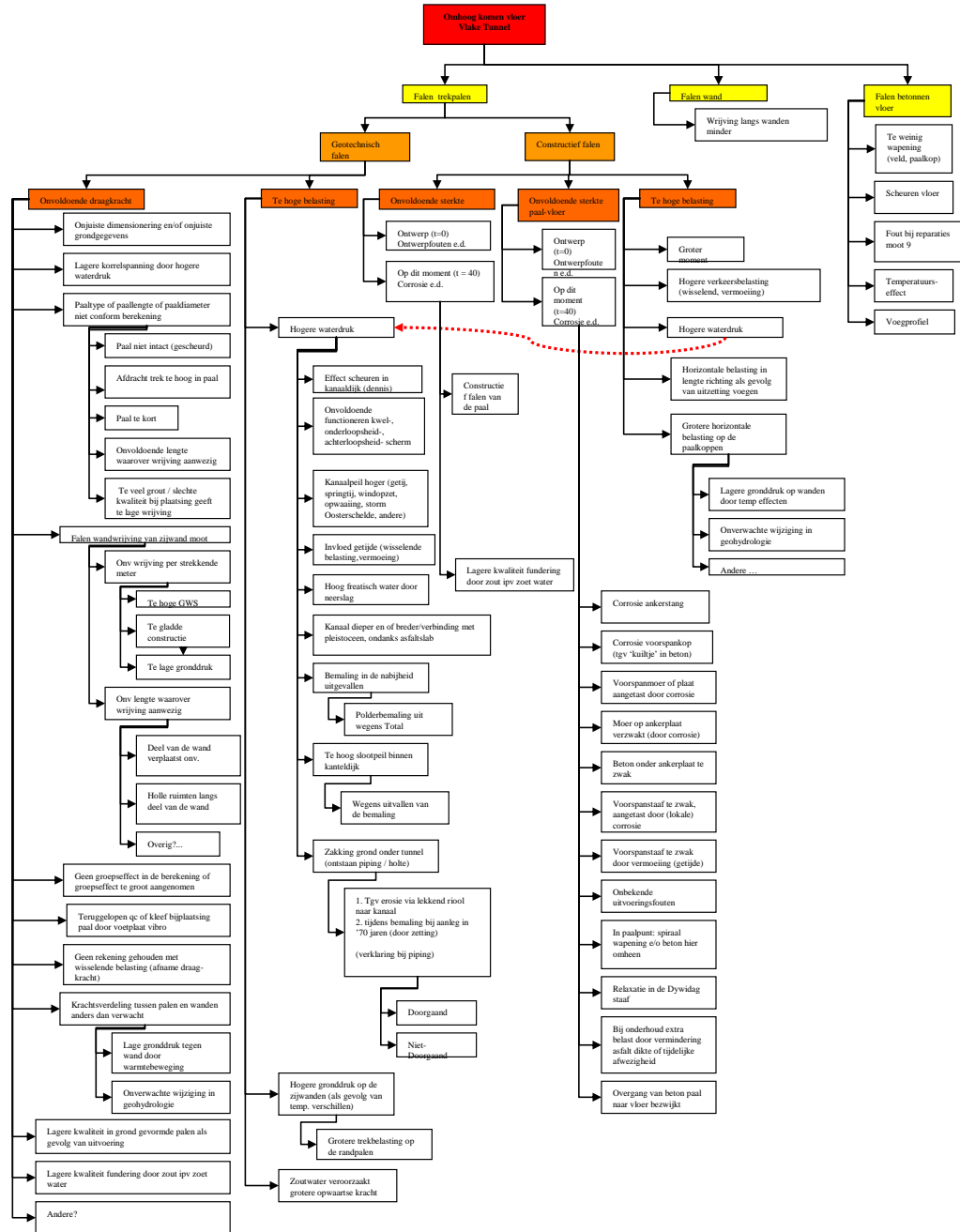
titel rapport: Adviesrapport Monitoring van de Prinses Margrietunnel met InSAR, Adviesrapport.

organisatie: Rijkswaterstaat, Datalab.

kenmerk rapport: geen.

datum rapport: datum 12-05-2023, versie 31-08-2023.

B Faalboom voor onderzoek aan de Vlaketunnel



C Geopende conussen

C.1 Locaties van de conussen en voorspanstaven

Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
34	PO34-1	34-C4	--	Er zat een extra moer op de staaf waardoor schroefdraad te kort was om aan te trekken			--
	PO34-2	34-C3	Kraan->OK				
	PO34-3	34-C2	Kraan->OK				
	PO34-4	34-C1	--	Niet open gemaakt			--
30	PO30-1	30-C6	Kraan->OK				
	PO30-2	30-C4		Geen staaf gevonden			
	PO30-3	30-C1	Kraan->OK				
	PO30-4	30-E6	Kraan->OK				
	PO30-5	30-E5	Kraan->OK				

Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
26	PO26-C2	26-C8	Gebroken	Moer na vrij hakken met de hand te verdraaien; met kraan getrokken tot 6,5 ton-> staaf kwam iets omhoog maar liep toen vast	Op 13/4 staaf uit gat gehaald nadat die eerst een stukje was gelicht met een vijzel; gat bleef droog; breuk op 7,36 m	7.36	75
	PO26-C4	26-C7	Gebroken	Met kraan getrokken tot 4,8 ton-> staaf kwam ca 20 cm omhoog en liep toen vast	Op 13/4 staaf uit gat gehaald nadat die eerst een stukje extra was gelicht met een vijzel; gat bleef droog; breuk op 7,9 m	7.90	79
	PO26-C6	26-C6	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 29/3 staaf uit gat gehaald; water kwam later uit gat omhoog; breuk op 3,48 m	3.48	82
	PO26-GR8-1	--	--	Kop van anker, incl injectienipple, zitten na hakken los; bij trekken met kraan was de kop er niet uit te trekken			--
	PO26-C8	26-C5	Gebroken	Gebroken bij de bouw; met kraan tot 3,7 ton getrokken maar niet los gekregen	Op 13/4 staaf uit gat gehaald nadat die eerst circa 2,5 m was uitgetrokken met een vijzel; gat bleef droog; breuk op 11,65 m	11.65	
	PO26-GR8-2	--	--	Niet getest			--
	PO26-C10	26-C4	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 29/3 staaf uit gat gehaald; water kwam later uit gat omhoog; breuk op 7,7 m	7.70	82
	PO26-1	26-C3	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 15/3 staaf uit gat gehaald; waterspoot omhoog; breuk op 3,5 m	3.50	
	PO26-C14	26-C2	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 29/3 staaf uit gat gehaald; water kwam uit gat; breuk op 3,2 m	3.20	82

Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
	PO26-2	26-C1	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 15/3 staaf uit gat gehaald; water kwam later omhoog; breuk op 5,8 m	5.80	
	PO26-3	26-D7	--	Onder ballast			--
25	PO25-1	25-C4	Kraan->OK				69
	PO25-2	25-C3	Kraan->OK				71
	PO25-3	25-C2	Kraan->OK				79
	PO25-4	25-C1	Kraan->OK				80
21	PO21-1	21-C7	Kraan->OK				
	PO21-2	21-C1	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 31/3 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich niet met water; breuk op 4,93 m	4.93	88
	PO21-3	21-D3	Kraan->OK				
	PO21-4	21-G1	600	Getest tot 600kN; testdatum 27/3			82
	PO21-5	21-H6	700	Getest tot 700kN; testdatum 22/3			84
18	PO18-1	18-C7	Kraan->OK				
	PO18-2	18-C3	Kraan->OK				
	PO18-3	18-G4	700	Getest tot 700kN; testdatum 22/3			90
	PO18-4	18-H4	700	Getest tot 700kN; testdatum 22/3			90
	PO18-5	18-H2	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 27/3 staaf uit gat gehaald; water spoot uit gat; breuk op 1,88 m	1.88	90

Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
15	PO15-1	15-E8	700	Getest tot 700kN; testdatum 25/8			93
	PO15-2	15-E7	Kraan->OK	Schroefdraad te kort voor trekproef			
	PO15-3	15-E6	639	Getest tot 639kN; testdatum 25/8			
	PO15-4	15-E5	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 31/3 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich langzaam met water; breuk op 4,58 m	4,58	89
	PO15-5	15-E4	--	Staaft was afgeslepen, waardoor de staaf niet was te trekken met de kraan			
	PO15-6	15-E3	Gebroken	Staaft was schuin afgeslepen	Op 31/3 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich langzaam met water; breuk op 6,12 m	6,12	
	PO15-7	15-E2	Gebroken	Staaft was schuin afgeslepen	Op 31/3 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich langzaam met water; breuk op 5,58 m	5,58	
	PO15-8	15-E1	681	Getest tot 681kN; testdatum 25/8	Staaft was schuin afgeslepen		
	PO15-D1	15-D1	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 19/6 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich langzaam met water; breuk op 2,5 m	2,5	
	PO15-12	15-D2	--	Staaft was afgeslepen, waardoor de staaf niet was te trekken met de kraan			
	PO15-11	15-D3	696	Getest tot 696kN; testdatum 25/8			
	PO15-10	15-D4	701	Getest tot 701kN; testdatum 25/8			

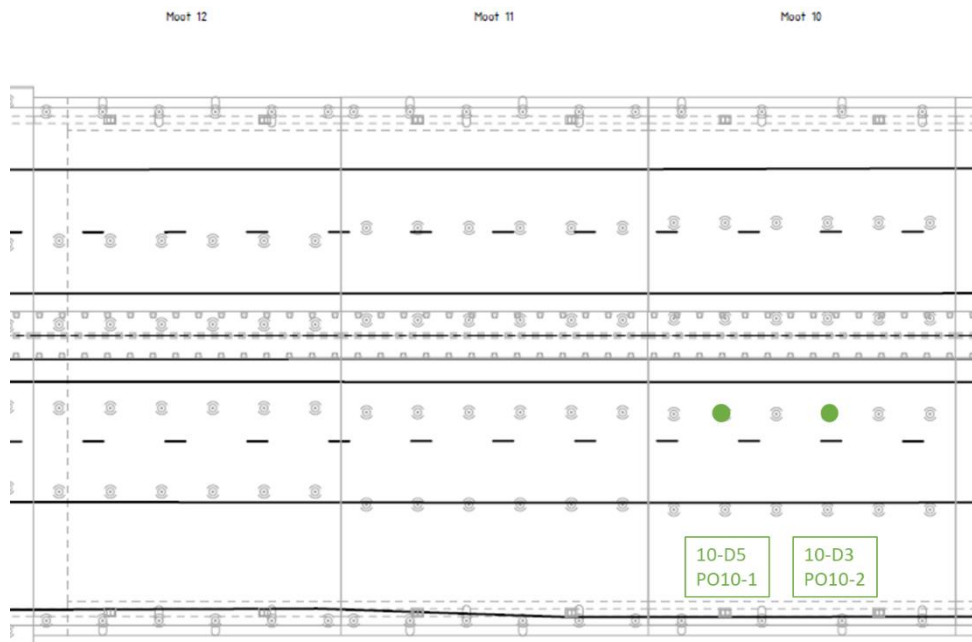
Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
	PO15-9	15-D5	Kraan->OK	Schroefdraad te kort voor trekproef			
	PO15-D6	15-D6	701	Getest tot 701kN; testdatum 25/8			
	PO15-D7	15-D7	700	Getest tot 700kN; testdatum 25/8			
	PO15-D8	15-D8	680	Getest tot 680kN; testdatum 25/8			
	PO15-B1	15-B1	639	Getest tot 639kN; testdatum 16/8			
	PO15-13	15-B2	Kraan->OK	Schroefdraad te kort voor trekproef			
	PO15-14	15-B3	678	Getest tot 678kN; testdatum 16/8			
	PO15-B4	15-B4	700	Getest tot 700kN; testdatum 16/8			
	PO15-B5	15-B5	701	Getest tot 701kN; testdatum 16/8			
	PO15-B6	15-B6	Gebroken	Staaft was al gebroken	Op 19/6 staaf uit gat gehaald; geen water in gat; breuk op 7,5 m	7,5	
	PO15-B7	15-B7	--	Staaft was afgeslepen, waardoor de staaf niet was te trekken met de kraan			

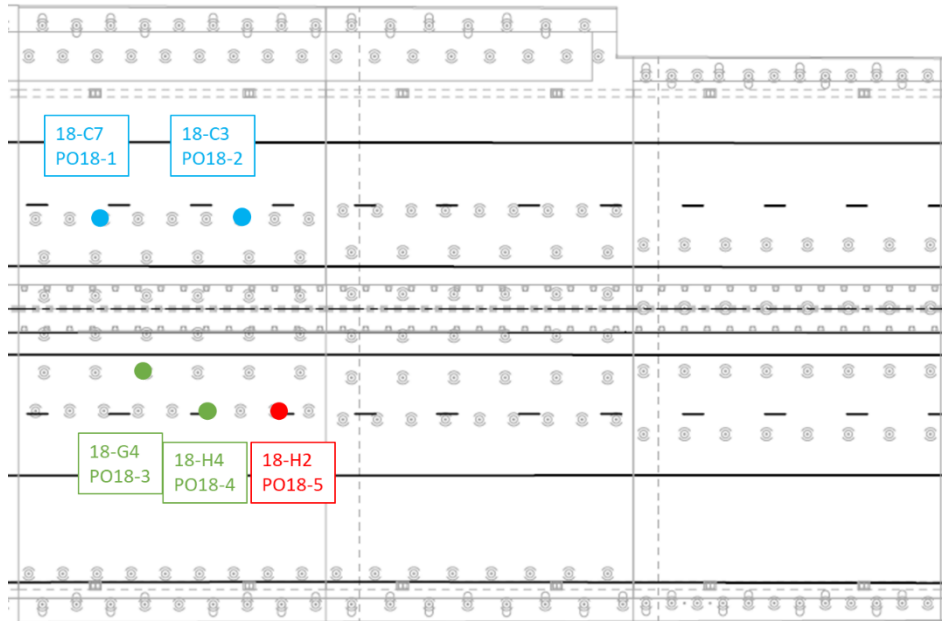
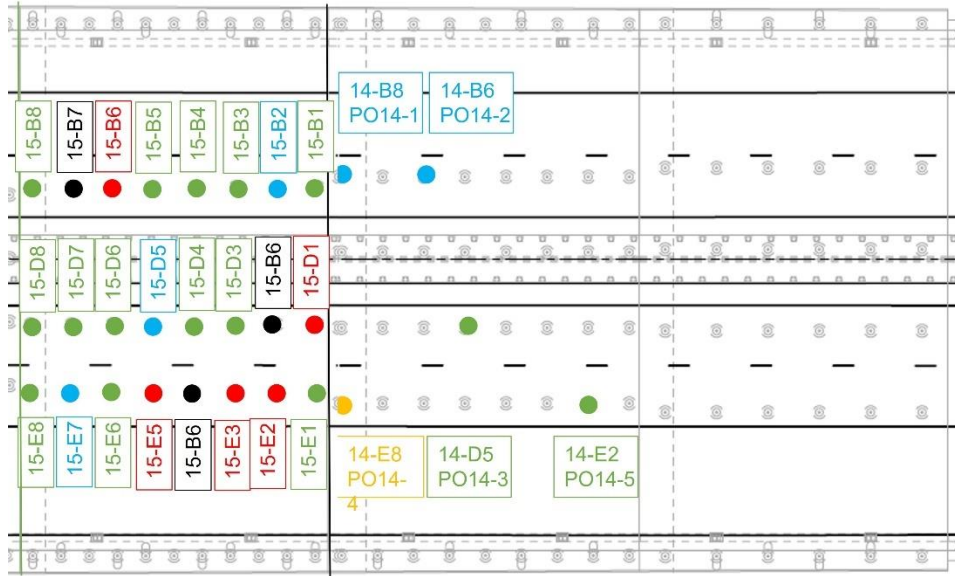
Moot	Code VSF	Code Deltares	Test op breuk / Trekproef tot ... (kN)	Opmerking bij testen op breuk	Opmerking bij verwijderen gebroken voorspanstaaf	Niveau breuk [m]	Lengte staaf boven moer (mm)
	PO15-B8	15-B8	680	Getest tot 680kN; testdatum 16/8			
14	PO14-1	14-B8	Kraan->OK				
	PO14-2	14-B6	Kraan->OK				
	PO14-3	14-D5	700	Getest tot 700kN; testdatum 22/3			82
	PO14-4	14-E8	Gebroken	Getest tot 700kN; testdatum 22/3; na 1 minuut op 700kN brak staaf	Op 27/3 staaf uit gat gehaald; gat vulde zich langzaam met water; breuk op 4,21 m	4.21	81
	PO14-5	14-E2	700	Getest tot 700kN; testdatum 21/3			85
10	PO10-1	10-D5	550	Getest tot 550kN; testdatum 21/3			90
	PO10-2	10-D3	550	Bovenste 24 mm is van staaf geslepen omdat schroefdraad was beschadigd; getest tot 550 kN; testdatum 21/3			90
	PO10-3	10-D1	--	Geen staaf gevonden			--
	PO10-4	10-E3	--	Te dicht bij legoblokken om vrij te maken			--

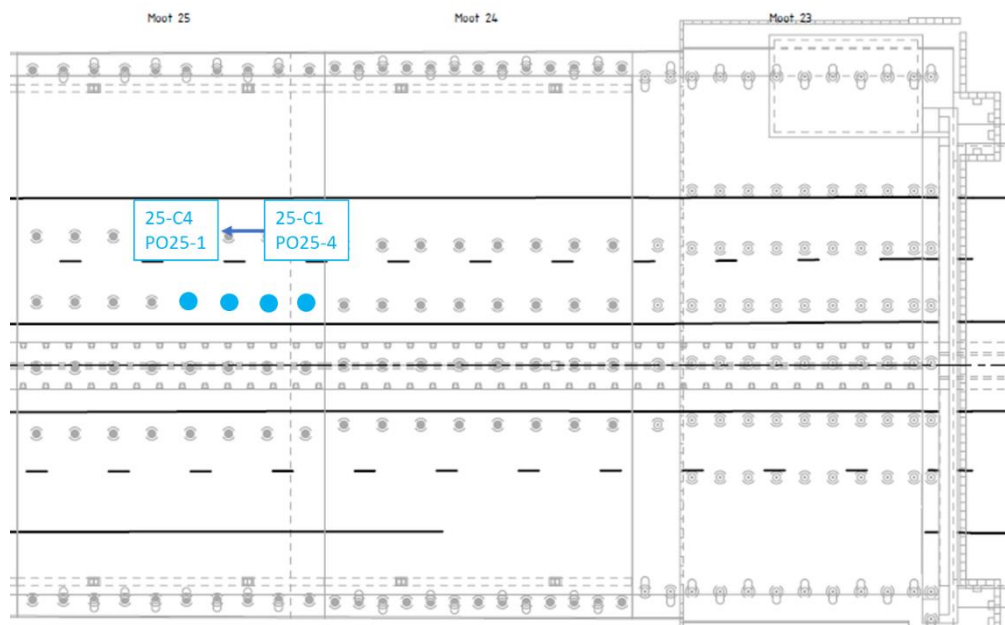
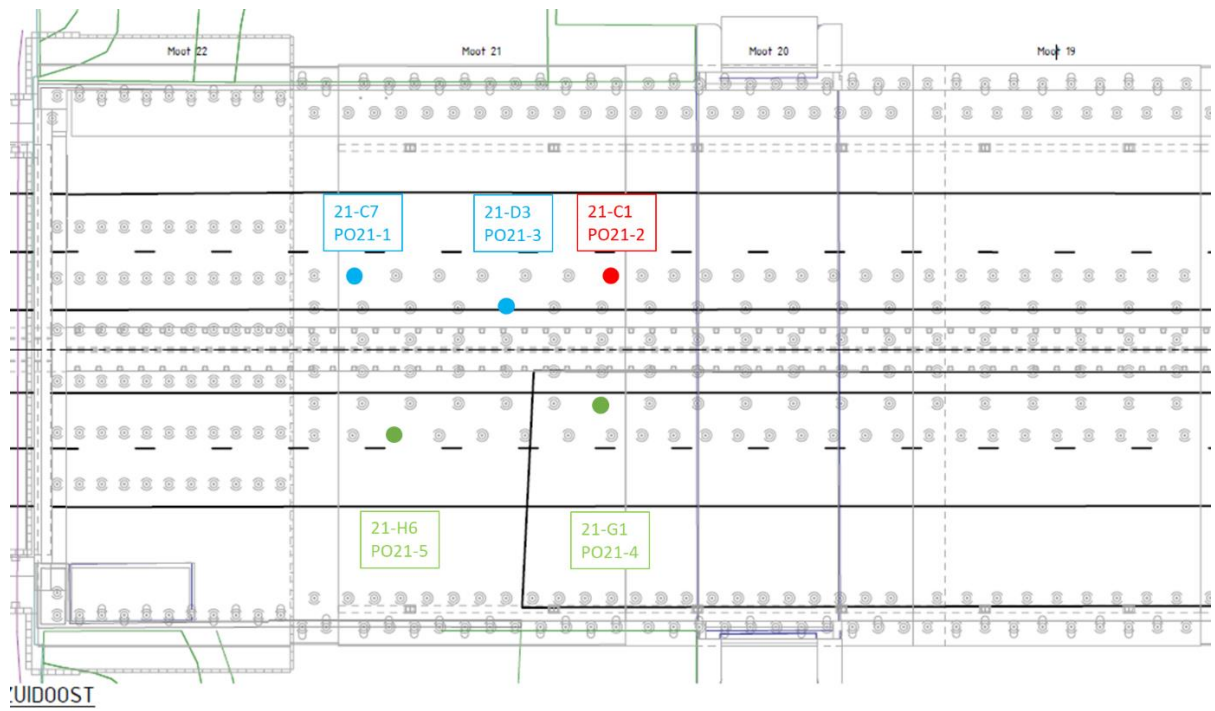
C.2 Figuren van de geopende conussen met de resultaten

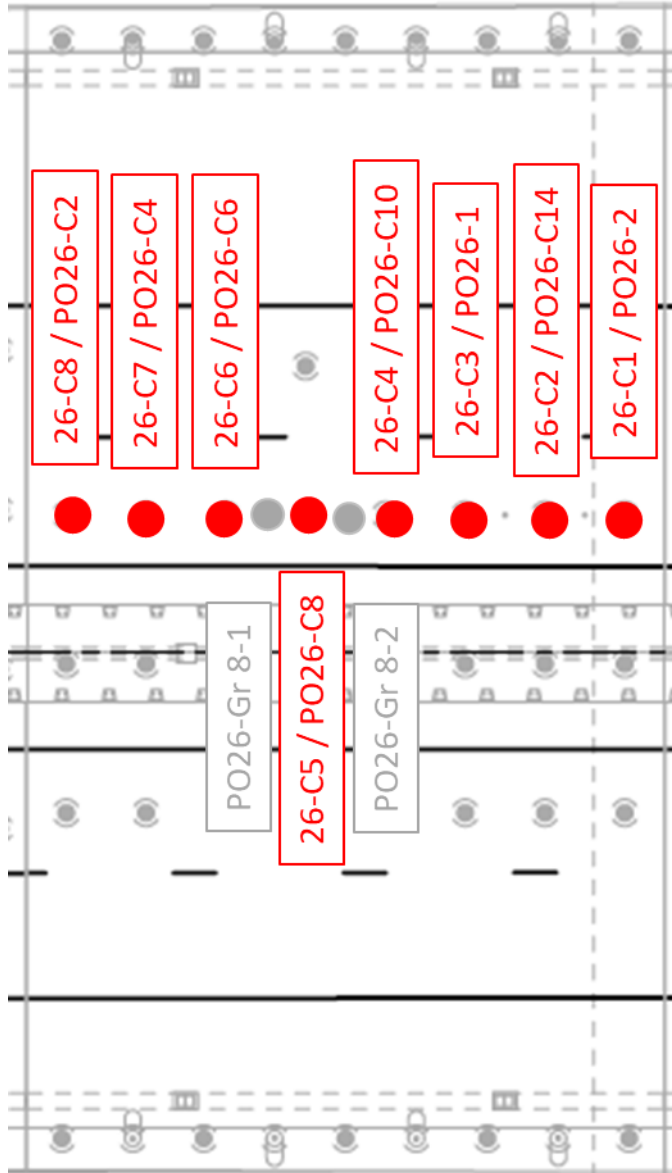
Legenda bij overzicht moten:

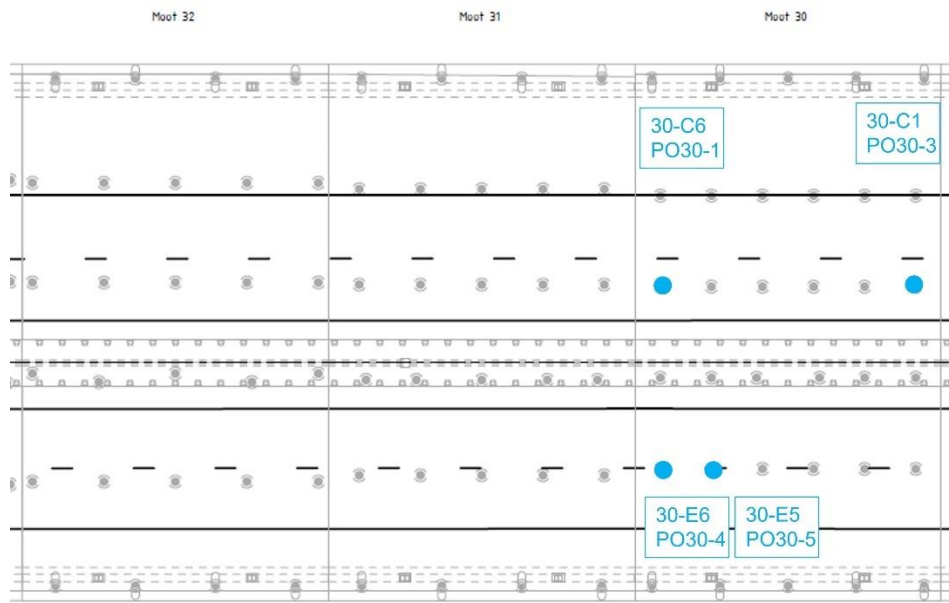
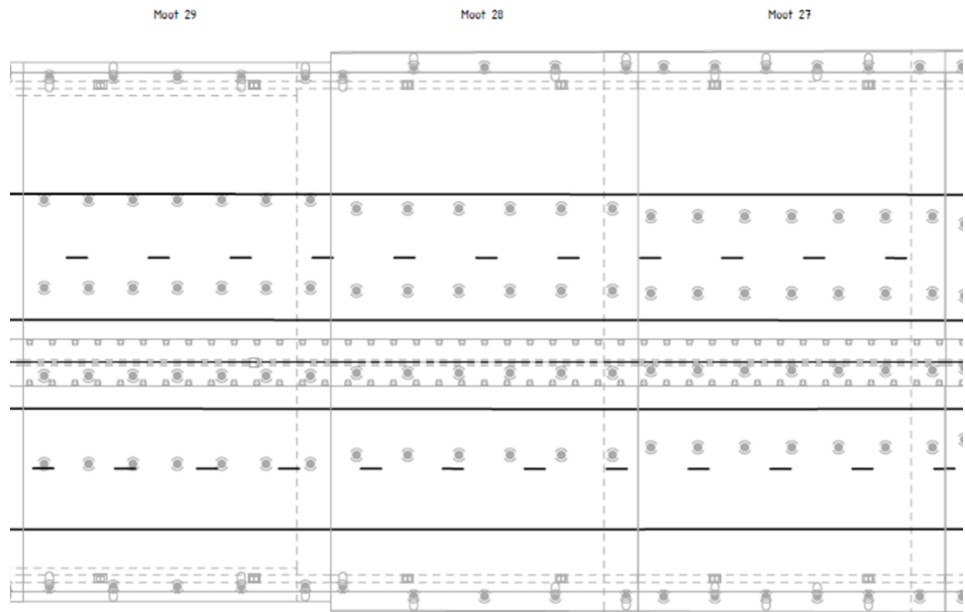
- = voorspanstaaf is met vijzel getest en staat op voorspanning
- = voorspanstaaf is met kraan getest op circa 60 kN en zat toen nog vast
- = voorspanstaaf is met vijzel getest en is daarbij gebroken
- = voorspanstaaf was al gebroken
- = draadeind op staaf te kort om staaf te testen

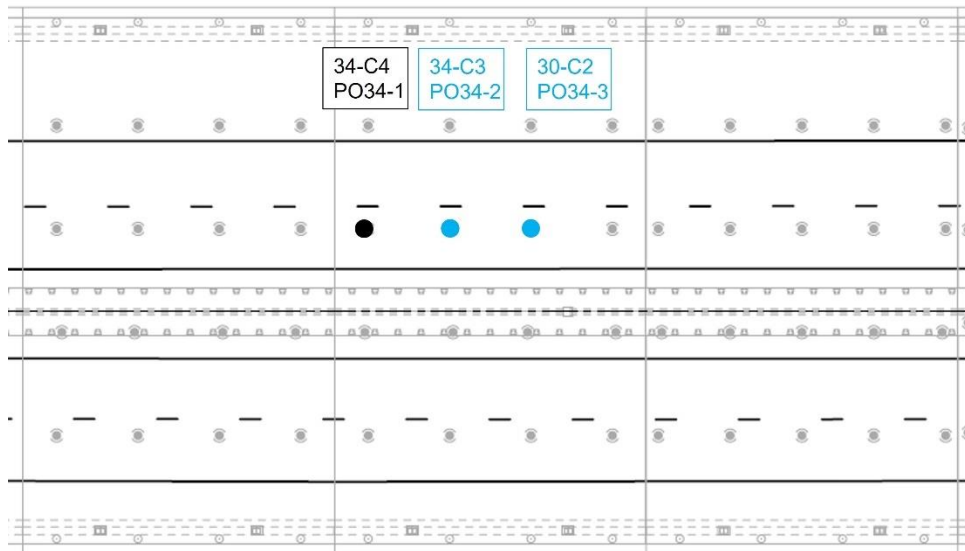




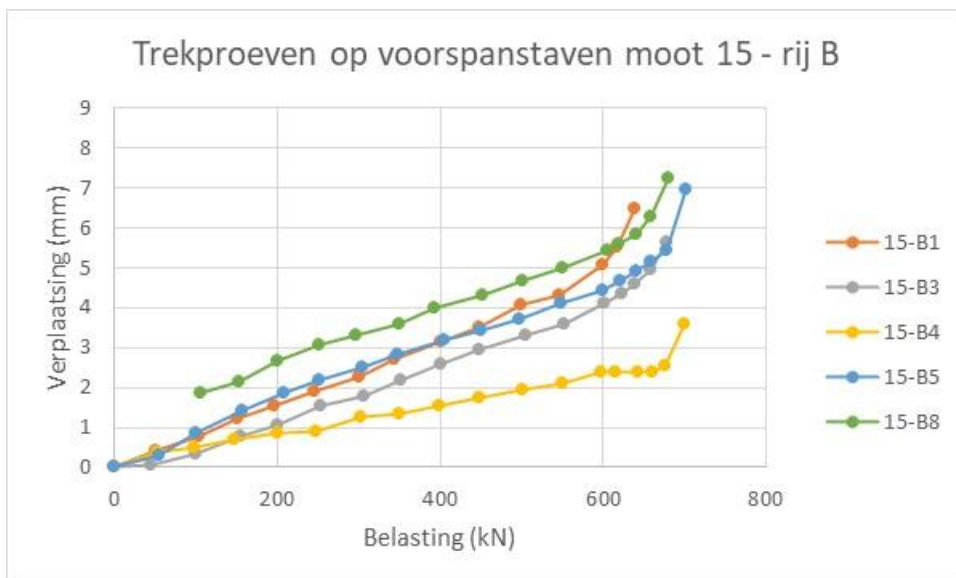




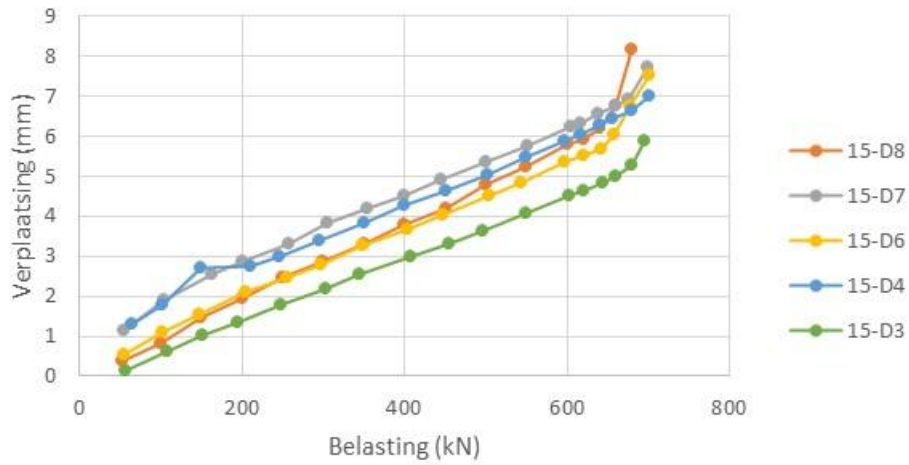




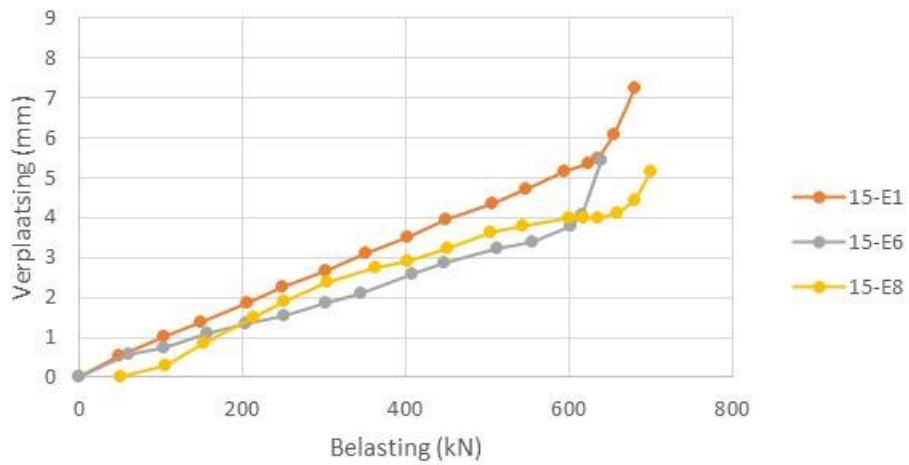
C.3 Grafieken van de trekproeven



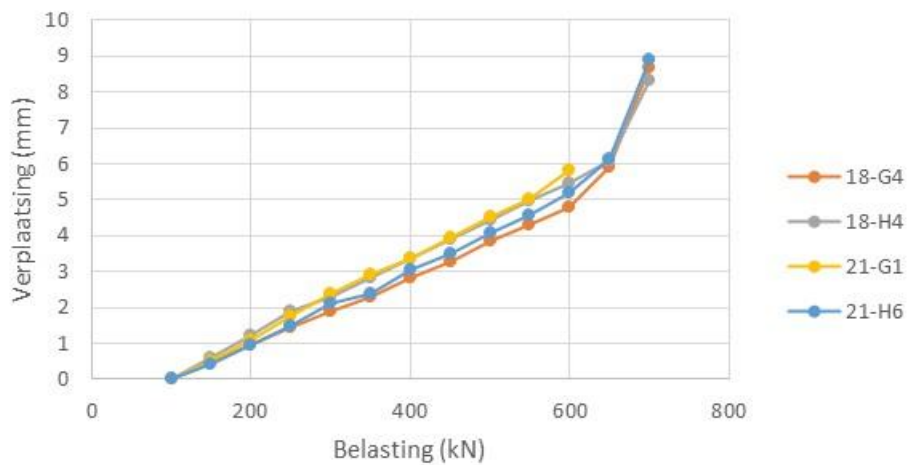
Trekproeven op voorspanstaven moot 15 - rij D



Trekproeven op voorspanstaven moot 15 - rij E



Trekproeven op voorspanstaven moot 18 en 21



C.4 Resultaten testen aanwezig kracht in voorspanstaaf

Tabel C.1 Resultaten testen in voorspanstaaf aanwezig kracht.

Paal	Maximale kracht [kN]	Gemeten voorspankracht [kN]	Opmerking
10-D3	550	--	I.v.m. testen proefopstelling is alleen minimale aanwezig kracht bepaald, de vervorming is niet correct gemeten
10-D5	550	--	I.v.m. testen proefopstelling is alleen minimale aanwezig kracht bepaald, de vervorming is niet correct gemeten
14-D5	700	650	
14-E2	700	640	
14-E8	700	630	Staaft is gebroken tijdens twee minuten wachten bij maximale kracht
15-B1	639	570	
15-B3	678	560	
15-B4	700	660	
15-B5	701	620	
15-B8	680	610	
15-D3	696	660	
15-D4	701	680	
15-D6	701	640	
15-D7	700	670	
15-D8	680	640	
15-E1	681	630	
15-E6	639	590	
15-E8	700	650	
18-G4	700	610	
18-H4	700	650	
21-G1	600	580	
21-H6	700	630	

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl