

NOTITIE

Project	: Adaptief hergebruik van een bunker
Locatie	: Regiment Pontonniers (Saksen-Weimar) te Arnhem
Onderwerp	: Geotechnische beschouwing
Aan	: Nebest B.V. t.a.v. M. van Dooren
Van	: ing. R.H. de Booij
Verificatie	: ing. T. van Gils
Kenmerk	: 62495-N001-V2-TGI
Datum	: 16 januari 2026

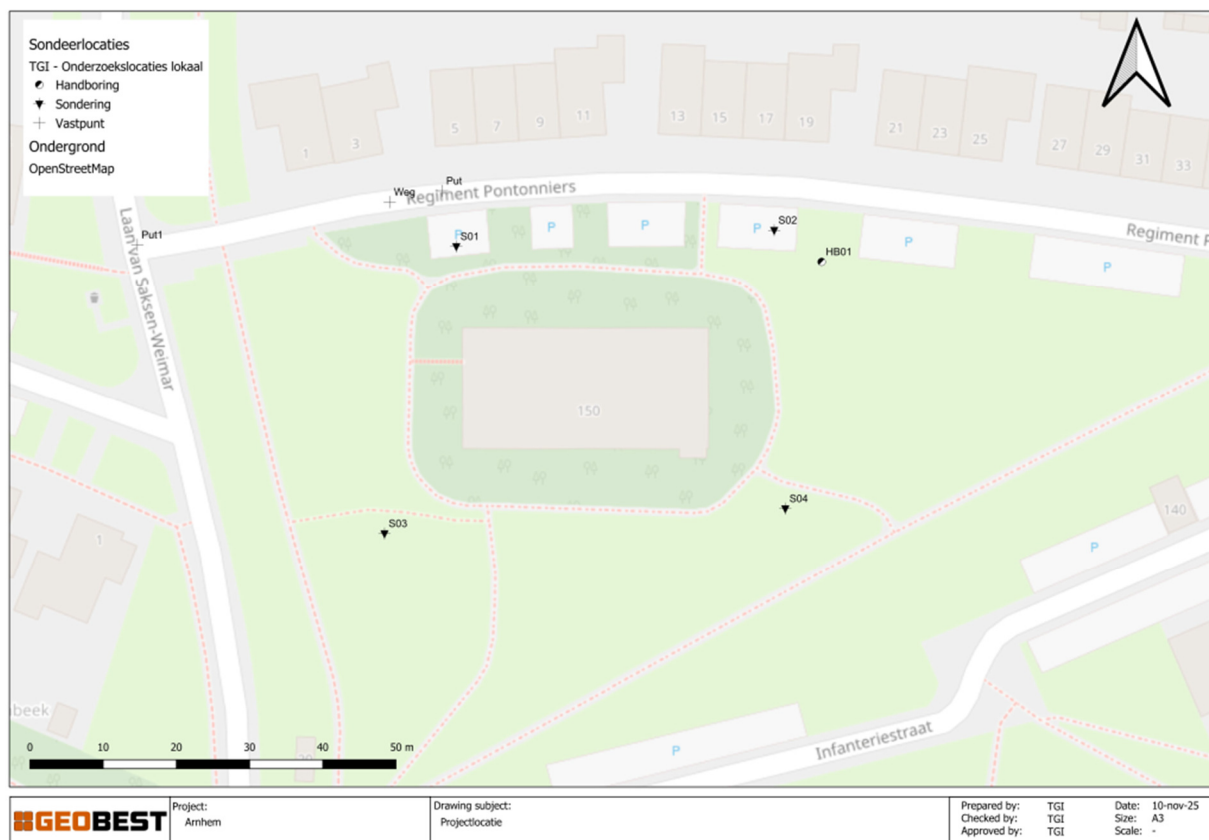
1 Inleiding

Geobest B.V. heeft van Nebest B.V. opdracht gekregen voor het laten uitvoeren van geotechnisch grondonderzoek en het uitbrengen van geotechnische adviezen voor het project adaptief hergebruik van de bunker in de wijk Saksen Weimar te Arnhem.

In de wijk Saksen-Weimar te Arnhem staat een bunker. De gebruiksfunctie van de bunker wijzigt, bij het wijzigen worden de constructieve elementen in de bunker verwijderd en vervolgens wordt de bunker vol gestort met beton. Dit heeft als doel de 'bunker' (het blok beton) te gaan gebruiken voor warmte opslag, gevoed door overtollig groene energie.

Bij de geotechnische beschouwing is de verticale draagkracht beschouwd. Daarnaast is er een uitgebreide analyse van de vervorming van de ondergrond onderzocht. Hierbij is gebruikgemaakt van de eindige elementenmethode met Plaxis 2D.

De projectlocatie inclusief sondeerlocaties zijn weergegeven in Figuur 1-1.



Figuur 1-1: Projectlocatie inclusief sondeerlocaties.



2 Normen, richtlijnen en referenties

2.1 Normen en richtlijnen

Er is gebruikgemaakt van de volgende normen en richtlijnen:

- [1] NEN 9997-1+C2:2017 Geotechnisch ontwerp van constructies – Samenstelling van NEN-EN 1997-1, NEN-EN 1997-1/NB Nationale bijlage en NEN 9097-1 Aanvullingsnorm bij NEN-EN 1997-1, november 2017;
- [2] CUR 2003-7 Bepaling geotechnische parameters; 1^e druk, oktober 2003.

2.2 Beschikbare gegevens

Door de opdrachtgever en de gemeente zijn de volgende documenten aangeleverd:

- [3] Projectnummer JS/COP.02585.03.18, Geotechnisch bodemonderzoek Regiment Pontonniers te Arnhem, d.d. 3 november 2025, Bam Infraconsult B.V.;
- [4] Referentie P61301-RAP-02, Draagkrachtanalyse Bunker Saksen Weimar Kazerne, d.d. 2 juli 2025, Nebest B.V.;
- [5] Tekening situatie profielen plattegronden en doorsnede, februari 1973, bureau aanleg beheer en onderhoud van vliegvelden.

2.3 Openbare bronnen

Via het internet zijn diverse databanken te raadplegen met relevante informatie aangaande de bodemgesteldheid en de historie van de locatie. Voor het tot op heden uitgevoerde onderzoek is gebruikgemaakt van de volgende openbare bronnen:

- [6] Overzicht van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) (www.ahn.nl);
- [7] Grondonderzoek vanuit het DINOloket van NITG-TNO (www.dinoloket.nl).

3 Geotechnische gegevens

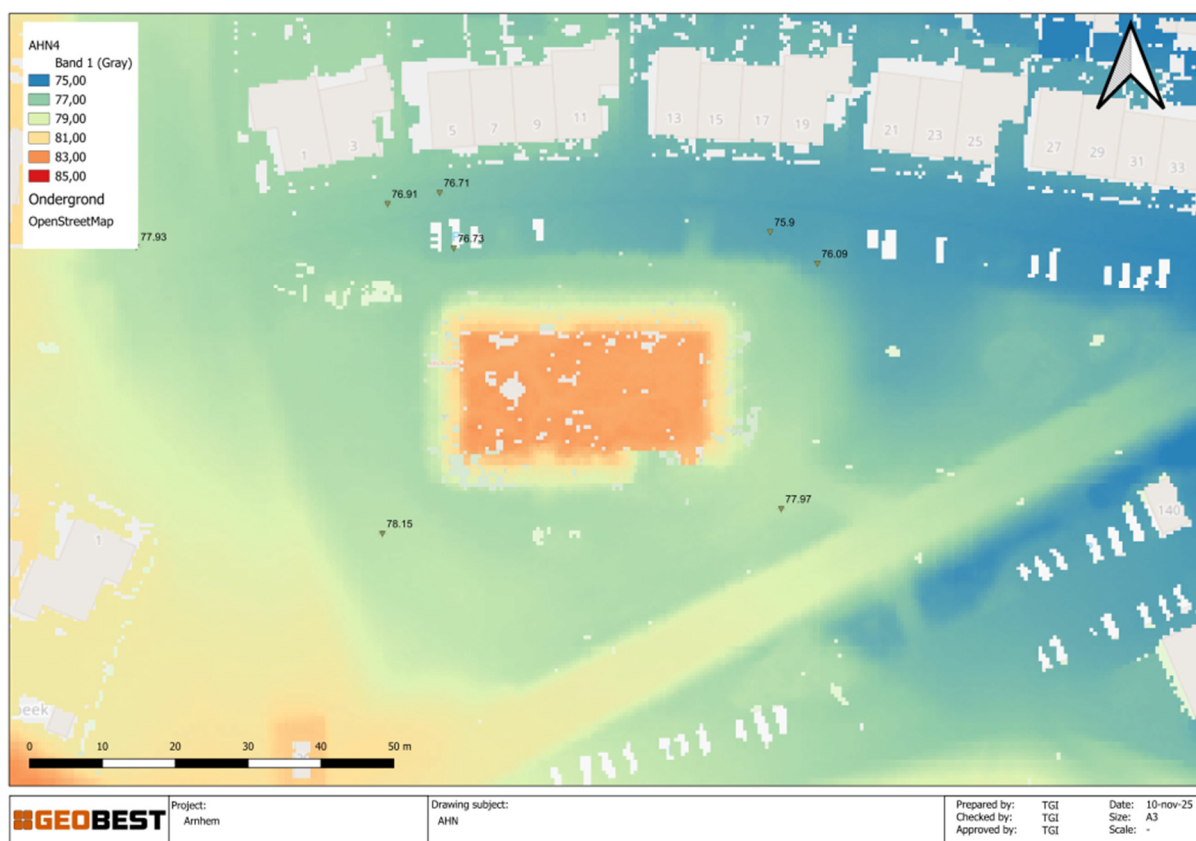
3.1 Grondonderzoek

Door BAM Infraconsult B.V is een grondonderzoek uitgevoerd onder projectnummer JS/COP.02585.03.18, d.d. 3 november 2025 [3]. Het onderzoek bestaat uit 4 sonderingen met meting van de plaatselijke wrijvingsweerstand en 1 handboringen tot een diepte van circa maaiveld min 3 m. In Bijlage 1 is het grondonderzoek opgenomen.

3.2 Maaiveldniveau

Het maaiveld zoals aangetroffen tijdens het grondonderzoek varieert van NAP +75,90 m (S02) tot NAP +78,15 m (S03).

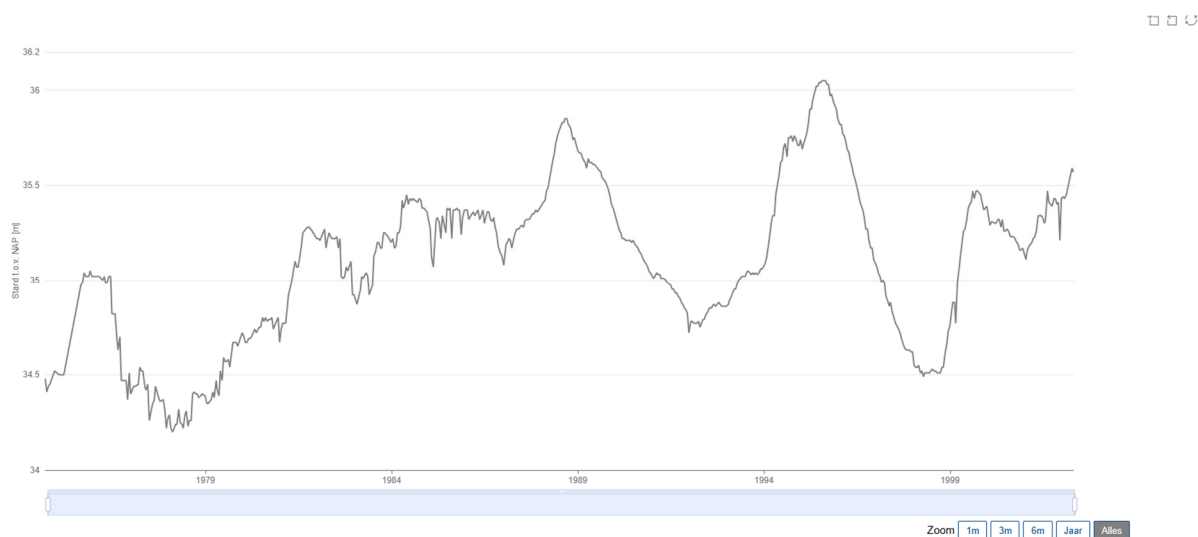
De bunker is deels ingegraven, maar bevindt zich ook enkele meters boven het oorspronkelijk maaiveldniveau. Dit is goed zichtbaar in het Actueel Hoogtebestand Nederland [6], zie Figuur 3-1.



Figuur 3-1: AHN

3.3 Grondwaterstanden

In het DINOlloket zijn in de directe omgeving van de projectlocatie geen peilbuizen aangetroffen. Op een afstand van een aantal honderden meters is peilbuis B40B0128 aangetroffen. De gemeten freatische grondwaterstand in deze peilbuis varieert van circa NAP +34,0 m tot circa NAP +36,0 m. In de berekeningen is een freatische grondwaterstand van NAP +35,0 m aangehouden.



Figuur 3-2: Grondwaterstand peilbuis B40B0128



4 Omgevingsbeïnvloeding

4.1 Doel van de berekeningen

Het doel van de Plaxis 2D berekening is om de vervorming van de ondergrond in kaart brengen als gevolg van het volstorten van de bunker met beton.

4.2 Uitgangspunten

4.2.1 Algemeen

De betonnen elementen zijn gemodelleerd als lineair elastisch materiaal met een bijbehorend volumieke massa van 24 kN/m³ (en 18 kN/m² voor het vullen van de bunker) en een elasticiteitsmodulus E van 20E+6 kN/m².

De betonnen bunker is gemodelleerd als volume element met een elasticiteitsmodulus E van 20E+6 kN/m² en diverse diktes van dak, vloer en wanden.

4.2.2 Grondparameters

Voor de berekening is gebruik gemaakt van het Hardening Soil Model, zie Tabel 4-1.

Tabel 4-1: Parameters Hardening Soil

General				Parameters							
ID [-]	Drainage [-]	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kN/m ²]	m [-]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]	ψ [°]	POP [kN/m ²]
Zand, bovenste 1 m	Drained	18,0	20,0	50.000	50.000	200.000	0,5	0,1	30,0	0,0	0,0
Zand	Drained	18,0	20,0	50.000	50.000	200.000	0,5	0,1	30,0	0,0	20,0
Zand, aanvulling	Drained	18,0	20,0	50.000	50.000	200.000	0,5	2,0	32,5	2,5	0,0

De oorspronkelijke bodemopbouw is conform Tabel 4-2 aangehouden.

Tabel 4-2: Aangehouden bodemopbouw.

Laag [-]	BK [NAP + m]	OK [NAP + m]
Zand, bovenste 1 m	+77,60	+76,60
Zand	+76,60	-

4.2.3 Geometrie

Om de juiste berekeningsresultaten te verkrijgen is het van belang dat in het Plaxis 2D model de juiste historie van de ondergrond wordt gemodelleerd. In de berekening is een initieel vlak maaiveld geschematiseerd van NAP +77,60 m met een grondwaterstand op NAP +35,00 m. In de volgende fase is de aanleg van de bunker meegenomen door een ontgraving tot NAP +72,60 m te modelleren.

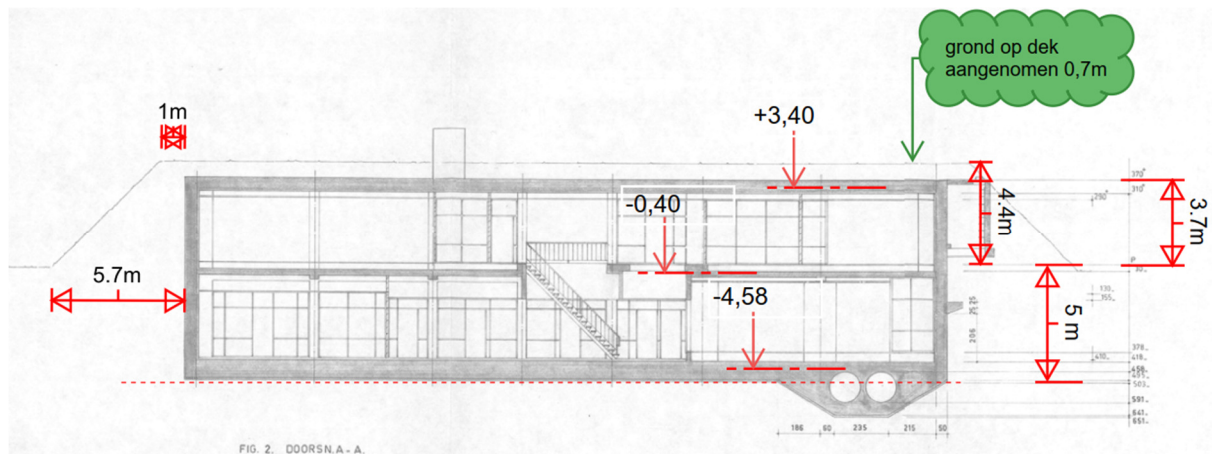
In de daarop volgende fases is het realiseren van de bunker, het weer aanvullen en vervolgens dichtzetten van de bunker gemodelleerd. De fasering is in de Plaxis 2D analyse als volgt aangehouden:

- Initiële fase;
- Ontgraven voor aanbrengen bunker;
- Aanbrengen bunker;
- Aanvullen maaiveld;
- Dichtzetten bunker met beton;

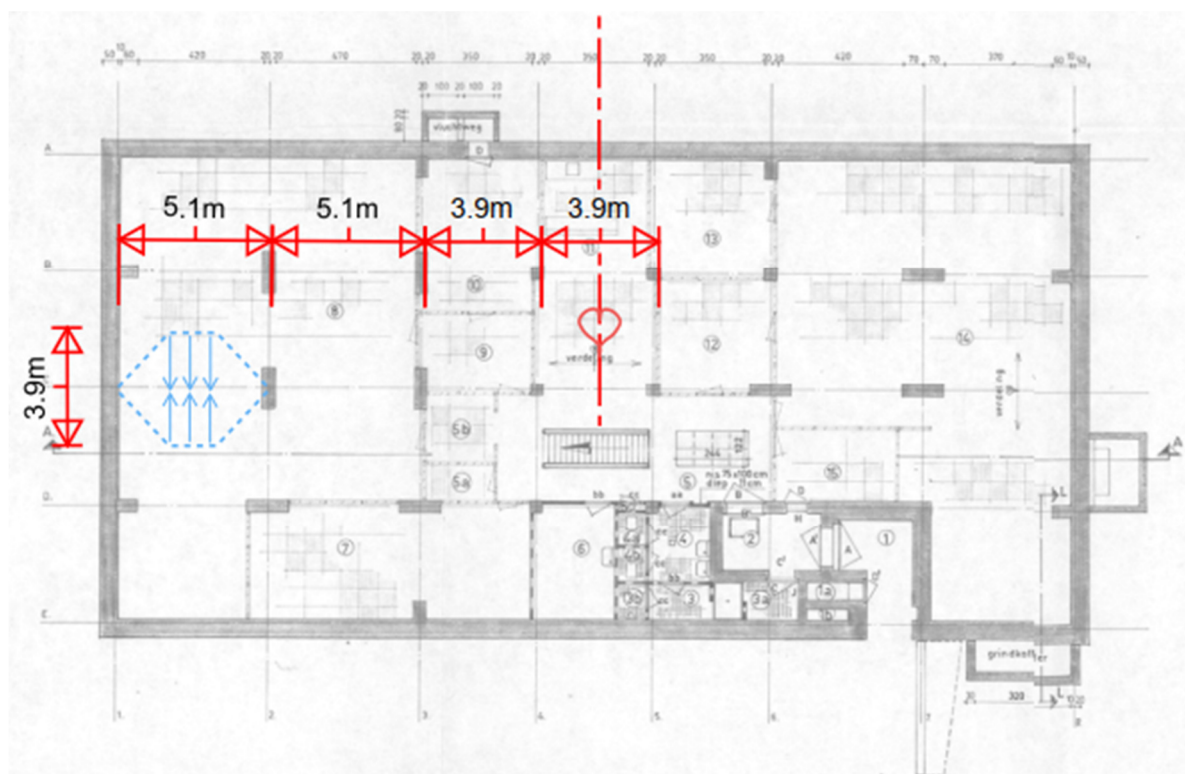
In Figuur 4-1 is een doorsnede van de bunker weergegeven en in Figuur 4-2 een bovenaanzicht. De gepresenteerde hoogtematen zijn ten opzichte van peil. De bovenzijde van de bunker is aangehouden op NAP +81,30 m met daarboven een gronddekking van 0,70 m tot NAP +82,0 m. De onderzijde van



de bunker is aangehouden op NAP +72,60 m. In het Plaxis 2D model zijn de afstanden tussen de wanden aangehouden conform het bovenaanzicht in Figuur 4-2.



Figuur 4-1: Doorsnede bunker

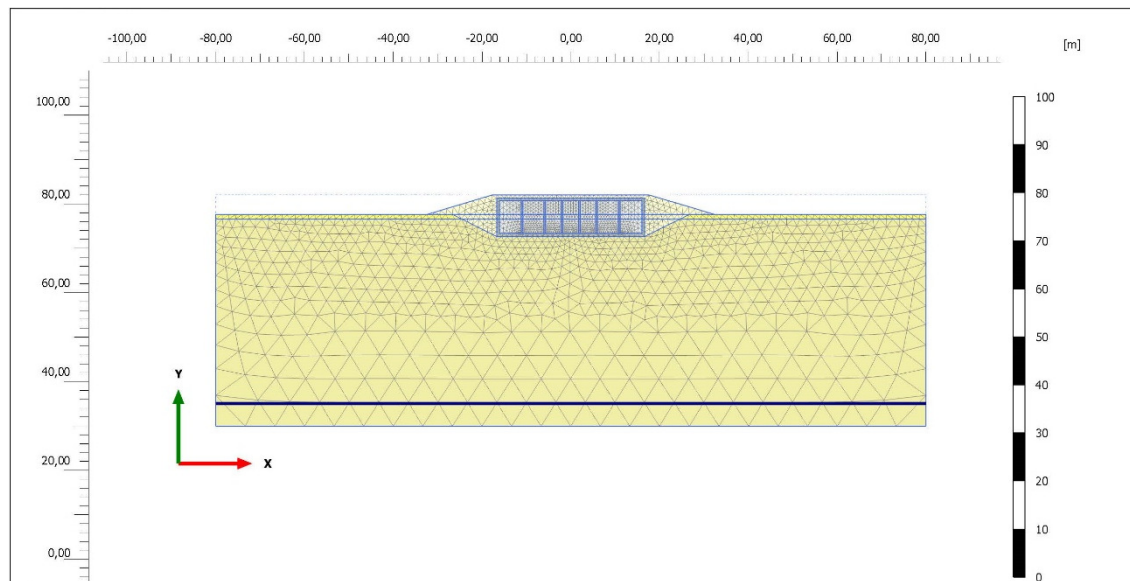


Figuur 4-2: Bovenaanzicht bunker.

4.3 Berekeningsresultaten

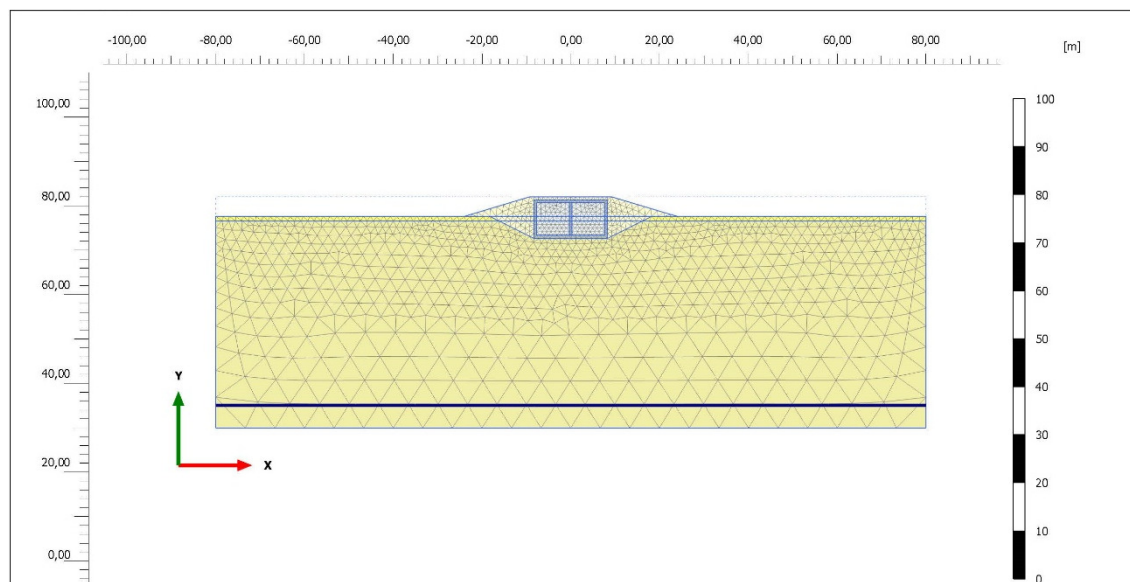
De berekeningen zijn uitgevoerd in de langs- en dwarsdoorsnede van de bunker, derhalve zijn de berekeningsresultaten weergegeven in de langs- en dwarsdoorsnede.

De langsdoorsnede van het Plaxis 2D model is weergegeven in Figuur 4-3.



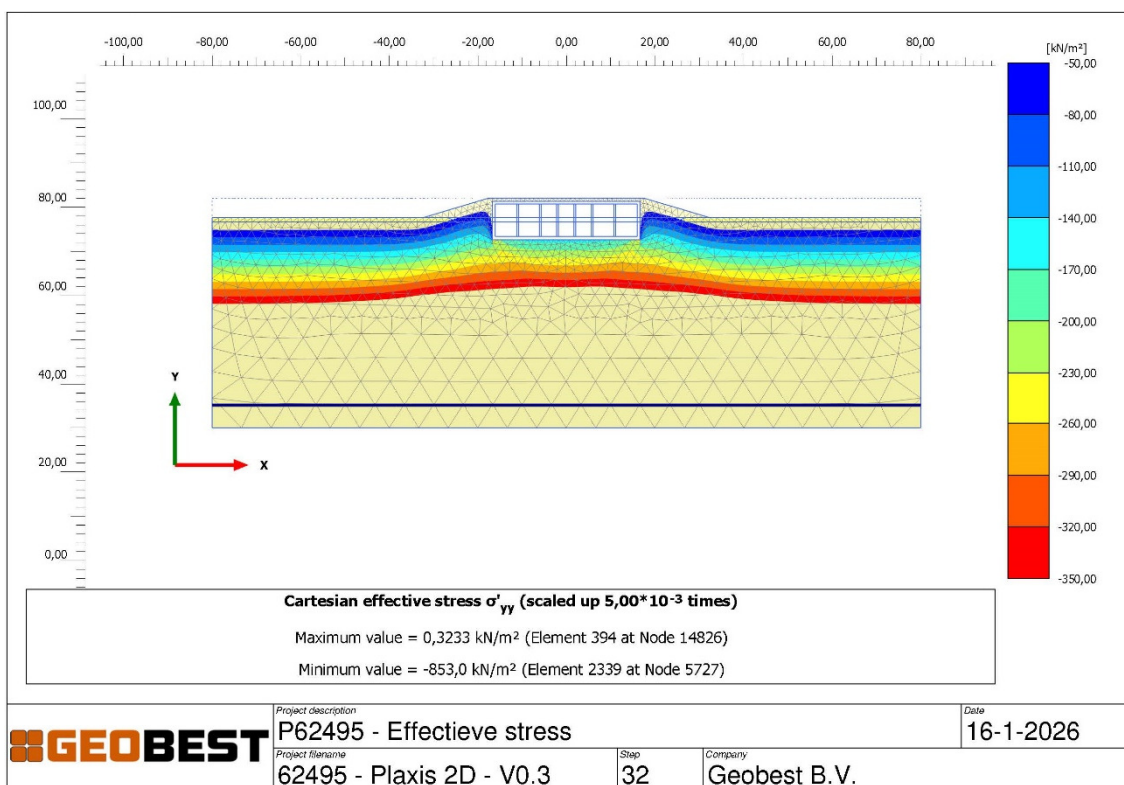
Figuur 4-3: Langsdoorsnede Plaxis 2D model.

De dwarsdoorsnede van het Plaxis 2D model is weergegeven in Figuur 4-4.



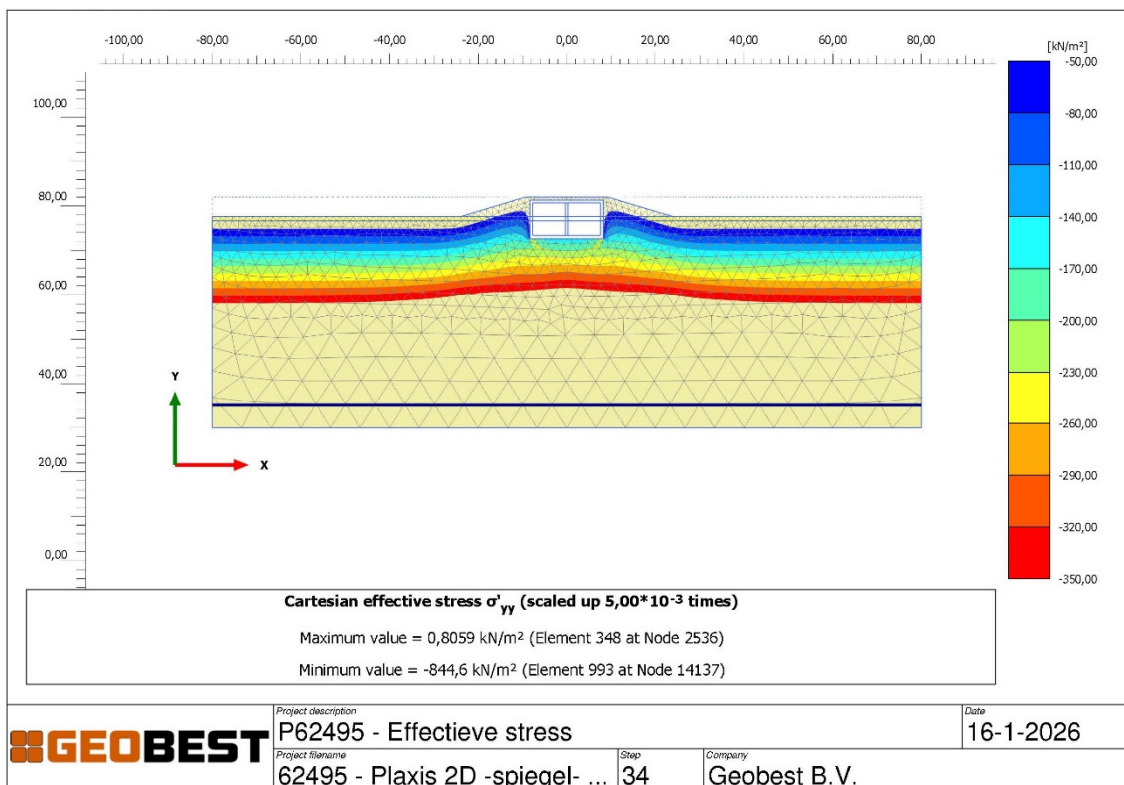
Figuur 4-4: Dwarsdoorsnede Plaxis 2D model.

De effectieve verticale spanning (range van 50 kN/m² tot 350 kN/m²) in de langsdoorsnede is weergegeven in Figuur 4-5.



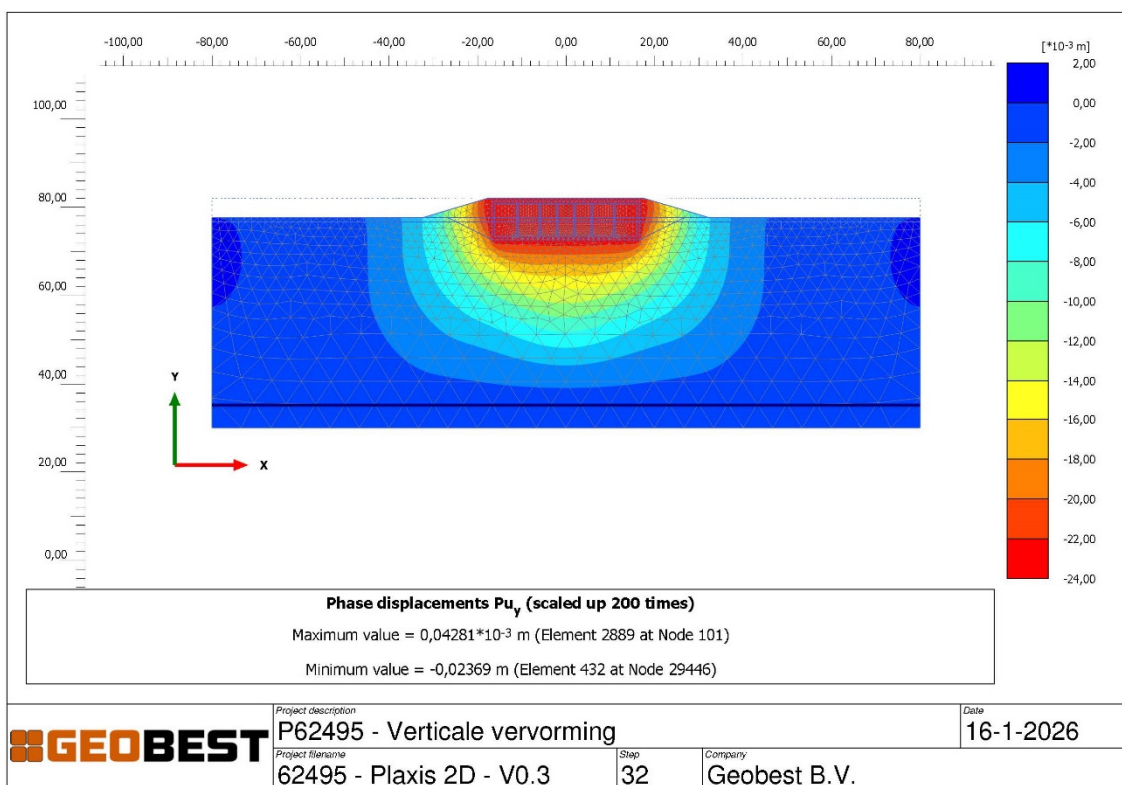
Figuur 4-5: Verticale effectieve spanning in de eindsituatie, σ'_{yy} , in de langsdoorsnede.

De effectieve verticale spanning (range van 50 kN/m² tot 350 kN/m²) in de dwarsdoorsnede is weergegeven in Figuur 4-6.



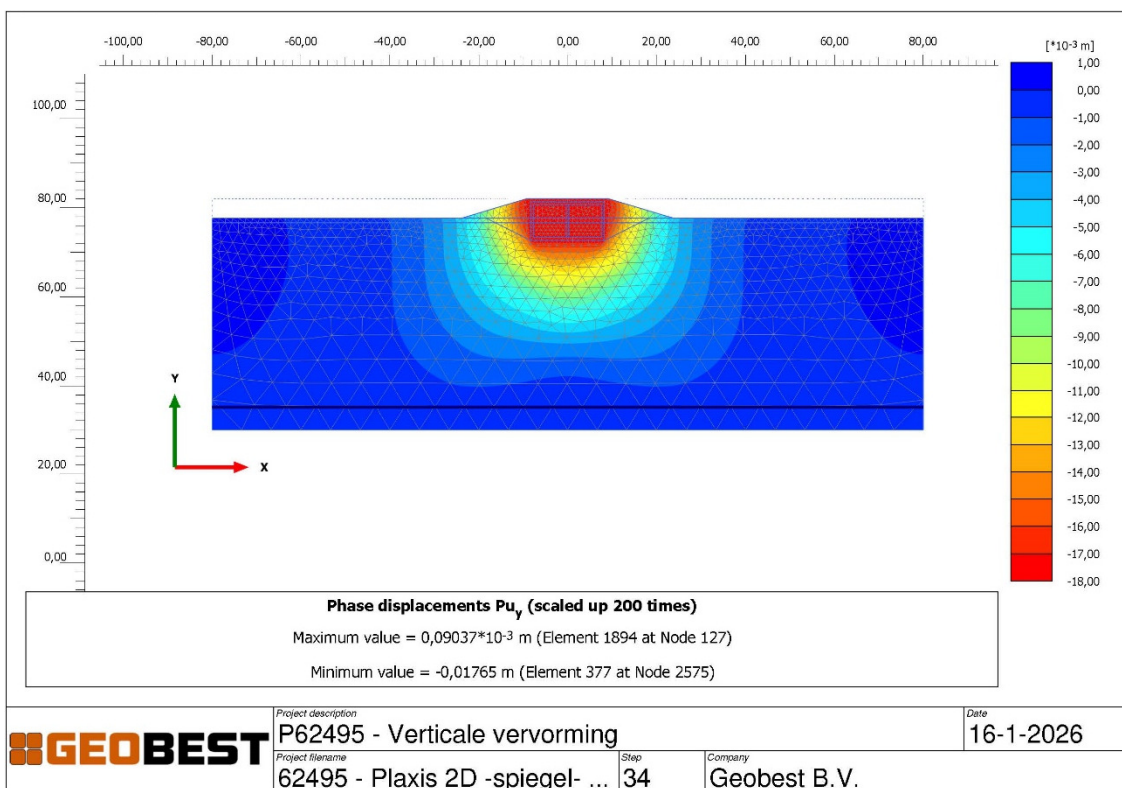
Figuur 4-6: Verticale effectieve spanning in de eindsituatie, σ'_{yy} , in de dwarsdoorsnede.

De verticale vervorming in de eindfase, in de langsdoorsnede, is weergegeven in Figuur 4-7.



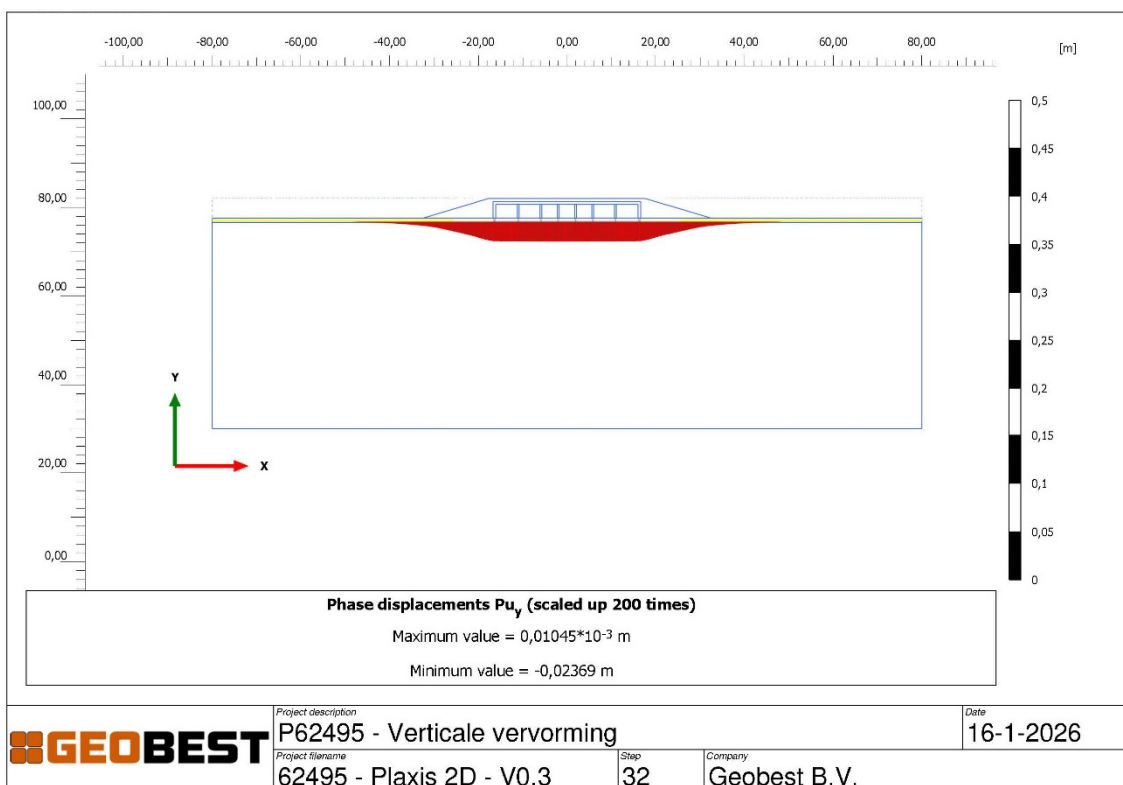
Figuur 4-7: Verticale vervorming in de eindsituatie, Pu_y , in de langsdoorsnede.

De verticale vervorming in de eindfase, in de dwarsdoorsnede, is weergegeven in Figuur 4-7.



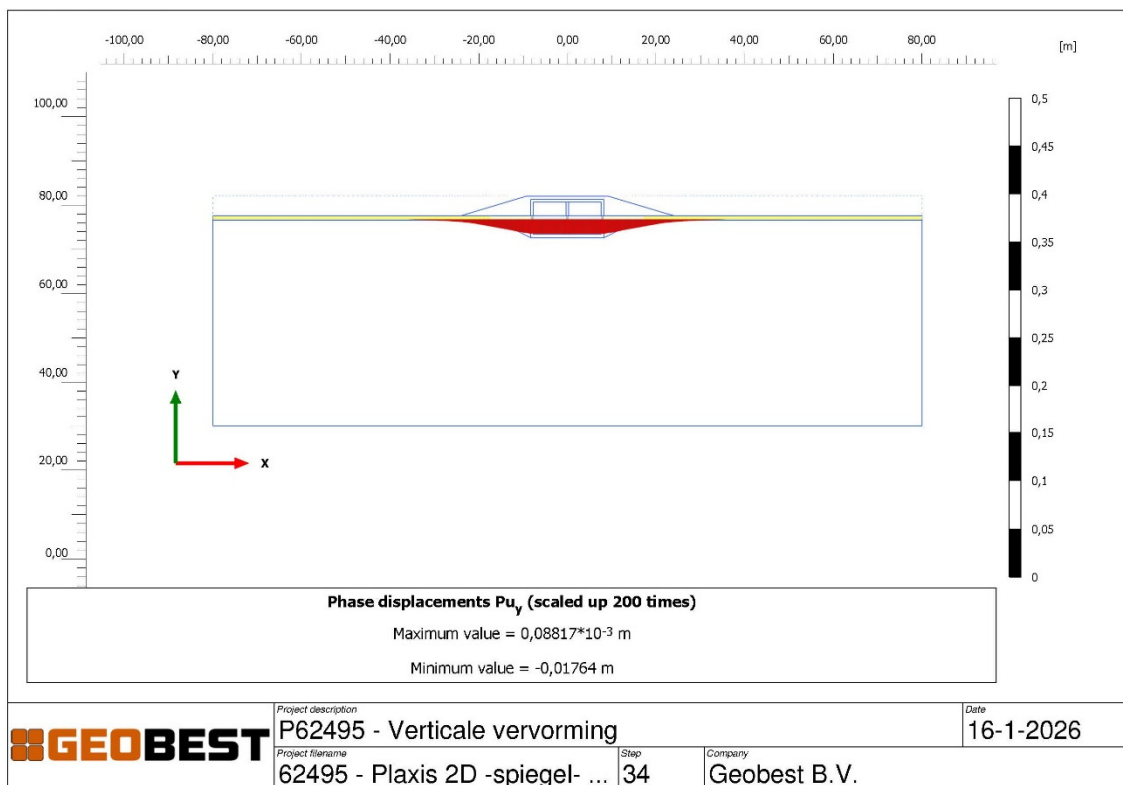
Figuur 4-8: Verticale vervorming in de eindsituatie, Pu_y , in de langsdoorsnede.

De verticale vervorming in de eindfase, in de langsdoorsnede, op het niveau maaiveld -0,50 m (NAP +77,10 m) is weergegeven in Figuur 4-9.



Figuur 4-9: Verticale vervorming in de eindsituatie, Pu_y , in de langsdoorsnede (op het niveau NAP +77,1 m, maaiveld - 0,5 m)

De verticale vervorming in de eindfase, in de dwarsdoorsnede, op het niveau maaiveld -0,50 m (NAP +77,10 m) is weergegeven in Figuur 4-10.

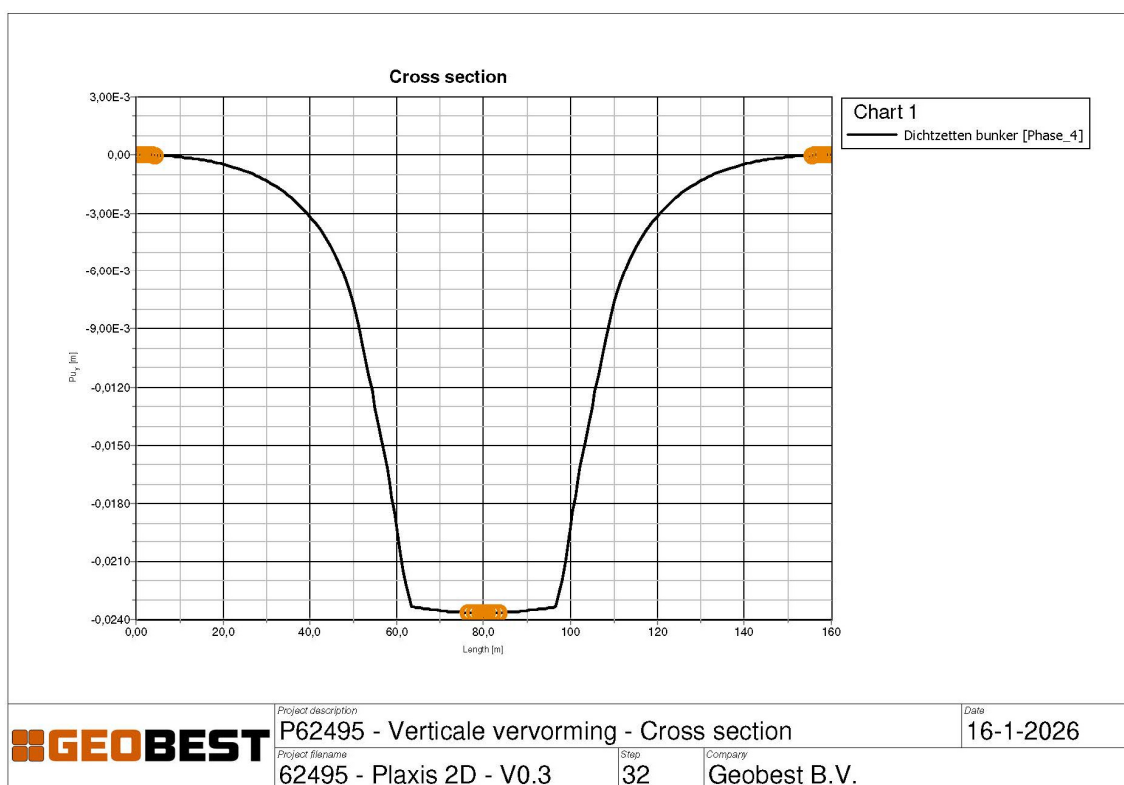


Figuur 4-10: Verticale vervorming in de eindsituatie, Pu_y , in de dwarsdoorsnede (op het niveau NAP +77,1 m, maaiveld - 0,5 m)

Het verloop van de verticale vervorming in de eindfase, in de dwarsdoorsnede, op het niveau

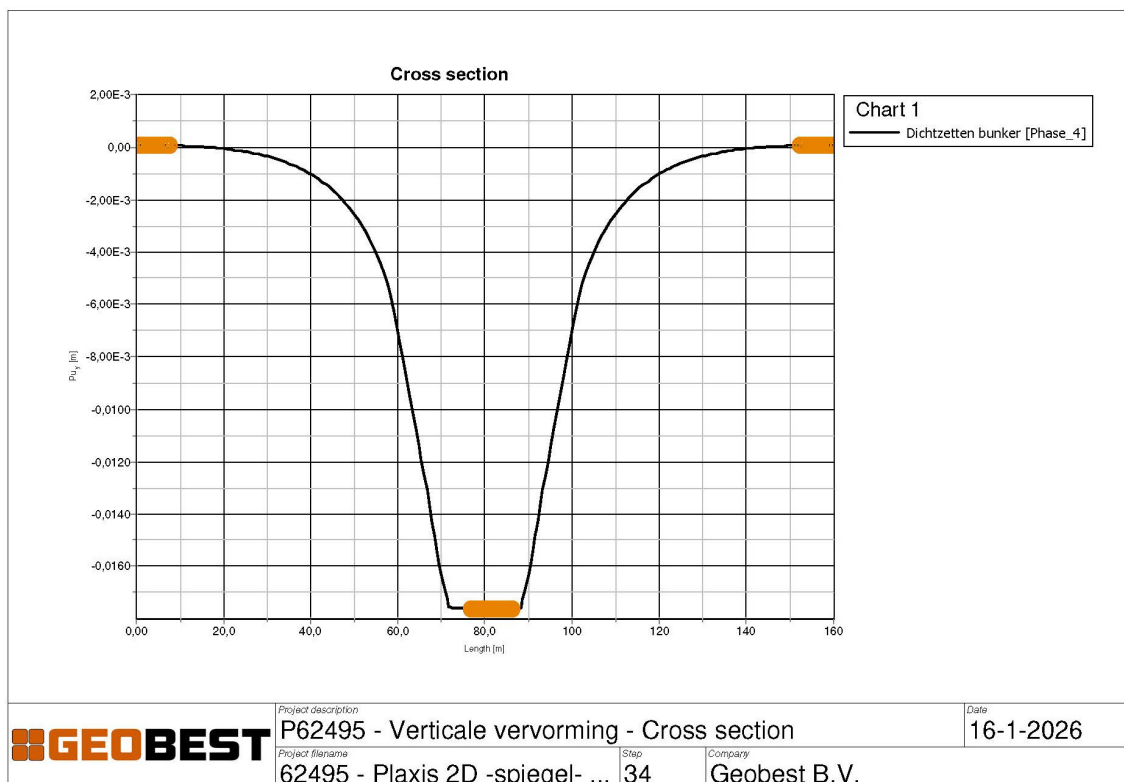


maaiveld -0,50 m (NAP +77,10 m) is weergegeven in Figuur 4-11.



Figuur 4-11: Verticale vervorming in de eindsituatie, Cross section Pu_y , in de langsdoorsnede (op het niveau NAP +77,1 m, maaiveld - 0,5 m).

Het verloop van de verticale vervorming in de eindfase, in de dwarsdoorsnede, op het niveau maaiveld -0,50 m (NAP +77,10 m) is weergegeven in Figuur 4-12.

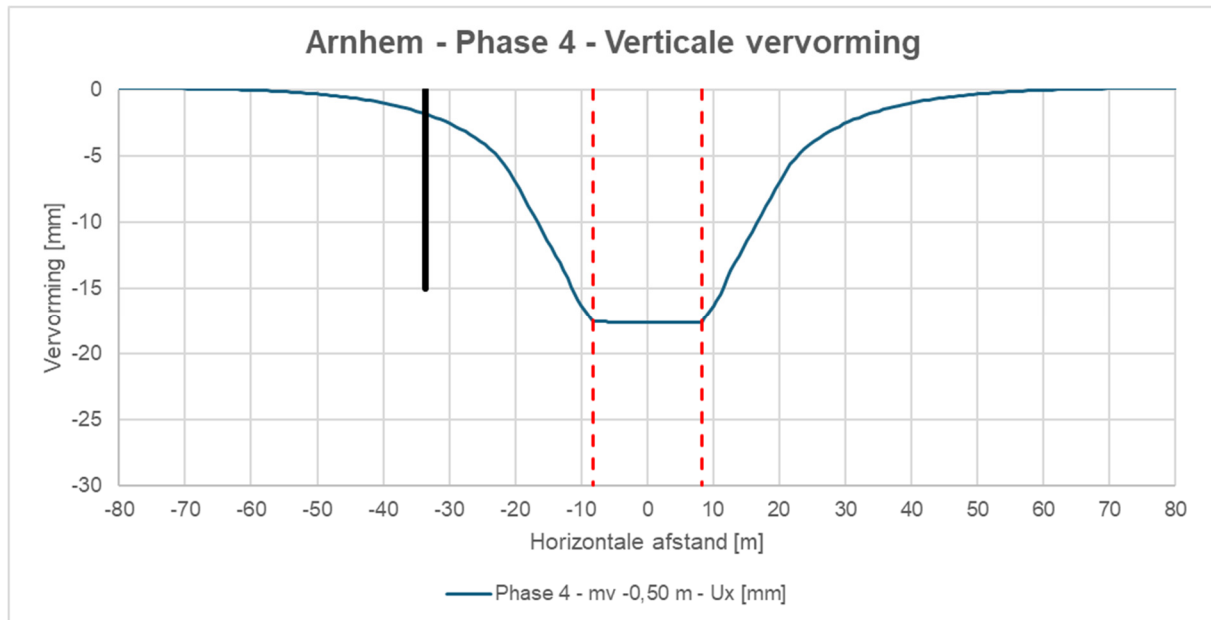


Figuur 4-12: Verticale vervorming in de eindsituatie, Cross section Pu_y , in de dwarsdoorsnede (op het niveau NAP +77,1 m, maaiveld - 0,5 m).



Het resultaat weergegeven in Figuur 4-12 is verwerkt in Microsoft Excel. Hierbij is de locatie van de bunker aangeduid met rode stippel lijnen en de bebouwing in de omgeving middels een zwarte, dikgedrukte, lijn. De bebouwing is gepositioneerd op een afstand van 25,3 m, in het Plaxis model komt dit neer op een afstand van -33,55 m.

Het resultaat is weergegeven in Figuur 4-13.



Figuur 4-13: Verticale vervorming in de eindsituatie, in de dwarsdoorsnede (op het niveau NAP +77,1 m, maaiveld - 0,5 m).

De vervorming ter plaatse van de, voorgevel van de, bebouwing bedraagt 1,9 mm. Op een afstand van -44 m, de achtergevel, bedraagt 0,7 mm, De verschil vervorming over een afstand van 10,5 m bedraagt 1,2 mm.

5 Fundering op staal

5.1 Algemeen

Gezien de bodemgesteldheid is voor dit project een fundering op staal een goede mogelijkheid. Mits de ondergrond en constructie draagkrachtig genoeg is voor de belasting(verhoging). De belasting is aangehouden op:

Belasting vanuit bunker: $33,3 \text{ m} \times 16,5 \text{ m} \times 8,7 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 = 137 \text{ MN}$

Belasting vanuit grond op dak: $33,3 \text{ m} \times 16,5 \text{ m} \times 0,7 \text{ m} \times 18 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 = 8 \text{ MN}$

Totale belasting: $137 + 8 = 145 \text{ MN}$

In de praktijk is de belasting vanuit de bunker veel langer. Dit omdat de bunker niet volledig wordt gevuld met beton en het toegepaste mengsel een lager volumiek gewicht heeft lager dan dat van beton.

5.2 Grondopbouw en parameters

Voor het bepalen van de karakteristieke geotechnische parameters is gebruikgemaakt van tabel 2b [1], correlatie met de conusweerstand en onze ervaring in deze grondslag. Er is uitgegaan van één enkele grondlaag bestaande uit zand. De parameters zijn aangegeven in Tabel 5-1.



Tabel 5-1: Geotechnische parameters.

Grondsoort [-]	b.k. Laag [m NAP]	o.k. Laag [m NAP]	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]	c_u [kPa]
Zand	+77,60	--	18,0	20,0	30,0	0,0	-

5.3 Dimensionering

Voor de berekening van de rekenwaarde van de maximale draagkracht en toetsing van de UGT type B volgens NEN9997-1 zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- het project is geplaatst in betrouwbaarheidsklasse 2 (RC2);
- het aanlegniveau van de fundering is aangenomen op circa NAP +72,60 m;
- uitgaande van een maaiveldniveau op NAP +77,6 m wordt een gronddekking van 5,0 m in rekening gebracht;
- de belasting grijpt zuiver centrisc aan op de fundering;
- er is geen sprake van horizontale of momentbelastingen;
- er is uitgegaan van een horizontaal maaiveld;
- de bunker is op een plaat gefundeerd met afmetingen van 16,5 m × 33,3 m;

5.4 Partiële factoren

De partiele materiaalfactoren voor de bepaling van de draagkracht zijn samengevat in tabel 5-2. De materiaalfactoren zijn afkomstig uit [1] Tabel A.4a – Partiële factoren voor grondrukparameters (γ_M).

Tabel 5-2: Partiele factoren voor de grondparameters, fundering op staal.

Partiële factoren, γ_M		
Grondparameter [-]		Factoren [-]
Hoek van inwendige wrijving	$\gamma_{\phi'}$	1,15
Effectieve cohesie	$\gamma_{c'}$	1,60
Ongedraineerde schuifsterkte	γ_{cu}	1,35
Prismadruksterkte	γ_{qu}	1,35
Volumiek gewicht	γ_{γ}	1,10

5.5 Verticaal draagvermogen

De draagkrachtberekeningen zijn uitgevoerd volgens de theorie van een fundering op staal conform hoofdstuk 6 van [1]. De resultaten zijn samengevat in Tabel 5-3. Gezien de vorm en afmetingen van de bunker zijn de berekeningen uitgevoerd voor de maatgevende bezwijkmechanismen. Er is binnen de invloedszone van de fundering geen ontgraving aanwezig. Daarom is geen rekening gehouden met een reductiefactor voor een helling β in de berekeningen. De berekening is uitgevoerd voor de volledige plaat van 16,5 m × 33,3 m. Daarbij is zowel een situatie met een dekking van 5,0 m als een situatie zonder dekking beschouwd.

Tabel 5-3: resultaten draagkrachtberekeningen bunker

Situatie [-]	Effectief Funderingsoppervlak		$F_{v,d}$ [MN]	Dekking [m]	Toets [-]	$\sigma'_{\text{max},d}$ [kN/m ²]	$R_{v,d}$ [MN]	U.C. [-]
	b' [m]	l' [m]						
Stramien bunker	16,5	33,3	145	5,0	Gedraineerd	2625	1.440	0,10
Stramien bunker	16,5	33,3	145	0,0	Gedraineerd	1353	743	0,20



De in- en uitvoer van de draagkrachtberekeningen zijn opgenomen in Bijlage 2. De constructieve sterkte dient te worden beoordeeld door de constructeur.

6 Conclusie

Uit de Plaxis 2D berekening volgt dat de vervormingen die optreden als gevolg van het vullen van de bunker met beton maximaal 18 tot 24 mm bedragen. Op circa 25 m afstand van de bunker, waar zich de eerste bebouwing in de omgeving bevindt, bedragen de vervormingen op 0,5 m onder maaiveldniveau circa 1,9 mm.

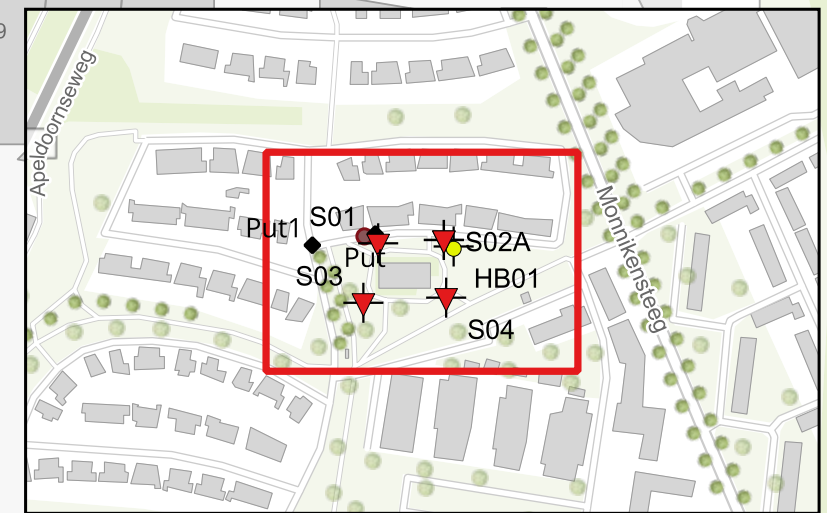
Uit de berekeningen van het verticale draagvermogen volgt dat bij een plaatafmeting van 16,5 m × 33,3 m en een dekking van 5,0 m een draagvermogen van circa 1.440 MN wordt berekend. Zonder dekking wordt een draagvermogen van circa 743 MN berekend.



Bijlage 1

Grondonderzoek

[illegible]



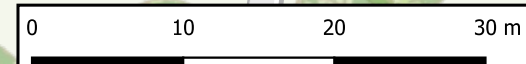
Legenda

 Sondering

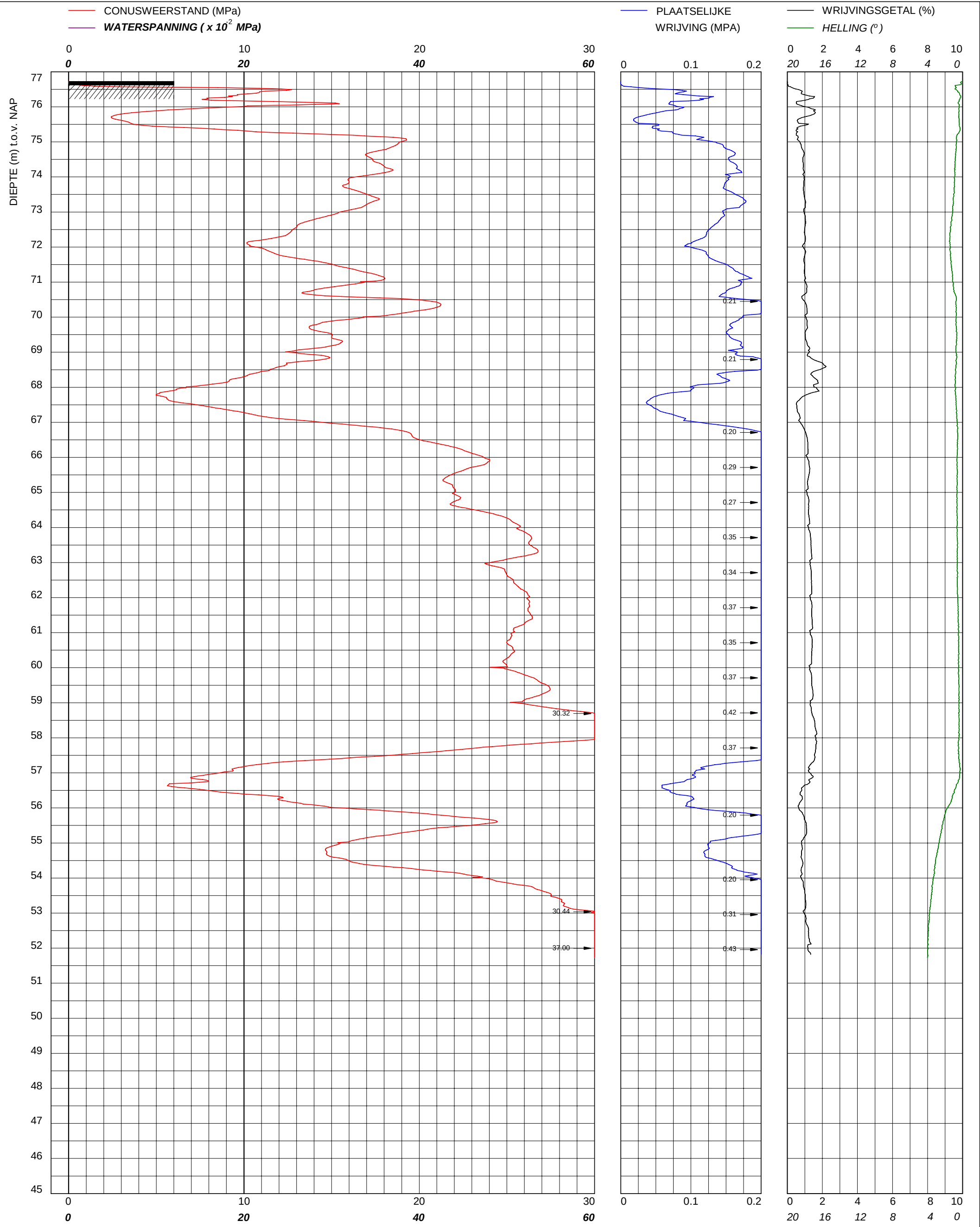
 Handboring

- ◆ Put

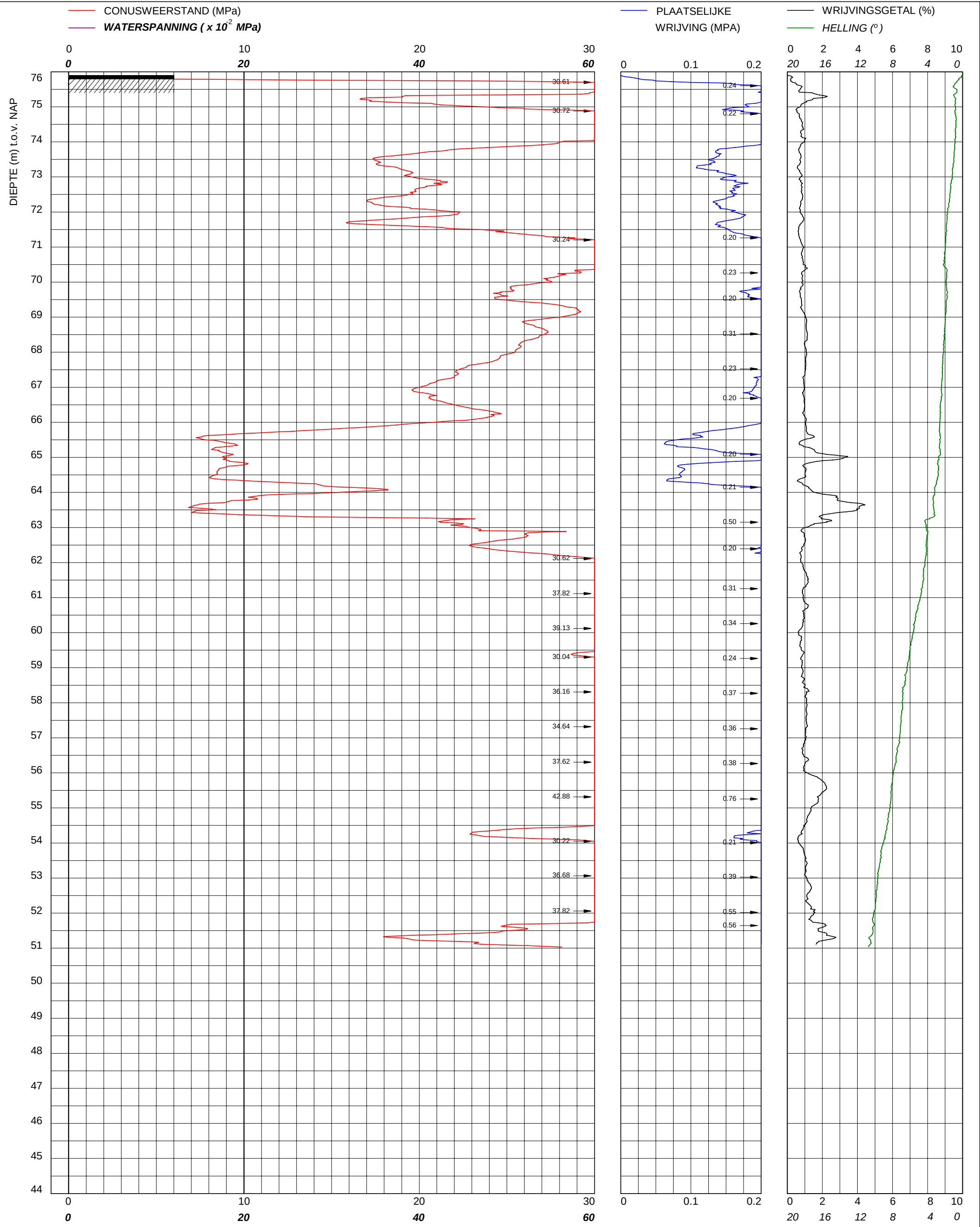
- Weg



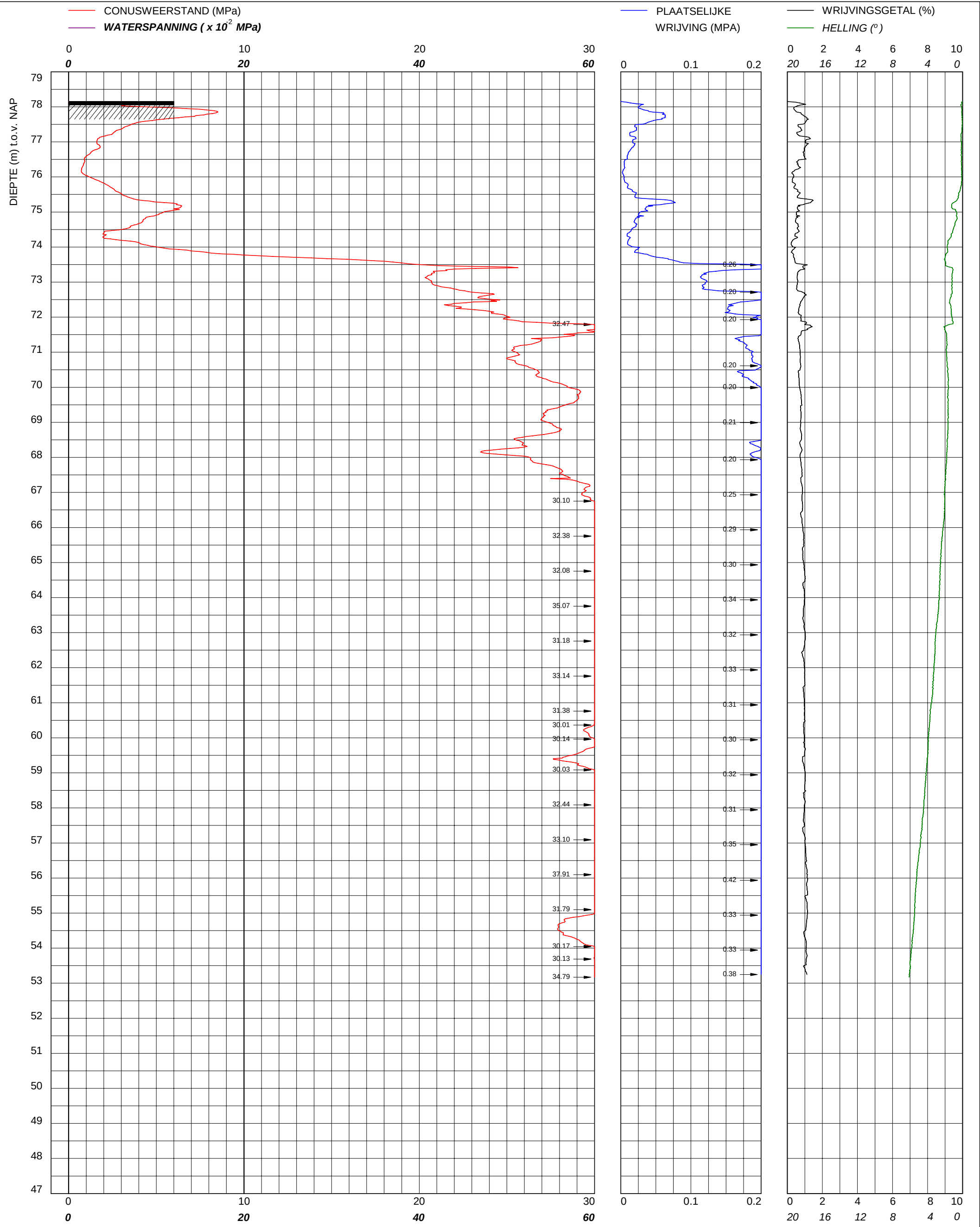
Plaats:	Arnhem
Projectomschrijving:	R Pontonniers
Projectnummer:	COP.02585.03.18
Datum:	03-11-2025
Versie:	01

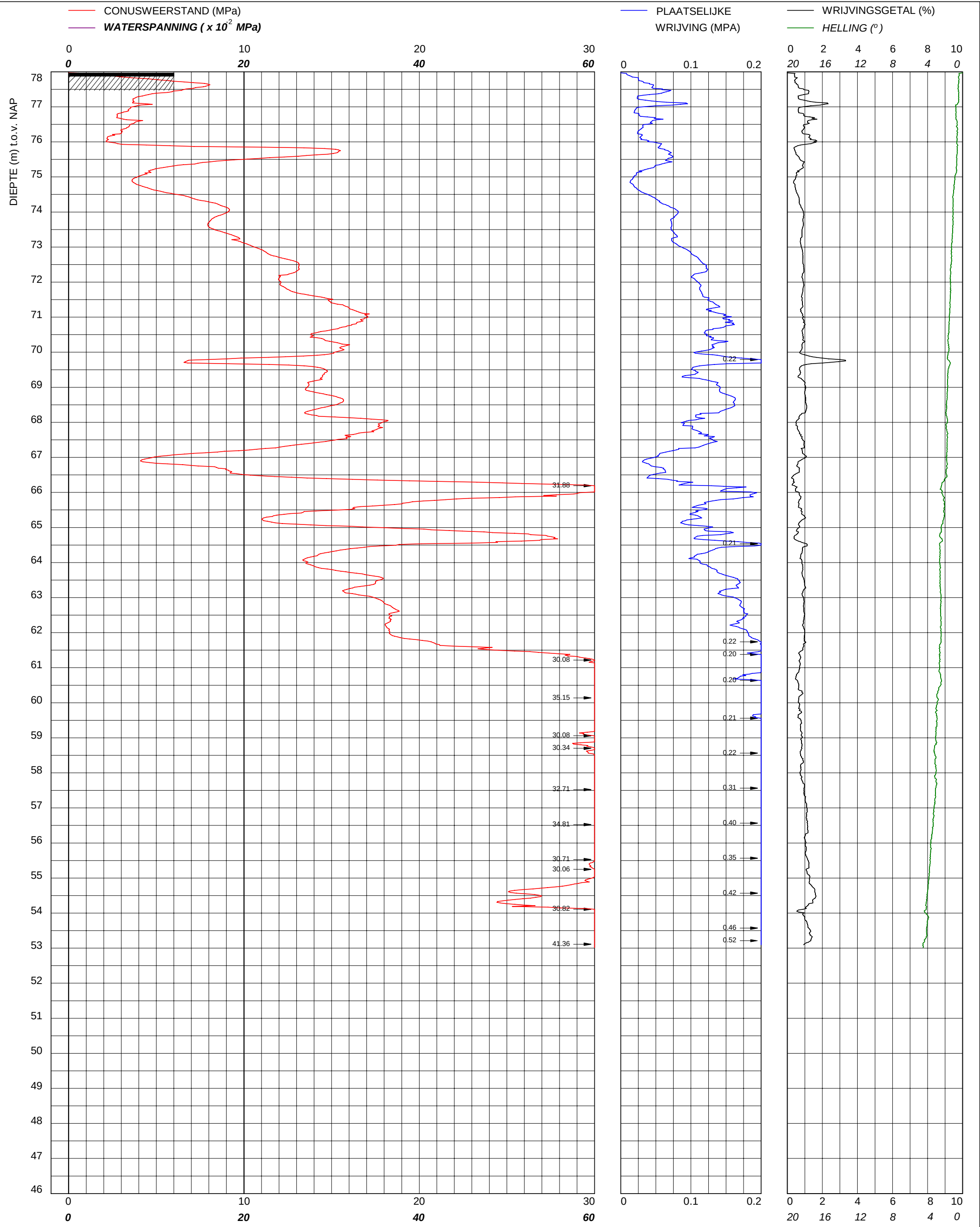


bam infra BAM Infraconsult bv © copyright Toetsenbordweg 11 1033 MZ AMSTERDAM Telefoon (020) 410 85 43 Email info.infra@bam.com	Sondering TE1 volgens NEN-EN-22476, klasse 2 Conus: 240319, Ac: 1.500 mm2		MV	76.73 m NAP	X	192002.65	Opdrachtnummer :
	Geobest B.V. Regiment Pontonniers te Arnhem	Km		Y	446281.63	02585.03.18	
		Uitvoeringsdatum		3-11-2025		Locatiecode :	
		Printdatum		3-11-2025		S01	



 infra BAM Infraconsult bv © copyright Toetsenbordweg 11 1033 MZ AMSTERDAM Telefoon (020) 410 85 43 Email info.infra@bam.com	Sondering TE1 volgens NEN-EN-22476, klasse 2 Conus: 240319, Ac: 1.500 mm2	MV	75.9 m NAP	X	192046.17	Opdrachtnummer :
	Geobest B.V. Regiment Pontonniers te Arnhem	Km		Y	446283.84	02585.03.18
		Uitvoeringsdatum		3-11-2025		Locatiecode :
		Printdatum		3-11-2025		
						S02

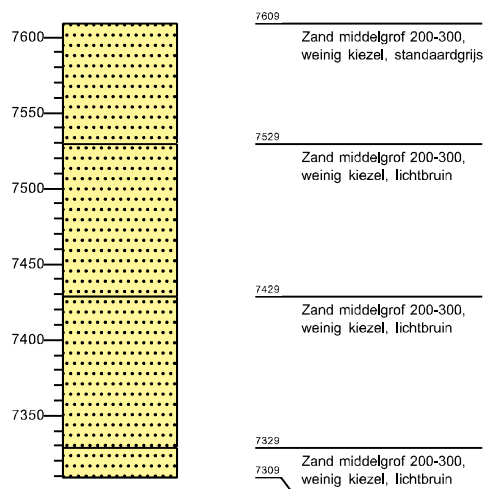




bam infra BAM Infraconsult bv © copyright Toetsenbordweg 11 1033 MZ AMSTERDAM Telefoon (020) 410 85 43 Email info.infra@bam.com	Sondering TE1 volgens NEN-EN-22476, klasse 2 Conus: 240319, Ac: 1.500 mm2	MV	77.97 m NAP	X	192047.68	Opdrachtnummer :
	Geobest B.V. Regiment Pontonniers te Arnhem	Km		Y	446245.64	02585.03.18
		Uitvoeringsdatum		3-11-2025		Locatiecode :
		Printdatum		3-11-2025		S04

Boring: HB01

Datum: 3-11-2025
X: 192052,64
Y: 446279,53



BAM Infraconsult bv
Toetsenbordweg 11
1033 MZ Amsterdam
Telefoon (020) 410 85 43
Email info.infra@bam.com

Projectnaam: Regiment Pontonnierste Amhem

Opdrachtgever: Geobest B.V.

Projectcode: 02585.03.18

Boormeester: Yuri Reints

Projectleider: Jeroen Slaghuis

Pagina: 1 / 1 Conform NEN-EN-ISO 14688-1



Bijlage 2 Draagkrachtberekening

FUNDERINGEN OP STAAL, GEDRAINEERD

13 november 2025

			Partiële factoren			
			Rekenwaarden			
Mv.hoogte	[NAP + m]	77.60	$\gamma_{m,\gamma}$ =	1.10	Overstaande rechthoekszijde	[m]
Fund.niveau	[NAP + m]	72.60	$\gamma_{m,\varphi}$ =	1.15	Aanliggende rechthoekszijde	[m]
					Schuine zijde	[m]
Gw.stand	[NAP + m]	35.00	$\gamma_{m,c}$ =	1.60	Hoek van het maaiveld	[°]

KARAKTERISTIEKE GRONDEIGENSCHAPPEN						
b.k. laag [NAP + m]	o.k. laag [NAP + m]	laagdikte [m]	γ_k [kN/m ³]	$\gamma_{sat,k}$ [kN/m ³]	ϕ'_k [°]	c'_k [kN/m ²]
77.60	72.60	5.00	18.0	20.0		
72.60	70.00	2.60	18.0	20.0	30.0	0.0
70.00	65.00	5.00	18.0	20.0	30.0	0.0
65.00	60.00	5.00	18.0	20.0	30.0	0.0
60.00	50.00	10.00	18.0	20.0	30.0	0.0
50.00	45.00	5.00	18.0	20.0	30.0	0.0
45.00	35.00	10.00	18.0	20.0	30.0	0.0
35.00	30.00	5.00	18.0	20.0	30.0	0.0
30.00			18.0	20.0	30.0	0.0

REKENWAARDEN GRONDEIGENSCH.				
γ_d [kN/m³]	$\gamma_{sat,d}$ [kN/m³]	$\sigma'_{v,z,d}$ [kN/m²]	ϕ'_d [°]	c'_d [kN/m²]
16.36		81.82		
16.36		124.36	26.66	0.00
16.36		206.18	26.66	0.00
16.36		288.00	26.66	0.00
16.36		451.64	26.66	0.00
16.36		533.45	26.66	0.00
16.36	18.18	697.09	26.66	0.00
	18.18	738.00	26.66	0.00
	18.18		26.66	0.00

H_d	0.00	[kN]	Hoek belasting	15.00	[°]
V_d	145000	[kN]			

[illegible]