

STABILITEIT PILAREN EN AARDPIJPEN TRICHTERGROEVE

GeoControl rapport M01824

In opdracht van: Thermae 2000 BV

MAASTRICHT, AUGUSTUS 2018

STABILITEIT PILAREN EN AARDPIJPEN TRICHTERGROEVE

GeoControl rapport M01824

In opdracht van: Thermae 2000 BV

Datum: Augustus 2018

Auteur: Dr. R.F. Bekendam

Monsternamen en opwaartse boringen: Kleijnen Mergelbouwsteen BV

Druktesten mergel: SGS INTRON

Veldwerk in de groeve: Dr. R.F. Bekendam

GeoControl

Meidoorn 93, 6226 WG Maastricht

Tel.: 043-3628523, Fax: 043-3628524

E-mail: geocontrol@planet.nl

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
2. INVOERGEGEVENS	2
2.1 Plattegrond gangenstelsel	2
2.2 NAP-hoogte van het groevedak	2
2.3 Samenstelling van de bedekking van de groeve	2
2.4 De éénassige druksterkte (UCS) van de mergel	3
2.5 Diaklazen	3
3. METHODE VAN PILAAR-STABILITEITSBEREKENING	4
3.1 Individuele pilaarstabiliteit	4
3.2 Grootschalige pilaarstabiliteit en algemene mijnstabiliteit	6
4. RESULTATEN VAN DE PILAARSTABILITEITSBEREKENING	9
4.1 Drukschade van de pilaren	9
4.2 Veiligheidsfactoren	9
4.3 Boogwerking door de mergelbedekking	9
5 STABILITEIT VAN AARDPIJPEN	10
5.1 Overzicht	10
5.2 Diameter en locatie van de aardpijp ten opzichte de pilaren, en breedte van de aansnijding	10
5.3 Eigenschappen van de vulling van de aardpijp	10
5.4 Leegstroming van aardpijpen	11
5.5 Opvang van aardpijpen	11
5.6 Leegstroomgevaar en positie van de aardpijp ten opzichte van bebouwing en wegen	11
5.7 Mogelijke nu niet bereikbare aardpijpen	12
5.8 Spanningen in aardpijpen	13
5.9 Stabiliteit dakconstructies	13
6. GERAADPLEEGDE LITERATUUR	16

BIJLAGEN

Bijlage 1. Plattegrond met aardpijpen, boringen en monsterlocaties

Bijlage 2. Plattegrond met pilaarklassen en tributary areas

Bijlage 3. Plattegrond Trichtergroeve ten opzichte van infrastructuur

Bijlage 4. Overzicht boringen

Bijlage 5. Overzicht drukproeven

Bijlage 6. Stabiliteitsanalyse pilaren

Bijlage 7. Boogwerking mergelbedekking

Bijlage 8. Aardpijpen

Bijlage 9. Verticale en horizontale spanningen in aardpijpen

Bijlage 10. Spanningen in aardpijpen

Bijlage 11. Analyserapport SGS Intron, druksterkte mergel

Bijlage 12. Rapportage opwaartse boringen Kleijnen Mergelbouwsteen BV

1. INLEIDING

Dit rapport is opgesteld in opdracht van Thermae 2000 BV overeenkomstig de GeoControl offerte M01804 d.d. 4 april 2018 en de opdrachtverlening op 10 april 2018 per mail.

Thermae 2000 overweegt de Trichtergrøeve in te richten voor wellness activiteiten. In [1] en [2] is al geconcludeerd dat de huidige grootschalige pilaarstabieliteit van dit gangenstelsel, voor zover toen toegankelijk, voldoende is. Omdat de grøeve vloer begin 2018 deels is uitgediept (door puin en losse mergel te verwijderen) en omdat gangen in de toekomst mogelijk worden verbreed voor de inrichting van een sauna en dergelijke, is het noodzakelijk de huidige pilaarstabieliteit nauwkeurig te berekenen. Bij eventuele aanpassingen van de pilaren en gangen kan het effect daarvan op de pilaarstabieliteit dan worden berekend. Voor dit onderzoek was het noodzakelijk de dimensies van het gangenstelsel en de NAP-hoogtes van dak en vloer nauwkeurig te meten. Ook zijn de druksterkte van de mergel en de dikte van de mergelbedekking bepaald. Verder waren in 2017 verscheidene gedeeltes van de grøeve niet toegankelijk en konden daardoor aardpijpen niet overal worden gedetecteerd. De inventarisatie van aardpijpen is in dit onderzoek alsnog uitgevoerd.

Medio april 2018 zijn opwaartse boringen verricht ter bepaling van de dikte van de mergelbedekking en zijn monsters genomen om de druksterkte van de mergel te bepalen. Na het beschikbaar komen van de plattegrond van de grøeve op 23 juli 2018 zijn de overige veldgegevens verzameld op 25 en 26 juli 2018.

De benaming “mergel” is strikt genomen niet correct, omdat het om een vrijwel pure kalksteen gaat, terwijl mergel strikt genomen een mengsel is van kalk en klei. Omdat de benaming “mergel” zo is ingeburgerd, wordt deze ook in dit rapport aangehouden.

In Hoofdstuk 2 worden de invoergegevens voor de stabiliteitsanalyse op een rijtje gezet. In Hoofdstuk 3 wordt de methode van de berekeningen van de pilaarstabieliteit behandeld, welke wordt toegepast in Hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 5 wordt de stabiliteit van de aardpijpen behandeld.

Conclusies en aanbevelingen zijn onderstreept.

2. INVOERGEGEVENS

2.1 Plattegrond gangenstelsel

Het gangenstelsel van de Trichtergroeven is nauwkeurig opgemeten door Royal Haskoning [8-13]. De plattegrond is aanzienlijk nauwkeuriger en gedetailleerder dan de in [1] en [2] gebruikte oude versies. Op door mergelpuin moeilijk bereikbare plaatsen zijn door Royal Haskoning de gangen niet opnieuw opgemeten. Hier zijn op 25-26 juli de gangcontouren schetsmatig ingetekend, met een onnauwkeurigheid tot 2 m (Bijlage 1). De plattegrond is georeferentieerd. De coördinaten zijn aangegeven op Bijlagen 1-3, en op Bijlage 3 is de positie van het gangenstelsel ten opzichte van de infrastructuur van Thermae 2000 ingetekend.

2.2 NAP-hoogte van het groevedak

Uit [8-13] zijn de NAP-hoogtes van het groevedak te destilleren. De NAP-hoogte neemt af van ca. 97.3 m nabij de ingang in het oosten tot ca. 95.5 m in het westen van de Trichtergrubbe.

2.3 Samenstelling van de bedekking van de groeven

In [2] wordt de NAP-hoogte van de top van het mergelpakket op 100 m geschat. Deze schatting is mede gebaseerd op boringen B62A0428 en B62A0384 ter plaatse van Thermae 2000, op enige afstand van de Trichtergroeven. Om meer zekerheid te krijgen zijn medio april 2018 zes opwaartse boringen tot maximaal 5 m boven het groevedak verricht [10, Bijlage 12]. De locaties zijn aangegeven op Bijlage 1. In geen van de zes boringen is grond aangeboord. De mergelbedekking is dus in alle zes gevallen meer dan 5 m dik (Bijlage 4). De NAP-hoogte van de top van het mergelpakket is dus groter dan 100 m.

Uit de samenstelling van de in de groeven aangetroffen aardpijpen blijkt dat de mergel wordt bedekt door zanden van de Formatie van Tongeren. Daarboven liggen waarschijnlijk nog een loess-laag en/of hellingafzettingen van onbekende dikte.

2.4 De éénassige druksterkte (UCS) van de mergel

Op 3 locaties zijn blokmonsters genomen uit de mergelwand. De locaties zijn aangegeven op Bijlage 1 en de resultaten (Bijlage 11) zijn samengevat in Bijlage 5. Uit ieder blokmonster zijn 3 cilindrische kernen van ca. 100 mm hoogte en ca. 50 mm diameter geboord, waarvan de UCS (éénassige druksterkte) is bepaald. De waardes lopen niet ver uiteen, met uitzondering van proefstuk 1 uit blokmonster 1. Dit proefstuk heeft een druksterkte van 4.5 MPa, meer dan twee maal de standaarddeviatie boven het gemiddelde. Daarom is proefstuk 1 niet meegenomen in het uiteindelijke gemiddelde, dat 3.23 MPa bedraagt met een standaard deviatie van 0.42 MPa.

2.5 Diaklazen

In de Trichtergrøeve komen geen belangrijke diaklazen voor die de pilaarstabieliteit significant negatief kunnen beïnvloeden.

3. METHODE VAN PILAAR-STABILITEITSBEREKENING

Dit hoofdstuk geeft een korte samenvatting van de methode van pilaar-stabiliteitsberekening, die is gebaseerd op [3] en [4] en een tiental onderzoeksprojecten die in de daarop volgende jaren zijn uitgevoerd. Deze methode maakt gebruik van moderne geomechanische concepten, die verder zijn ontwikkeld en toepasbaar gemaakt voor de ondergrondse mergelgroeves van Limburg.

3.1 Individuele pilaarstabieliteit

De stabieliteit van iedere afzonderlijke pilaar wordt uitgedrukt in een veiligheidsfactor SF. Deze is gelijk aan de verhouding van de pilaarsterkte S_p en de gemiddelde verticale spanning S , die door het bovenliggende gesteente/grond pakket op de pilaar wordt uitgeoefend. De pilaarsterkte is de maximale verticale spanning die de pilaar kan verdragen zonder te bezwijken, dat wil zeggen zonder macroscopische barstvorming. Pilaarspanning wordt hier gedefinieerd als de gemiddelde verticale kracht per eenheid van horizontaal pilaaroppervlak, uitgedrukt in N/m^2 (Newton per vierkante meter) of Pa (Pascal). De veiligheidsfactor van een individuele pilaar is dus:

$$SF = \frac{S_p}{S}$$

Een SF waarde van 1 komt overeen met een kritische situatie. Alleen SF waarden van ruim boven 1 zijn acceptabel. Praktijkervaring wijst uit dat een veilige waarde boven 1.5 tot 2 ligt. Hierbij is ook de mogelijke lange-termijn verzwakking van de pilaren ten gevolge van kruip verdisconteerd.

De pilaarspanning S wordt berekend met de tributary area-methode. Hierbij wordt het gewicht beschouwd van de gesteente- en grondlagen boven de pilaar en een deel van de gangen die de pilaar begrenzen. Omdat bij de tributary area-methode geen rekening wordt gehouden met de boogwerking en beschermende stijfheid van het mergeldak, is de op deze manier verkregen waarde van S in het algemeen iets hoger dan in werkelijkheid.

Aldus is S gelijk aan:

$$S = S_{ov} * \frac{A_t}{A_p}$$

Hierbij is $S_{ov} = \sum \gamma_i h_i$ de overburden spanning, waarbij γ_i en h_i de unit weights en diktes van de opeenvolgende deklagen i voorstellen. Verder is A_t de tributary area en A_p het horizontale oppervlak van de pilaar.

De pilaarsterkte S_p wordt als volgt geformuleerd:

$$S_p = UCS * N_{vorm}$$

waarbij UCS de éénassige druksterkte van de mergel is, bepaald op een cilindrische kern.

N_{vorm} is een vormfactor, die de invloed van de pilaarvorm op de druksterkte beschrijft. Een schaalfactor, die de invloed van de pilaargrootte op de druksterkte beschrijft, bleek niet nodig te zijn [2]. Voor intacte mergel pilaren (klasse 0 en 1) is afgeleid dat:

$$N_{vorm,0} = 0.875 + A_p / C H$$

waarbij C en H respectievelijk de horizontale omtrek en hoogte van de pilaar voorstellen. De met $N_{vorm,0}$ bepaalde pilaarsterkte wordt $S_{p,0}$ genoemd en betreft de korte termijn. Het gaat hier om de sterkte van intacte pilaren kort nadat deze zijn ontstaan. De hieruit resulterende veiligheidsfactor wordt SF_0 genoemd.

Ook bezweken pilaren (klasse 2-6) hebben nog een zekere sterkte, de zogenaamde residuele sterkte $S_{p,r}$. De vormfactor voor de residuele sterkte is gelijk aan:

$$N_{vorm,r} = 0.118 + 1.40 A_p / C H$$

De residuele pilaarsterkte en -veiligheidsfactor krijgen respectievelijk de symbolen $S_{p,r}$ en SF_r . Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de huidige pilaarsterkte gelijk is aan $S_{p,0}$ of $S_{p,r}$, afhankelijk van het al of niet bezweken zijn van de pilaar. De huidige pilaarsterkte en –

veiligheidsfactor $S_{p,act}$ en SF_{act} worden bepaald door voor op dit moment (vrijwel) intacte pilaren (klasse 0 en 1; zie Sectie 2.4) de waarden voor intacte pilaren te hanteren, en voor bezweken pilaren (klasse 2 en hoger) de waarden voor pilaren met een residuele sterkte:

$$\text{Pilaarklasse 0,1: } N_{vorm,act} = N_{vorm,0} = 0.875 + A_p / C H$$

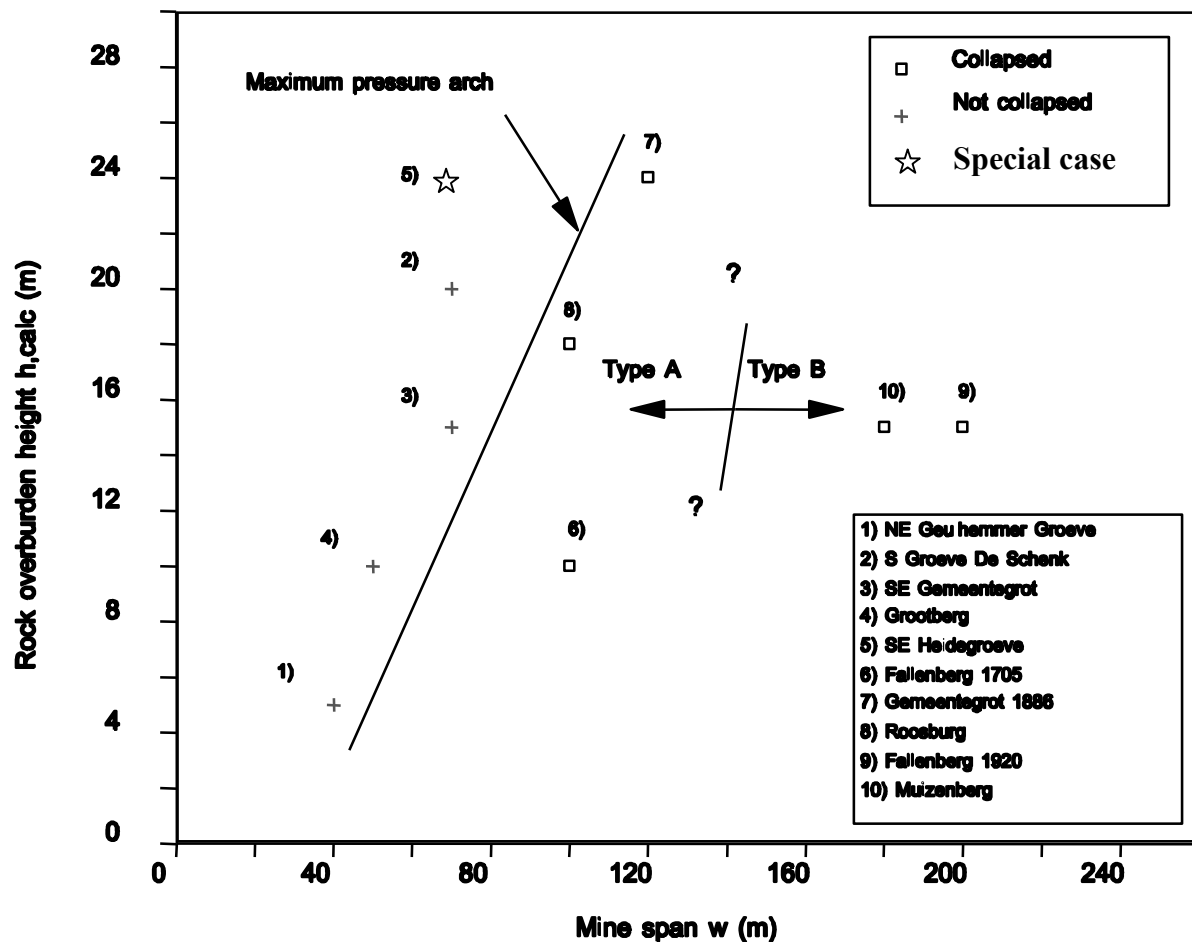
$$\text{Pilaarklasse 2-6: } N_{vorm,act} = N_{vorm,r} = 0.118 + 1.40 A_p / C H$$

3.2 Grootschalige pilaarstabiliteit en algemene mijnstabiliteit

Een grootschalige instorting van een gangenstelsel begint met de instabiliteit van individuele pilaren. Echter, om de mogelijkheid van een grootschalige instorting vast te stellen, zijn de grootschalige pilaarstabiliteit en de algemene mijnstabiliteit bepalend.

Onder de grootschalige pilaarstabiliteit wordt verstaan: de capaciteit van alle pilaren in het betreffende gebied samen om de gesteente- en grondlagen boven dit gebied te ondersteunen. Deze wordt, net als de individuele pilaarstabiliteit, uitgedrukt in een veiligheidsfactor, waarbij hier de totale draagkracht van de pilaren samen (uitgedrukt in N) wordt gedeeld door de totale kracht van de bovenliggende lagen die op die pilaren wordt uitgeoefend. Hierbij is $SF_{tot,0}$ de totale oorspronkelijke veiligheidsfactor en $SF_{tot,act}$ de totale actuele veiligheidsfactor.

Voor $SF_{tot,act}$ wordt een waarde van meer dan 2 als volstrekt voldoende beschouwd, ook op de lange termijn. Hierbij is verzwakking ten gevolge van kruip verdisconteerd. De kans op een grootschalige instorting is dan zeer klein. Een waarde van $SF_{tot,act}$ van minder dan 1.5 wordt zonder meer als onvoldoende beschouwd. Een waarde tussen de 1.5 en 2 correspondeert met een twijfelachtige grootschalige pilaarstabiliteit. Van groot belang is dat een gangenstelsel in voldoende deelgebieden wordt opgesplitst, zodat potentiële instortingsgebieden niet gemaskeerd worden door een voldoende $SF_{tot,act}$ waarde voor de gehele groeve.



Bij een onvoldoende grootschalige pilaarstabieliteit moet de algemene mijnstabieliteit worden beschouwd: als het bezwijken van pilaren op grote schaal plaats vindt, zijn de daklagen van mergel dan sterk en stijf genoeg om desalniettemin een grootschalige instorting te voorkomen? Het gaat er hierbij om of de daklagen de verticale druk kunnen afbuigen naar de massieve mergel buiten het gangenstelsel door middel van een zogenaamde spanningsboog. De kans hierop neemt toe bij een toenemende totale dikte van het mergeldak en bij een afnemende totale overspanning van het gangenstelsel (zie bovenstaand figuur uit [4]). Alle datapunten uit dit figuur komen overeen met gangenstelsels, of delen daarvan, waarvan de meeste pilaren zijn bezweken. Het linker bovengedeelte van het diagram bevat gevallen waar geen grootschalige instorting heeft plaats gevonden (met uitzondering van het speciale geval van de Heidegroeve), terwijl rechtsonder alleen ingestorte groeves zijn aan te treffen. De Heidegroeve is een speciaal geval omdat deze is ingestort ten gevolge van die van een onderliggend gangenstelsel. Bij benadering kan een scheidslijn tussen deze twee gebieden worden getrokken, die overeenkomt met de maximale spanningsboog voor een bepaalde dikte van het mergeldak. De algemene mijnstabieliteit van een gangenstelsel is dus voldoende

wanneer de dikte van het mergeldak en de totale overspanning zodanig zijn, dat het betreffende datapunt duidelijk linksboven de lijn van de maximale spanningsboog ligt. Overigens zijn de pilaargeometrie, de aanwezigheid van breuken e.d. en de dikte van de grondlagen, afgezet boven op de mergel, niet beschouwd. Dit figuur moet dus met enige voorzichtigheid worden beschouwd.

4. RESULTATEN VAN DE PILAARSTABILITEITSBEREKENING

4.1 Drukschade van de pilaren

De pilaren met nummers en hun tributary areas zijn weergegeven in Bijlage 2. Waar nodig zijn pilaren verdeeld in subpilaren. Ook de pilaarklassen zijn aangegeven in deze bijlage. De meerderheid van de pilaren is vertoont niet of nauwelijks pilaardrukschade (klasse 0-1). Alleen subpilaar 10 en pilaar 12 hebben lichte drukschade (klasse 2), die waarschijnlijk grotendeels het gevolg is van de verzwakking door aardpijpen.

4.2 Veiligheidsfactoren

De resultaten van de stabiliteitsanalyse zijn weergegeven in de tabel van Bijlage 6. De actuele veiligheidsfactoren SF_{act} zijn voor alle pilaren groter dan 2 en dus voldoende, in overeenkomst met de waargenomen afwezigheid van significante drukschade.

De actuele totale veiligheidsfactor $SF_{tot,act}$ is 14.61 en dus ruim voldoende. Het is duidelijk dat het totale dragende vermogen van de pilaren ruim voldoende is.

4.3 Boogwerking door de mergelbedekking

De boogwerking is, met een mergeldak van minimaal 5 m dikte en een overspanning van 25 m, ruim voldoende (Bijlage 7). De kans op een grootschalige pilaarinstorting is in ieder geval in de komende 5 jaar zeer gering. Een visuele inspectie van de pilaardrukschade eens in de 5 jaar is voldoende. Dit betekent dat de volgende inspectie voor augustus 2023 dient plaats te vinden.

5 STABILITEIT VAN AARDPIJPEN

5.1 Overzicht

In de Trichtergroeve komen 30 aardpijpen voor. Bijlage 8 geeft een overzicht van de inventarisatie. De locaties zijn weergegeven in Bijlagen 1 en 3.

Van iedere aardpijp is aangegeven of deze door het groevedak of door een pilaarwand is aangesneden. Het onderscheid is van belang omdat aardpijpen in het groevedak gewoonlijk vaker leegstromen dan aardpijpen in de pilaarwand.

5.2 Diameter en locatie van de aardpijp ten opzichte de pilaren, en breedte van de aansnijding

De kolom “Diameter” geeft de diameter van de aardpijp aan. Voor aardpijpen in het dak is deze waarde de werkelijke diameter, voor aardpijpen in de pilaarwand kan slechts een minimale waarde worden geschat omdat de aardpijp doorgaans maar slechts voor een deel zichtbaar is. Voor laatstgenoemde aardpijpen zijn ook de breedte en hoogte (in die volgorde) van de aansnijding aangegeven in de kolom “Breedte opening”. Voor aardpijpen in pilaren is deze parameter van belang met betrekking tot het gevaar voor het leegstromen van de aardpijp. Sommige aardpijpen in het groevedak hebben een grillige, en niet cirkelvormige of ovale, aansnijding. De dimensies zijn dan weergegeven in de kolom “diameter”.

5.3 Eigenschappen van de vulling van de aardpijp

Alle aardpijpen zijn gevuld met de kleiige zanden van de Formatie van Tongeren met een grote cohesie. Een “lage” cohesie betekent dat het materiaal bij de geringste beroering uit de aardpijp naar beneden valt. Een “hoge” cohesie geeft aan dat alleen met enige kracht kleine hoeveelheden grond uit de aardpijp kunnen worden losgemaakt.

5.4 Leegstroming van aardpijpen

In de kolom “Opmerkingen” is vermeld of de aardpijp deels is leeggelopen. Bij 4 aardpijpen is dit het geval. Er is daar ruimte tussen de in de gang gestroomde grond en de aardpijp, waardoor de aardpijp nog verder leeg kan stromen. Boven het niveau van het groevedak heeft zich, al of niet tijdelijk, een koepel gevormd. Opvang van de aardpijp kan bodemdaling aan het maaiveld nog voorkomen, maar wordt gecompliceerder met de hoogte van de koepel ten opzichte van het groevedak. In alle 4 gevallen is sprake van type d (Fig. 5.1).

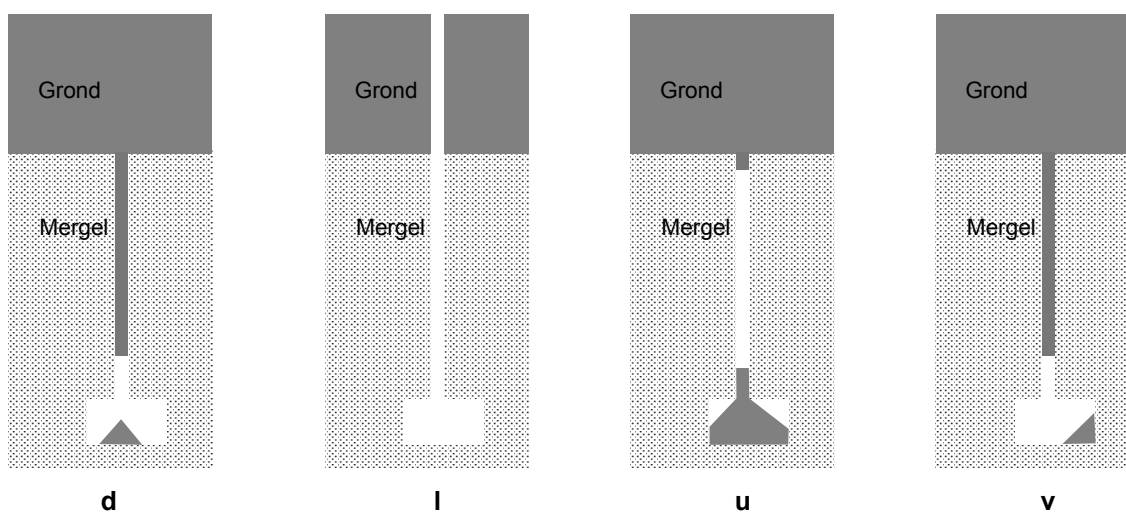


Fig. 5.1 Typen leeggelopen aardpijpen

5.5 Opvanging aardpijpen

Eén aardpijp (nr. 4) is afdoende opgevangen door metselwerk.

5.6 Leegstroomgevaar en positie van de aardpijp ten opzichte van bebouwing en wegen

Op basis van de diameter van de aardpijp, de breedte van de aansnijding, de cohesie en het al of niet leeggestroomd zijn is het leegstroomgevaar geschat (kolom “Gevaar leegloop”). De hierbij gehanteerde classificatie is weergegeven in Tabel 5.1. Verder is voor iedere aardpijp onderzocht of deze binnen een straal van 10 m van infrastructuur van Thermae 2000 aan het maaiveld ligt. Dit bleek bij aardpijpen 11 t/m 17 het geval (zie ook Bijlage 3). De overige

aardpijpen kunnen bij leeglopen een sinkhole aan het maaiveld veroorzaken, maar liggen te ver af van de in Bijlage 3 aangegeven infrastructuur om daaraan schade aan te richten.

Uiteindelijk blijken er 5 aardpijpen met leegstroomgevaar 4 of 5 binnen een straal van 10 m van infrastructuur van Thermae 2000 voor te komen. Het gaat om aardpijpen 11, 13 en 15 t/m 17. Het is noodzakelijk deze op te vangen.

Desgewenst kunnen ook andere aardpijpen met leegstroomgevaar 4 of 5 worden opgevangen, wanneer men wil voorkomen dat binnen een straal van 10 m van de desbetreffende aardpijpen sinkholes ontstaan.

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat er een geringe kans op verzakkingen aan maaiveld bestaat ten gevolge van nazakking van grond in zich in aardpijpen gevormde open ruimtes, die op “natuurlijke” wijze, zonder instroming van grond in een gangenstelsel, zijn ontstaan. Dit geringe gevaar is overal aanwezig op de plateaus in Zuid-Limburg met mergel in de ondiepe ondergrond, ook waar geen ondergrondse mergelgroeven zijn.

Klasse	Leegstroomgevaar
1	Nihil: leegstromen onmogelijk
2	Zeër klein: leegstromen onwaarschijnlijk
3	Klein: leegstromen onwaarschijnlijk, maar niet uit te sluiten
4	Matig groot: opvangen, in ieder geval binnen 5 jaar
5	Groot: binnen 2 jaar opvangen

Tabel 5.1 Klassen leegstroomgevaar.

5.7 Mogelijke nu niet bereikbare aardpijpen

Op Bijlage 1 zijn twee niet toegankelijke (door muren of puin) gedeeltes van het gangenstelsel aangegeven. Beide liggen binnen 10 m van Kelderlagen 5 en 6A. Het is mogelijk dat zich hier aardpijpen bevinden met een leegstroomgevaar van 4 of 5. Het is noodzakelijk deze gedeeltes toegankelijk te maken voor inspectie op aardpijpen. Voor het meest zuidelijke van de twee gedeeltes dient dan een gat in de muur te worden gemaakt, voor de andere dient een deel van het puin te worden verwijderd of opzij geschoven.

5.8 Spanningen in aardpijpen

In Bijlage 10 is de methode beschreven waarmee de verticale en horizontale spanningen in de aardpijpen worden berekend. Deze spanningen zijn van belang in verband met de constructies waarmee de aardpijpen dienen te worden opgevangen. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage 9.

5.9 Stabiliteit dakconstructies

Hoewel het volgende geen deel uitmaakt van de opdracht, wordt er hier nog wel op gewezen. Op Bijlage 1 zijn met een paarse arcering twee plaatsen aangegeven waar het groevedak is verstevigd. Vermoedelijk zijn die verstevigingen aangebracht vanwege grote aardpijpen boven het groevedak. Het gaat om:

1. Mergelboog. Een groot deel van de mergelblokken die de boogconstructie vormen zijn gebarsten. Het wordt aanbevolen deze constructie te controleren en indien nodig te repareren of te vervangen. In [7] wordt de constructieve veiligheid hier, aangeduid als locatie 5, als onvoldoende beoordeeld.
2. Mergelblokken op balken. Hier zijn I-profielen aangebracht met daartussen mergelblokken. Het wordt aanbevolen deze constructie te controleren en indien nodig te repareren of te vervangen. In [7] wordt de constructieve veiligheid hier, aangeduid als locatie 7, als voldoende beoordeeld. Een nieuwe opname is noodzakelijk over 5-10 jaar. Het rapport [7] is vermoedelijk in 2013 opgesteld, dus de nieuwe opname zou dan tussen 2018 en 2023 dienen te worden uitgevoerd.

6. GERAADPLEEGDE DOCUMENTEN EN LITERATUUR

Literatuur:

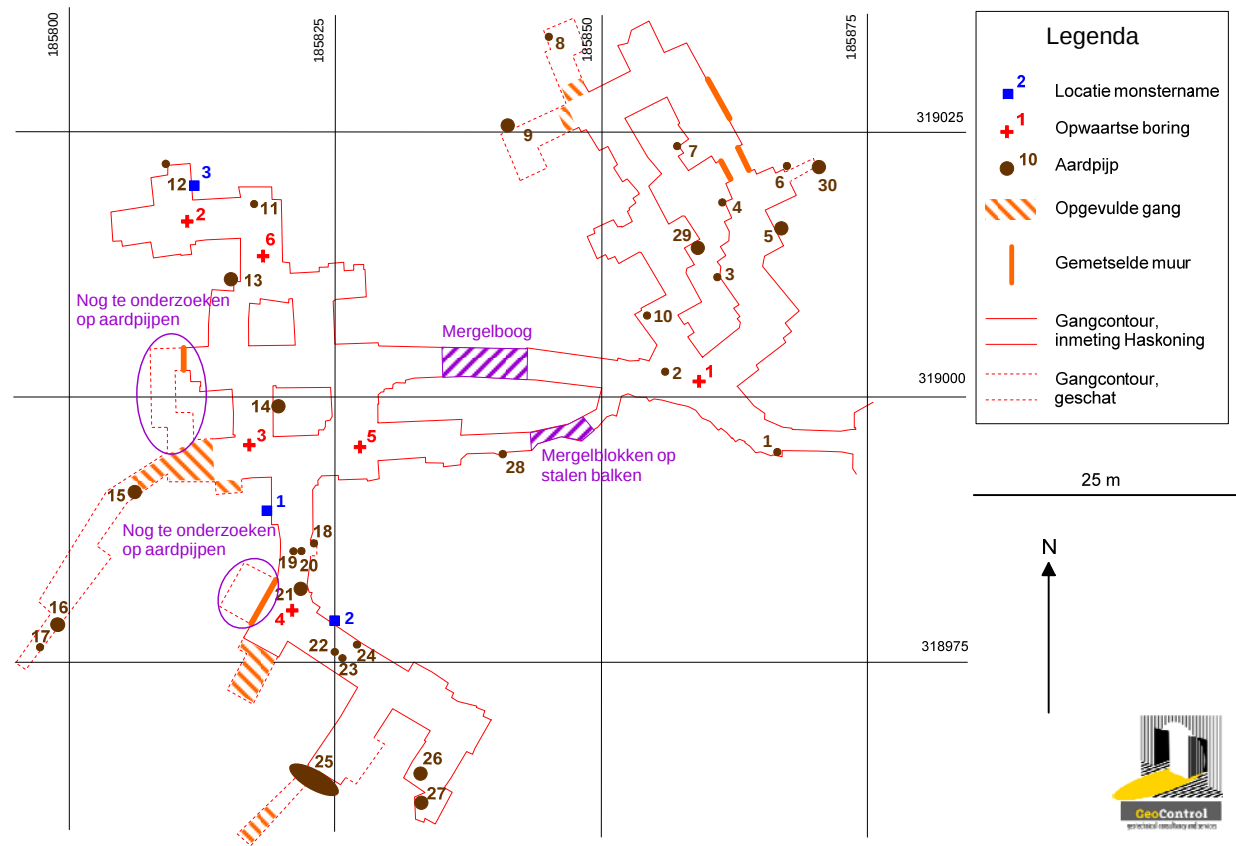
1. R.F. Bekendam (2013) *Inventarisatie van de pilaarstabiliteit en het gevaar voor een grootschalige instorting van de Trichtergrubbe*, GeoControl rapport M01316_V2, In opdracht van Provincie Limburg, pp 25
2. R.F. Bekendam (2017) *De stabiliteit van gangenstelsels in verband met uitbreidingen van Thermae 2000*, GeoControl rapport M01703, In opdracht van Thermae 2000, pp 39
3. Bekendam, R.F. (1998) *Pillar stability and large-scale collapse of abandoned room and pillar limestone mines in South-Limburg, The Netherlands*, PhD thesis, 362 pp
4. Bekendam, R.F. (2000) *Stabiliteitsbepaling ondergrondse mergelgroeven*, GeoControl rapport, Contr.nr. 66141, In opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen, pp 76
5. G180333 Boringen en drukproefstenen werkverslag (Mergelbouwsteen Kleijen bv)
6. 181488 analyserapport--FPy 23-04-2018 (SGS-Intron)
7. Stabiliteit plafonds Trichtergrubbe (Castermans Engineers), ontvangen van Mergelbouwsteen Kleijen bv

Door Focus bouwmanagers per mail aangeleverde documenten:

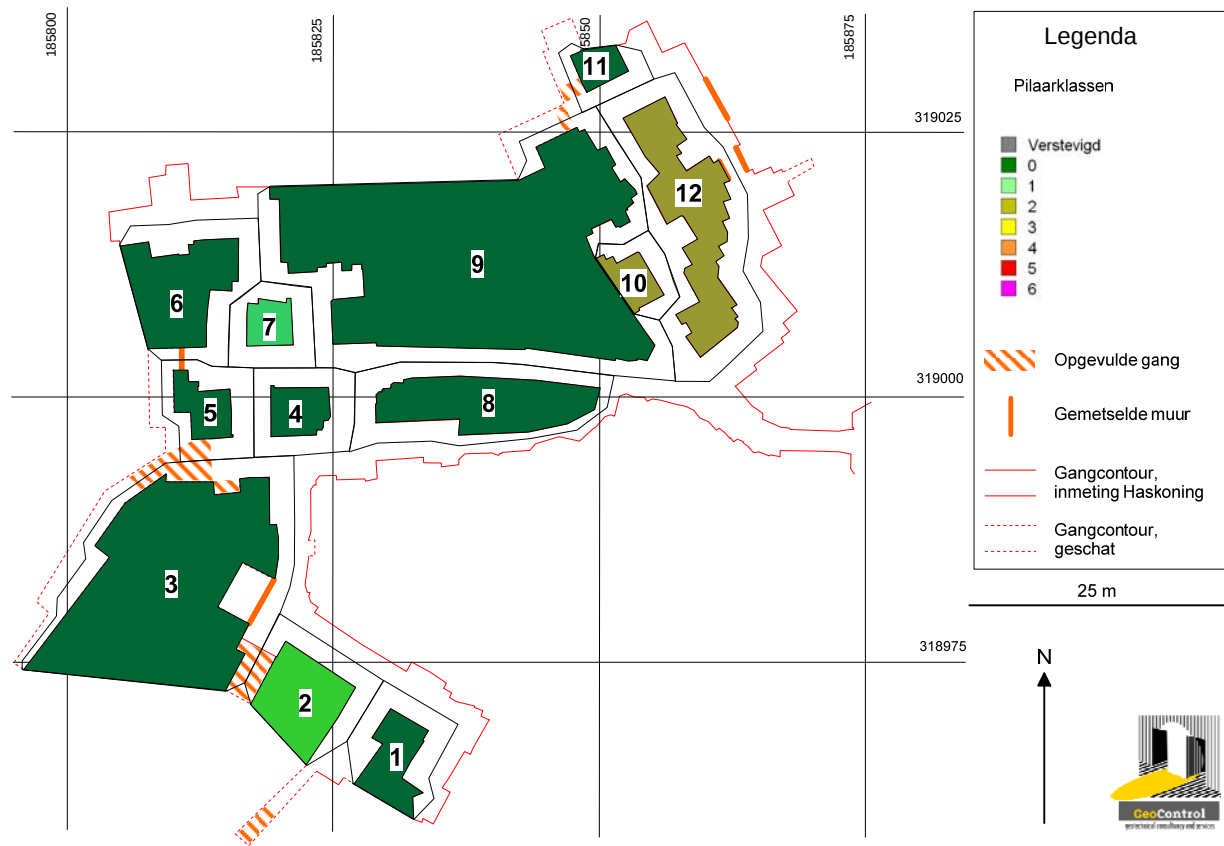
8. 10263_P(90)01_BT - Topografisch lokalisering.pdf
9. 10263_P(90)02_BT - Locatie Trichtergroeve.pdf
10. 10263_P(90)03_BT - Plattegrond Trichtergroeve.pdf
11. 10263_P(90)30_BT - Doorsneden Trichtergroeve.pdf
12. 10263_P(90)31_BT - Positie te creëren Stijgpunt.pdf
13. 10263_P(90)32_BT - Onderzoek extra vluchtweg.pdf

BIJLAGEN

Bijlage 1. Aardpijpen, boringen, monsterlocaties



Bijlage 2. Pilaarklassen en tributary areas



Bijlage 3. Trichtergroeve ten opzichte van infrastructuur



MAATVOERING BESTAAND IN HET WERK: TE CONTROLEREN C.Q. BEPALEN

OPDRACHTGEVER: Thermen 2020 B.V.
 WERK: SW-PLAATS: Thermen 2020, verbouwing aan de Oud - Trichtergrube
 FASE: Bestaande toestand
 STATUS: Definitief
 ONDERDEEL: Locatie Trichtergrube

FORMAAT: A2
 SCHAL: 1:500
 DATUM: 16-07-2018 GET.: CJA

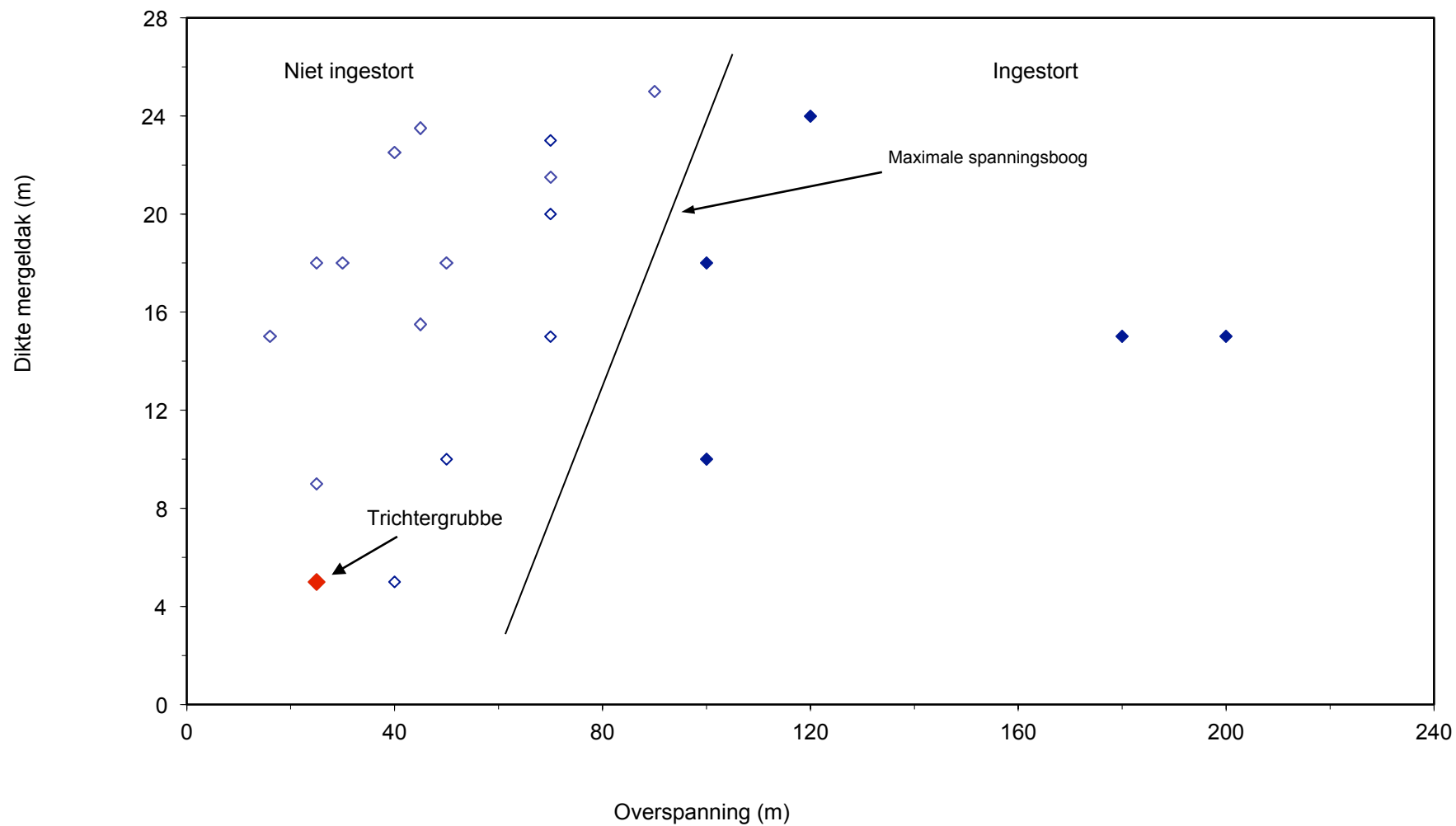
GEWISSED:									
01			03			05			07
02			04			06			08

Boring	NAP-hoogte dak (m)	Hoogte boring (m)	Minimale NAP-hoogte top mergel (m)
1	97	5	102
2	95.5	5	100.5
3	95.5	5	100.5
4	95.5	5	100.5
5	95.5	5	100.5
6	95.5	5	100.5

Blok	Proefstuk	Eenassige druksterkte (MPa)	Afstand tot dak (m)
Blok 1	1	4.5	2
Blok 1	2	3.3	2
Blok 1	3	2.7	2
Blok 2	4	3.9	1.2
Blok 2	5	3.3	1.2
Blok 2	6	3.5	1.2
Blok 3	7	3.6	1.5
Blok 3	8	2.7	1.5
Blok 3	9	2.8	1.5
Gemiddelde proefstukken 1-9		3.37	
St. deviatie profstukken 1-9		0.56	
Gemiddelde proefstukken 2-9		3.23	
St. deviatie profstukken 2-9		0.42	

UCS 3.23 Mpa
 Gamma_mergel 1.6E+04 N/m^3
 Gamma_grond 2.0E+04 N/m^3

Pilaar num- mer	Klasse	Pilaar oppervlakte A _p (m^2)	Pilaar omtrek C (m)	Pilaar hoogte H (m)	Vorm factor (initieel)	Vorm factor (residuair)	Pilaar sterkte S _{act} (MPa) (actueel)	Trib. Area oppervlak A _t (m^2)	NAP dak (m)	NAP Top mergel (m)	NAP maaiveld (m)	Dikte mergel (m)	Dikte grond (m)	Overburden spanning S _{ov} (MPa)	Pilaar spanning S (MPa)	Veiligheids factor SF _{act} (actueel)
1	0	35.35	23.91	2.3	1.52	1.02	4.90	81.40	95.5	102	110.0	6.5	8.0	0.264	0.61	8.07
2	1	59.56	23.37	2.3	1.98	1.67	6.40	104.00	95.5	102	113.0	6.5	11.0	0.324	0.57	11.32
3	0	295.01	66.97	2.3	2.79	2.80	9.01	402.52	95.5	102	117.5	6.5	15.5	0.414	0.56	15.96
4	0	23.80	20.13	2.3	1.39	0.84	4.49	75.93	95.5	102	116.0	6.5	14.0	0.384	1.23	3.66
5	0	23.69	24.10	2.3	1.30	0.72	4.21	71.78	95.5	102	117.5	6.5	15.5	0.414	1.25	3.35
6	0	77.62	32.30	2.3	1.92	1.58	6.20	137.12	95.5	102	120.0	6.5	18.0	0.464	0.82	7.57
7	1	17.65	17.73	2.3	1.31	0.72	4.22	59.54	95.5	102	117.5	6.5	15.5	0.414	1.40	3.02
8	0	87.59	49.72	2.3	1.64	1.19	5.30	163.34	95.5	102	111.5	6.5	9.5	0.294	0.55	9.67
9	0	486.93	95.31	2.3	3.10	3.23	10.00	634.79	97.0	102	111.5	5.0	9.5	0.270	0.35	28.41
10	2	18.86	13.31	2.3	1.49	0.98	3.17	39.17	96.0	102	110.5	6.0	8.5	0.266	0.55	5.74
11	0	14.74	12.18	2.3	1.40	0.85	4.53	36.24	96.0	102	110.0	6.0	8.0	0.256	0.63	7.19
12	2	100.61	74.17	2.3	1.46	0.94	3.05	229.32	96.0	102	110.0	6.0	8.0	0.256	0.58	5.22
														SF _{tot,intact}	14.91	
														SF _{tot,act}	14.61	



Aardpijp		Aardpijp in:		Breedte	Gevaar	Gelegen		Opmerkingen
Nummer	Diameter			opening [cm]	leegloop	onder	Opvangen	
		pilaar	dak	(in pilaar)		gebouw/	nodig	
	[cm]			Breedte*hoogte		weg		
1	20*30		x		3	nee	nee	
2	20		x		2	nee	nee	
3	40	x		35*100	2	nee	nee	
4	50	x		40*90	1	nee	nee	Opgevangen door mergel-metselwerk
5	120	x		120*100	2	nee	nee	Holruimte onderin pilaar, bovenin afgesloten door grond en mergelpuin
6	200	x		80*220	4	nee	nee	
7	10	x		10*70	1	nee	nee	
8	100?	?	?	?	?	nee	nee	Mogelijk meerdere aardpijpen, niet bereikbaar vanwege afsluiting door grond
9	>100	?	?	?	?	nee	nee	Mogelijk meerdere aardpijpen, niet bereikbaar vanwege afsluiting door grond
10	40*70		x		5	nee	nee	
11	40*50		x		5	ja	ja	Over 1 meter hoogte leeggestroomd
12	20?	x		15*100	1	ja	nee	
13	100?	x		70*180	4	ja	ja	Barstvorming pilaar door druk van de aardpijp
14	100-150	x		10*40 en 30*30	2	ja	nee	
15	180*130		x		5	ja	ja	
16	150*70		x		5	ja	ja	
17	80*60		x		5	ja	ja	
18	10*20		x		3	nee	nee	
19	35*20		x		4	nee	nee	
20	40*20		x		4	nee	nee	
21	80*60		x		5	nee	nee	
22	20		x		3	nee	nee	
23	40		x		4	nee	nee	
24	20		x		3	nee	nee	
25	100*400		x		5	nee	nee	Aan westkant over 2 meter hoogte leeggestroomd, grondkoepel gevormd
26	80*160		x		5	nee	nee	Over 2.5 meter hoogte leeggestroomd, 3 m^2 grond uitgestroomd, plantenwortels
27	200*200		x		5	nee	nee	Over 1.8 meter hoogte leeggestroomd, 5 m^2 grond uitgestroomd, plantenwortels
28	80*40		x		5	nee	nee	
29	200?	x		10*10 en 10*10	3	nee	nee	
30	80*80		x		5	nee	nee	

Wand aardpijp:	g	10	Bedekking:		
Dichtheid (kg/m^3)	Ro	2.00E+03	Dichtheid (kg/m^3)	Ro	2.00E+03
sig_h/sig_v	K	0.5	sig_h/sig_v	K	0.5
Wrijvingshoek	Phi	13	Wrijvingshoek	Phi	35
Tan Phi		0.231	Tan Phi		0.700
Cohesie	c'	0.001	Cohesie	c'	3000.0

Aardpijp	Opvangen	Dikte totale bedekking	Dikte mergel	Dikte grond	Min. diameter	Min. oppervlak	Min. omtrek	Sig_v0 Top mergel	Sig_v0 Top mergel	Sig_v Groevedak excl. sig_V0	Sig_v Groevedak excl. sig_V0	Sig_v Groevedak incl. sig_V0	Sig_v Groevedak incl. sig_V0	Sig_h Groevedak incl. sig_V0
		(m)	(m)	(m) z_0	(m) D	(m) A	(m) C	(Pa) lithost.	(Pa) Totaal	(Pa) lithost.	(Pa) Totaal	(Pa)	(Pa) Totaal	(Pa) Totaal
11	ja	18.0	6.5	16.0	0.50	0.20	1.59	320000	0	130000	21801	0	21801	10900
13	ja	18.0	6.5	16.5	1.00	0.79	3.14	330000	5713	130000	41161	284	41445	20723
15	ja	18.0	6.5	16.5	1.73	2.34	5.42	330000	16082	130000	61626	2826	64452	32226
16	ja	18.0	6.5	18.0	1.16	1.05	3.63	360000	7944	130000	46347	593	46939	23470
17	ja	18.0	6.5	18.0	0.78	0.48	2.46	360000	2596	130000	33133	56	33189	16595

BIJLAGE 10: SPANNINGEN AARDPIJPEN

1. Inleiding

In deze notitie wordt een schatting gedaan van de verticale en horizontale spanningen in de aardpijpen, welke door constructies dienen te worden opgevangen. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een analytisch model van Janssen [1,2], dat oorspronkelijk is ontwikkeld voor het bepalen van spanningen in silo's voor bulk goederen.

2. Berekeningsmethode

In deze zogenaamde slice element methode wordt een evenwichtsvergelijking opgesteld voor de verticale krachten die werken op een horizontaal schijfvormig element in een silo, of in dit geval in een aardpijp. De vergelijking [1] is aangepast voor cohesie tussen aardpijp en mergelwand. Voor de verticale spanning, die geacht wordt constant te zijn voor een bepaalde horizontale doorsnede, kan de volgende vergelijking worden afgeleid:

$$\sigma_v = \left\{ \frac{g\rho A}{K \tan \phi C} - \frac{c}{K \tan \phi} \right\} \left\{ 1 - \exp \frac{-K \tan \phi Cz}{A} \right\} + \sigma_{v0} \exp \frac{-K \tan \phi Cz}{A} \quad (1)$$

waarbij:	g	=	zwaartekrachtsversnelling
	ρ	=	dichtheid vulling aardpijp
	D	=	diameter van de aardpijp
	A	=	$1/4 \pi D^2$, het oppervlak van een horizontale doorsnede
	K	=	σ_h / σ_v , de verhouding tussen de horizontale- en verticale spanning in de aardpijp
	φ	=	wrijvingshoek van de wand van de aardpijp
	c	=	cohesie van de wand van de aardpijp
	C	=	πD , de omtrek van de aardpijp
	σ_{v0}	=	verticale spanning aan de bovenkant van de aardpijp, ten gevolge van het gewicht van de grondlagen boven het mergelpakket

z = diepte, gerekend vanaf de bovenkant van de aardpijp

Voor de dichtheid ρ van de vulling van de aardpijp, die meestal uit kleiige- of zandige grindafzettingen van de Maas bestaat, wordt een waarde van $2.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ gehanteerd [5]. Sommige aardpijpen bestaan, in ieder geval aan de onderkant, uit de kleiige zanden van de Formatie van Tongeren. Deze hebben een iets lagere dichtheid, maar hoger in de aardpijp bevindt zich in de meeste gevallen ook Maasgrind. Daarom wordt de waarde van $2.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ algemeen toegepast, netals voor de grondlagen boven de mergel.

In de praktijk ligt de waarde voor K tussen 0.5 en 1 [4], voor slappe klei dichtbij 1 en voor zanden 0.6 of 0.7. De laagst mogelijke waarde is die behorend bij de actieve spanningstoestand $K = (1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$. Voor het Maasgrind zijn ϕ -waardes van ca. 35° gemeten [5]. Dan zou K gelijk aan 0.27 zijn. Deze waarde kan echter maar voor één richting gelden, in de andere horizontale richting is K groter. Rondom de aardpijp zal de gemiddelde waarde minimaal 0.5 bedragen. De spanningen in de aardpijp nemen toe met een afnemende waarde van K . Als voorzichtige schatting wordt daarom de minimale waarde van 0.5 gehanteerd.

De wand van de aardpijp is in het algemeen bekleed met een laagje pure klei. De waarde van ϕ voor een klei-kalksteen oppervlak (1-2 cm klei-vulling) is $13\text{-}14^\circ$ [6]. In deze berekeningen wordt een lage, voorzichtige waarde van 13° toegepast. De cohesie bedraagt slechts 0.001 Pa [6].

De eerste term, voor het + teken, van vgl. (1) drukt de verticale spanning ten gevolge van het gewicht van de grond in de aardpijp uit, terwijl de tweede term de verticale spanning ten gevolge van het gewicht van de grond boven de mergel, aan de bovenkant van de aardpijp, beschrijft.

De limietwaarde voor σ_v is gelijk aan:
$$\sigma_v = \frac{g \rho A}{K \tan \varphi C} \quad (2)$$

Deze wordt voor 99 % bereikt op een diepte z beneden de top van de mergel van:

$$z = \frac{4.6 A}{K \tan \varphi C} \quad (3)$$

Wanneer een aardpijp op een bepaalde diepte wordt aangesneden door een gang, geeft vgl. (1) de verticale spanning die kort daarvoor op het niveau van het groevedak heerste. Dit is ook de spanning die dient te worden opgevangen. De totale kracht F_v die door de constructie gedragen dient te worden is:

$$F_v = \sigma_v A \quad (4)$$

F_v komt overeen met de kracht die wordt uitgeoefend door het gewicht van de aardpijp over een hoogte h van :

$$h = \frac{\sigma_v}{\rho g} \quad (5)$$

Deze hoogte is doorgaans beduidend kleiner dan die van de gehele aardpijp. Meestal is de aardpijp (nog) niet leeggelopen, ondanks dat nog geen ondersteuning is aangebracht. De cohesie van de grond in de aardpijp speelt hierbij een belangrijke rol. Door bijvoorbeeld toestroom van water naar de aardpijp en een toenemend watergehalte kan de aardpijp alsnog leeglopen.

De horizontale spanning in de aardpijp wordt gegeven door:

$$\sigma_h = \frac{g \rho A}{\tan \varphi C} \left\{ 1 - \exp \frac{-K \tan \varphi C z}{A} \right\} + K \sigma_{v0} \exp \frac{-K \tan \varphi C z}{A} \quad (6)$$

De ontwikkeling van σ_h is analoog aan die van σ_v .

Omdat in de grondbedekking ook boogwerking (silo-effect) plaatsvindt, is de verticale spanning σ_{v0} aan de bovenkant van de aardpijp, ten gevolge van het gewicht van de grondlagen boven het mergelpakket, uitgerekend analoog aan de berekening van σ_v . De aldus verkregen waarde van σ_{v0} wordt dan ingevoerd in bovenstaande formules.

3. Literatuur

1. Janssen, H.A. (1895) *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 39, p1045-1049
2. Schulze, D. (2003) Stresses in silos, www.dietmar-schulze.de/spann.html
3. Bekendam, R.F. (1998) *Pillar stability and large-scale collapse of abandoned room and pillar limestone mines in South-Limburg, The Netherlands*, PhD thesis, 362 pp
4. Verruijt, A. (1999) *Grondmechanica*, Delft University Press, pp 295
5. Kronieger, R.R. (1988) *Development of engineering-geological maps on constructuin materials in South Limburg*, Delft Progress report, **V13, N1/2**, p 237-253
6. Hoek, E & Bray, J.W. (1981) *Rock slope engineering*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
7. Prinz, H. (1991) *Abriss der Ingenieursgeologie*, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart

Bijlage 11: Analyserapport SGS Intron, druksterkte mergel

Analysrapport

GeoControl
t.a.v. de heer dr. R. F. Bekendam
Meidoorn 93
6226 WG MAASTRICHT

Datum : 23-04-2018
Betreft : Bepaling van de druksterkte van cilinders uit mergelblokken
Uw code : e-mail 18-4-2018
Laboratoriumnummer : 181488
Monsterneming : door de opdrachtgever
Periode onderzoek : 19-04-2018 t/m 23-04-2018

Monstergegevens

Monsternummer	Monstertype	Monstercode	Acceptatiedatum
1	mergelblok	blok 1 18-4-2018	19-04-2018
2	mergelblok	blok 2 18-4-2018	19-04-2018
3	mergelblok	blok 3 18-4-2018	19-04-2018
4	mergelcilinder	Kern 1 van Blok 1	19-04-2018
5	mergelcilinder	Kern 2 van Blok 1	19-04-2018
6	mergelcilinder	Kern 3 van Blok 1	19-04-2018
7	mergelcilinder	Kern 1 van Blok 2	19-04-2018
8	mergelcilinder	Kern 2 van Blok 2	19-04-2018
9	mergelcilinder	Kern 3 van Blok 2	19-04-2018
10	mergelcilinder	Kern 1 van Blok 3	19-04-2018
11	mergelcilinder	Kern 2 van Blok 3	19-04-2018
12	mergelcilinder	Kern 3 van Blok 3	19-04-2018

Analysemethoden

Analyse	Analysetechniek	Methode	Q	u
Volumieke massa en druksterkte van proefstukken		NEN-EN 12390-7, NEN-EN 12390-1/3, NEN-EN 12504-1	Q	
Zagen en vlakken		NEN-EN 12504-1		

Q = geaccrediteerd door RvA, u = uitbesteed bij onderaannemer, Qu = geaccrediteerd bij de onderaannemer

Opgesteld door: F. Pijs
projectleider

Geautoriseerd door: H.P.H. Creemers
accountmanager

Pagina 1 van 4

Resultaten

Analyse	Eenheid	Blok 1		
		4	5	6
Massa proefstuk	kg	0,327	0,329	0,329
Diameter proefstuk	mm	50,1	50,2	50,3
Hoogte proefstuk	mm	99,3	99,2	99,3
Drukkracht	kN	8,8	6,6	5,3
Volumieke massa	kg/m ³	1670	1670	1670
Druksterkte cilinder	MPa	4,5	3,3	2,7

Analyse	Eenheid	Blok 2		
		7	8	9
Massa proefstuk	kg	0,328	0,321	0,323
Diameter proefstuk	mm	50,2	50,0	49,9
Hoogte proefstuk	mm	100,2	100,2	100,1
Drukkracht	kN	7,7	6,5	6,7
Volumieke massa	kg/m ³	1650	1640	1660
Druksterkte cilinder	MPa	3,9	3,3	3,5

	Eenheid	Blok 3		
		10	11	12
Massa proefstuk	kg	0,335	0,316	0,319
Diameter proefstuk	mm	50,0	49,5	49,6
Hoogte proefstuk	mm	100,1	100,2	99,3
Drukkracht	kN	7,1	5,1	5,5
Volumieke massa	kg/m ³	1710	1640	1670
Druksterkte cilinder	MPa	3,6	2,7	2,8

Toelichting

Op 19 april zijn de proefstukken uit de aangeleverde blokken geboord. De boorrichting staat in de foto 1 met een pijl aangegeven. In foto 2, 3 en 4 zijn de geprepareerde proefstukken weergegeven. Na preparatie is uitdroging voorkomen en zijn de proefstukken tot aan het moment van testen opgeslagen bij 20 °C / >95% R.V.

In afwijking van de in de norm vermelde afmeting van de proefstukken is op verzoek van de opdrachtgever de druksterkte bepaald aan proefstukken met een lengte/diameter verhouding van 1:2.

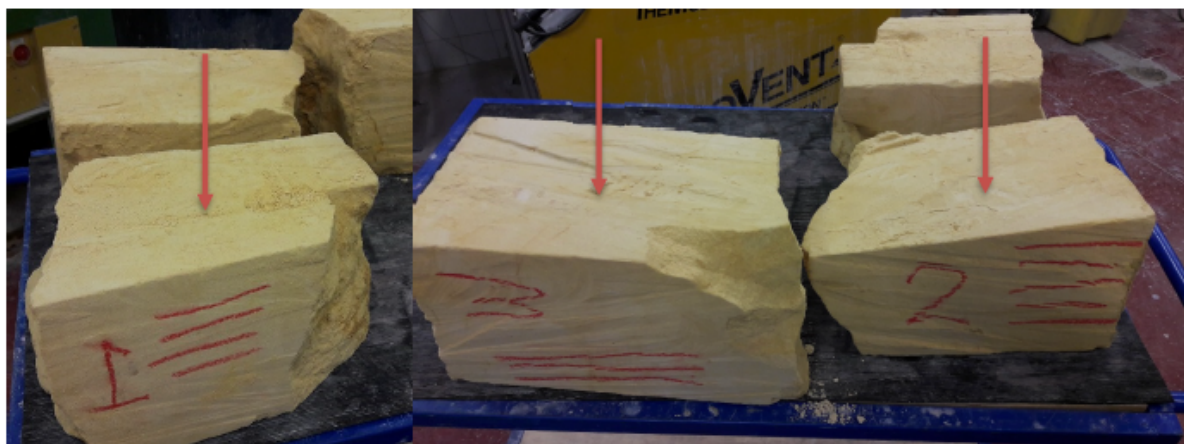


Foto 1



Foto 2. Proefstukken 4 t/m 6 (uit blok 1)



Foto 3. Proefstukken 7 t/m 9 (uit blok 2)



Foto 4. Proefstukken 10 t/m 12 (uit blok 3)

Bijlage 12: Rapportage opwaartse boringen Kleijnen Mergelbouwsteen BV

Rapportage Deklaagboringen Trichterberggroeve Valkenburg aan de Geul

Opdrachtgever: Geocontrol

Werkzaamheden: Plaatsen verticale boringen tbv bepaling dikte mergeldak
Aanvullend: 3 blokken uitgezaagd tbv drukproeven

Uitvoeringsperiode: week 16 2018

Uitgevoerd door:

Mergelbouwsteen Kleijnen bv

Bergstraat 31

6301 AB Sibbe-Valkenburg

Tel. 043-6014460

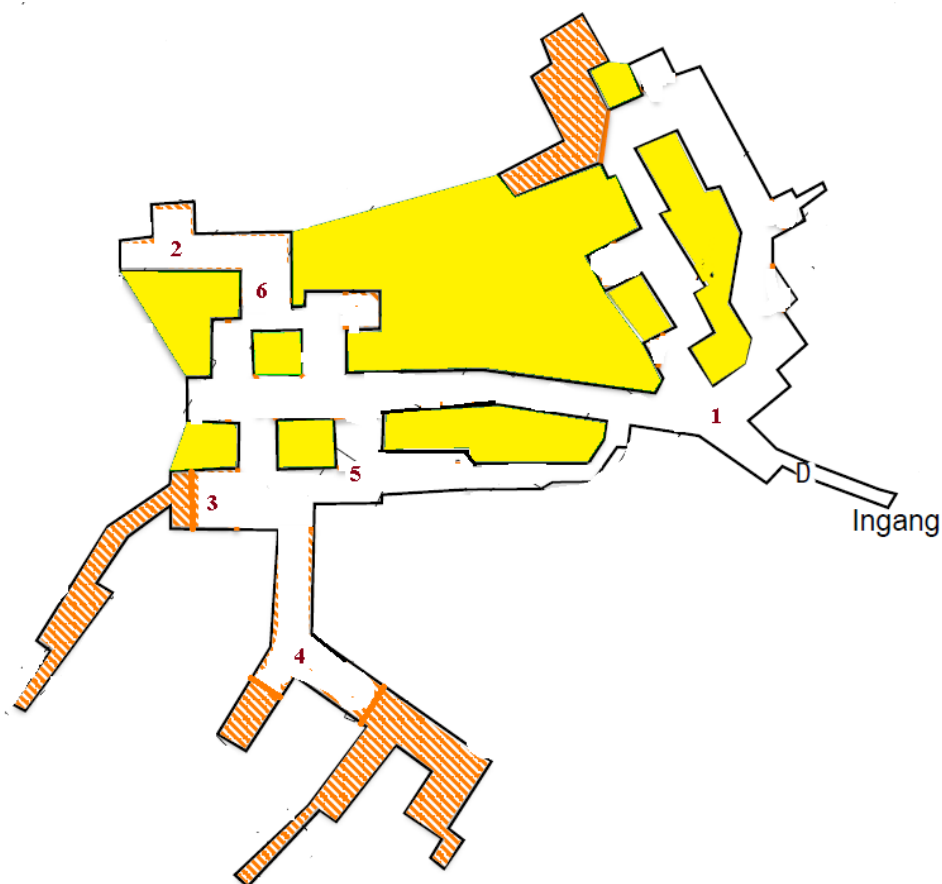
Fax 043-6016650

Ons kenmerk: G180333

Geachte heer Bekendam,

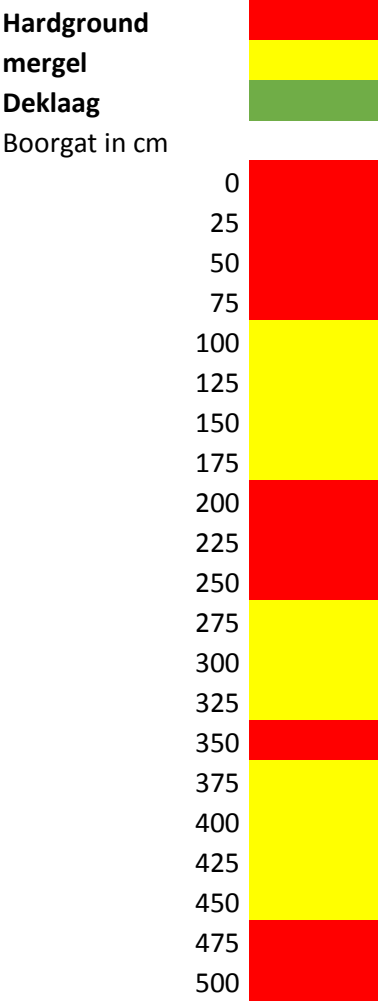
Naar aanleiding van uw opdracht doen wij u bij deze de posities en waarnemingen van de boringen toekomen. Wij hebben getracht een beeld te schetsen van de aangetroffen materialen tijdens de boringen. Op basis van de druk die wordt uitgeoefend en het vrijkomend materiaal kan een inschatting worden gemaakt van het materiaal waar op dat moment doorheen wordt geboord. Bij geen enkele boring hebben wij grond, zand of kiezel waargenomen in het boormeel, hierdoor lijkt het hoogst waarschijnlijk dat de mergeldekking op de groeve meer dan 5 meter is. Eveneens toegevoegd de locaties van de uitgezaagde proefblokken die bij SGS intron zijn afgegeven voor verder onderzoek.

Op onderstaand kaartje zijn de posities van de uitgevoerde boringen dmv nummers aangegeven.



Positie boorlocaties (1-6)

Locatie 1



Géén deklaag geraakt

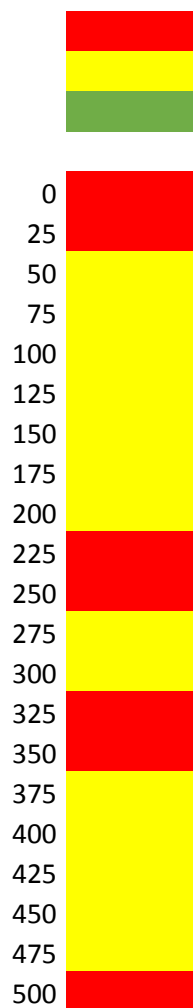
Locatie 2

Hardground

mergel

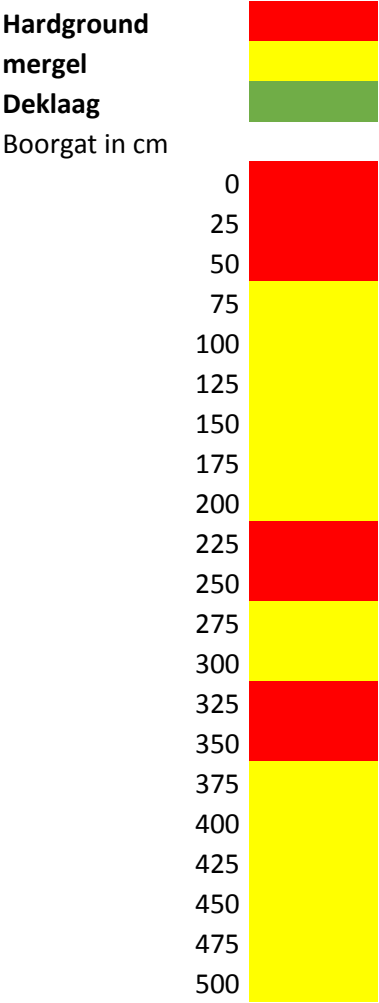
Deklaag

Boorgat in cm



Géén deklaag geraakt

Locatie 3



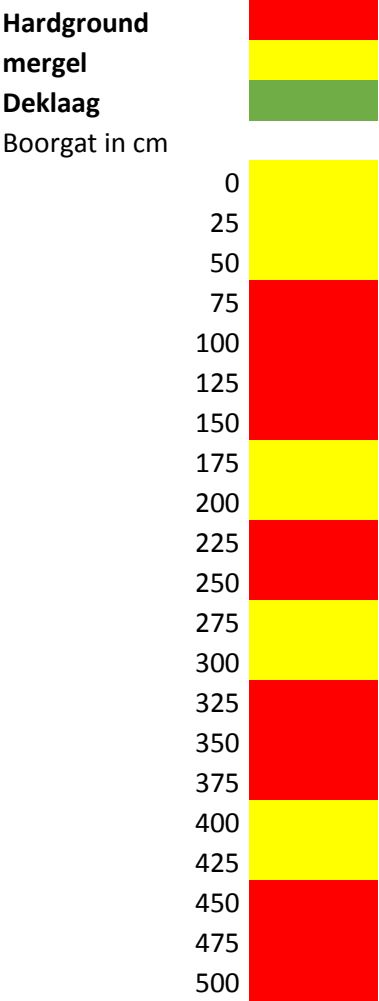
Géén deklaag geraakt

Locatie 4



Géén deklaag geraakt

Locatie 5



Géén deklaag geraakt

Locatie 6

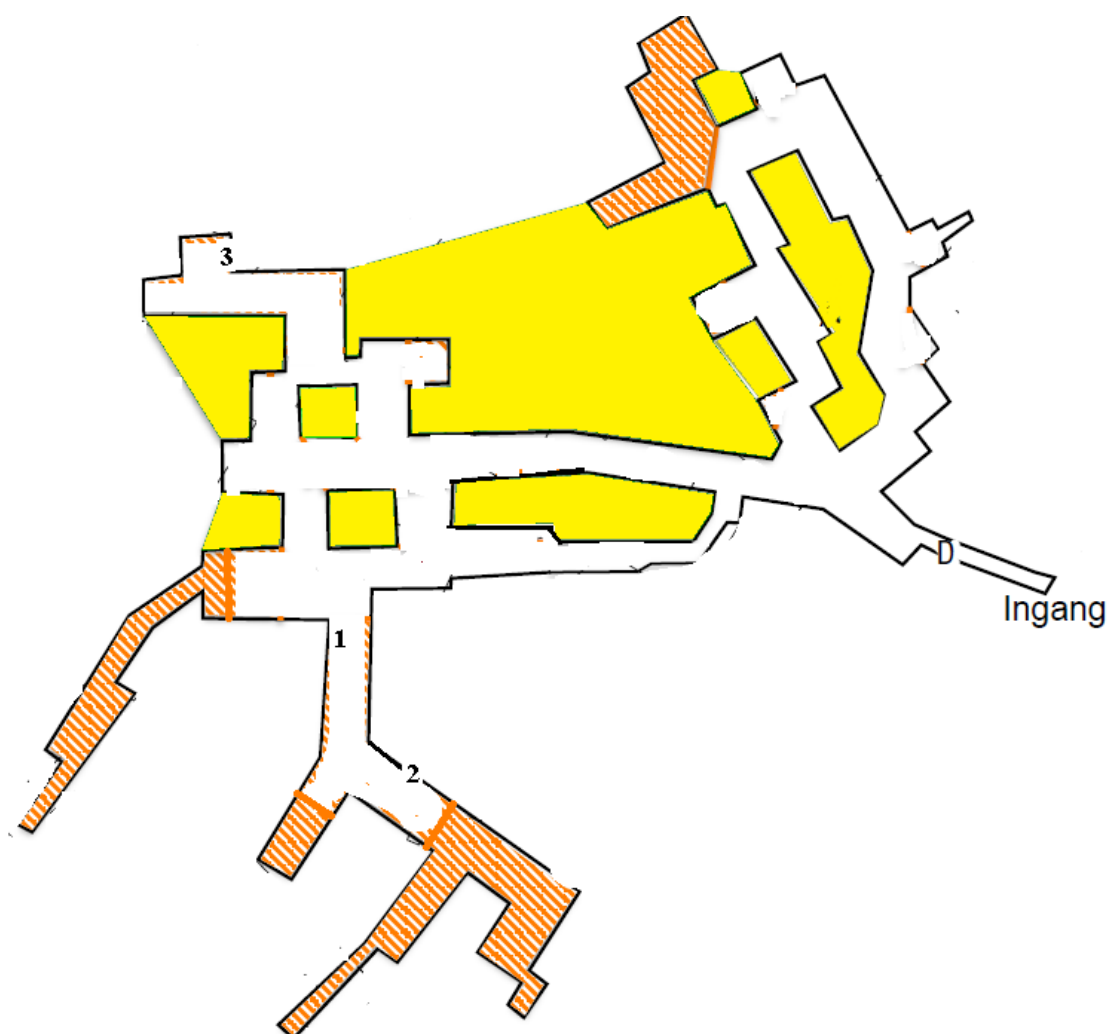
Hardground
mergel
Deklaag

Boorgat in cm



Géén deklaag geraakt

Overzicht met locaties drukproefstenen:



Locatie1: op ca. 50cm boven vloerniveau

Locatie2: op ca, 100cm boven vloerniveau

Locatie3: op ca. 100cm boven vloerniveau



Uitzagen van de proefsteen op locatie 3

Hopend u hiermee voldoende geïnformeerd te hebben,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Arnout Sluijsmans', written in a cursive style.

Arnout Sluijsmans
Mergelbouwsteen Kleijnen b.v.