

DE STABILITEIT VAN GANGENSTELSELS
IN VERBAND MET UITBREIDINGEN
VAN THERMAE 2000_2022

GeoControl rapport M02203

In opdracht van: Thermae 2000 B.V.

MAASTRICHT, MAART 2022

DE STABILITEIT VAN GANGENSTELSELS
IN VERBAND MET UITBREIDINGEN
VAN THERMAE 2000_2022

GeoControl rapport M02203

In opdracht van: Thermae 2000 B.V.

Datum: Maart 2022

Auteur: 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. Ligging groeves; NAP-hoogtes van het maaiveld en de uitbreidingen, de top van de mergel en het dak van de gangenstelsels	3
3. Invloed pilaarstabiliteit op de uitbreidingen van Thermae 2000	3
3.1 Trichtergroeve	4
3.2 Gemeentegroeve	4
4. Invloed uitbreidingen van Thermae 2000 op de pilaarstabiliteit	5
5. Invloed aardpijpen, andere karstholtes en open boorgaten op de uitbreidingen van Thermae 2000	5
5.1 Aardpijpen en open boorgaten	5
5.2 Andere typen karstholtes	6
6. Instroming van grond ten gevolg van een doorbraak van de mergelbedekking	7
7. Geraadpleegde bronnen	8

BIJLAGEN

Bijlage 1	Plattegrond Gemeentegroeve en Trichtergroeve met uitbreidingen Thermae 2000
Bijlage 2	Drukken ondergrond op het niveau van de Trichtergroeve
Bijlage 3	Drukken ondergrond op het niveau van de Gemeentegroeve
Bijlage 4	Trichtergroeve met pilaarklassen (Bijlage 2 uit [9])
Bijlage 5	Trichtergroeve met aardpijpen (Bijlage 1 uit [9])
Bijlage 6	Algemene beschrijving van pilaarinstabiliteit en pilaarinstortingen (Bijlage 11 uit [6])

1. Inleiding

Thermae 2000 B.V. is voornemens in twee fases 31 huisjes te bouwen waarvan een aantal boven de Gemeentegroeven en/of Trichteragroeven komen te liggen.

De bouwprojecten brengen een extra belasting teweeg op de gangenstelsels. In rapporten [5] en [6] is de huidige belasting op de pilaren onderzocht en de extra belasting in verband met eerdere plannen.

Ter plaatse van deze uitbreidingen zijn een aantal typen instabiliteit van de ondergrondse groeves van belang. Al deze typen kunnen in het algemeen verzakkingen aan het oppervlak veroorzaken, met min of meer ernstige schade aan de installaties als gevolg:

1. onvoldoende pilaarstabiliteit met het gevaar van een klein- of grootschalige instorting: aan het oppervlak enkele dm tot m bodemdaling, begrensd door breuken met een verzet tot enkele meters.
2. aardpijpen, die deels zijn leeggelopen of dreigen leeg te lopen: aan het oppervlak kratervorming met een diepte en diameter van maximaal enkele meters.
3. instroming van grond in openingen boven het oorspronkelijke groevedak, aan de rand van instortingsgebieden.
4. doorbraak van het gehele mergeldak boven instortingskoepels in- en aan de rand van instortingsgebieden
5. zetting: compactie van het gesteentepuin in instortingsgebieden onder invloed van extra belastingen

Het gaat er hierbij om in hoeverre de gangenstelsels de uitbreidingen bovengronds ongunstig beïnvloeden en in hoeverre de belastingen door de uitbreidingen ontoelaatbare gevolgen hebben voor de stabiliteit van de gangenstelsels.

Voor dit onderzoek is behalve van rapporten [5] en [6] gebruik gemaakt van eerder uitgebrachte rapporten over de Trichteragroeven [8, 9] en de Gemeentegroeven [7].

Belangrijke conclusies en aanbevelingen zijn in de tekst onderstreept.

In dit rapport worden de risico's op zakkingen en zetting onder de uitbreidingen zo nauwkeurig mogelijk bepaald. Zonder een dicht boorraster moet echter ook van redelijke, conservatieve aannames worden uitgegaan en is het noodzakelijk gegevens uit de ondergrond te extrapoleren.

Boven stabiele- en gestabiliseerde gangenstelsels, opgevulde instortingsgebieden of ongemijnde gebieden bestaat, in verband met karstverschijnselen zoals aardpijpen, geen honderd procent zekerheid voor het uitblijven van zakkingen of zetting onder extra belasting. Waar dit van toepassing is, worden deze geringe risico's genoemd.

2. Ligging groeves; NAP-hoogtes van het maaiveld en de uitbreidingen, de top van de mergel en het dak van de gangenstelsels

Voor de berekeningen zijn de NAP-hoogtes van het maaiveld ontleend aan [7]. De NAP-hoogtes van het funderingsniveau van de huisjes zijn afkomstig uit [2-4]. Omdat huisjes 11 t/m 26 niet alle op hetzelfde niveau liggen is ook gebruik gemaakt van ahn.nl [15].

In boringen B62A0428 en B62A0384, ter plaatse van de Thermae 2000, ligt de top van het mergelpakket op 101.4 resp. 102.7 m NAP [7]. In [5] en [6] is voorzichtigheidshalve een NAP-niveau van 100 m aangehouden, maar uit later uitgevoerde opwaartse boringen vanuit de Trichtergroef blijkt dat een NAP-hoogte van 102 m kan worden gehanteerd [9].

De NAP-hoogtes van het groevedak van de Gemeentegroef (zie Bijlage 1) zijn afkomstig uit [7]. De groef, is ontgonnen in de Kalksteen van Nekum. Deze mergellaag helt, net als de lagen eronder en erboven, enigszins naar het noordwesten. De NAP-hoogte van het groevedak van de Trichtergroef neemt af van 97.3 m bij de ingang in het oosten tot ca. 95.5 m in het westen van de groef [9]. De dikte van de mergelbedekking van deze groef bedraagt aan de westkant ca. 6.5 m (Bijlage 2), hetgeen beduidend groter is dan in [5] en [6] is geschat.

Een overzicht van de NAP-hoogtes van het maaiveld, het groevedak en de top van de mergel onder de verschillende uitbreidingen van Thermae 2000 wordt gegeven in Bijlagen 2 en 3.

3. Invloed pilaarstabiliteit op de uitbreidingen van Thermae 2000

Het gebied bovengronds dat wordt beïnvloed door gangenstelsels, wordt bepaald door een grenshoek van 45°, gerekend vanaf het niveau van het gangenstelsel, en strekt zich uit, over een afstand die gelijk is aan de diepte van het gangenstelsel, tot buiten de rand van het gangenstelsel. Een algemene beschrijving van pilaarinstabiliteit en pilaarinstortingen wordt gegeven in Bijlage 6.

3.1 Trichtergroeve

Alleen huisjes 11 t/m 17 liggen binnen de invloedszone van de Trichtergroeve. De pilaardrukschade is in [9] in 2013 visueel beoordeeld en geclassificeerd volgens het in Bijlage 11 beschreven systeem. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage 4. De meerderheid van de pilaren vertoont niet of nauwelijks drukschade (klasse 0-1). De totale veiligheidsfactor $SF_{\text{tot,act}}$ bedraagt meer dan 14 en de grootschalige pilaarstabiliteit is ruim voldoende, net als de boogwerking [9].

Er kan worden geconcludeerd dat de kans op verzakkingen aan het maaiveld ten gevolge van een pilaarinstorting in de Trichtergroeve zeer gering is.

3.2 Gemeentegroeve

Onder de Trichtergroeve ligt de Gemeentegroeve (Bijlage 1). Huisjes 1 t/m 7 liggen buiten de invloedszone van de Gemeentegroeve.

Huisjes 8-10 liggen binnen de invloedszone van deelgebied ZW1, huisjes 11-14 liggen binnen de invloedszone van deelgebieden C5 en C6, huisjes 15-17 binnen die van deelgebieden C4, C5 en C6, huisjes 18-20, 21-23 en 27-28 binnen die van deelgebieden C3, C4 en C5, en huisjes 24-26 en 29-31 liggen binnen de invloedszone van deelgebieden C3, C4, C5 en N6.

In de deelgebieden ZW1, C3, C5 en C6 is zowel het totale draagvermogen van de pilaren als de boogwerking van de mergelbedekking voldoende [7]. Voor deelgebied C4 is de grootschalige pilaarstabiliteit onvoldoende en de boogwerking voldoende, en voor deelgebied N6 is de grootschalige pilaarstabiliteit eveneens onvoldoende en de boogwerking nauwelijks voldoende.

Alle bovengenoemde deelgebieden worden twee maal per jaar geïnspecteerd, en er bleek in vergelijking met de opname in 2008 [7] geen verslechtering van de pilaarstabiliteit te zijn opgetreden. In onder andere deelgebied N6 is in 2019 een zeer nauwkeurig telemetrisch monitoringsysteem geïnstalleerd, waarvan de meetresultaten tot nu toe geen aanleiding geven om een grootschalige instorting te verwachten.

Er kan worden geconcludeerd dat ter plaatse van de huisjes de kans op verzakkingen ten gevolge van een pilaarinstorting in de Gemeentegroeve zeer gering is. Ter plaatse van de huisjes 24-26 en 29-31 is de kans op verzakkingen ten gevolge van een pilaarinstorting in de Gemeentegroeve zeer gering op de korte termijn (2 jaar) en gering op de middellange termijn (5 jaar). Controles en monitoring van de pilaren blijven hier noodzakelijk.

4. Invloed uitbreidingen van Thermae 2000 op de pilaarstabiliteit

De nauwkeurigste drukverdeling recht onder een object aan maaiveld is die volgens Boussinesq [10]. Voor alle elementen is de (maximale) druk recht daaronder berekend. De resultaten voor de Trichtergroeve en de Gemeentegroeve zijn weergegeven in respectievelijk Bijlagen 2 en 3. Hierbij is uitgegaan van een unit weight van $1.6 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ voor mergel en van $2.0 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ voor de grondlagen daarboven.

Huisjes 1-10, 24-26 en 29-31 belasten de groeven niet of nauwelijks. De Trichtergroeve wordt alleen door huisjes 11-17 belast en de Gemeentegroeve alleen door huisjes 9-10, 11-23 en 17-28 (Bijlagen 1-3).

De toename van de verticale druk op de gangenstelsels is voor de meeste uitbreidingen niet meer dan enkele honderdsten van een procent, ten opzichte van de huidige druk ten gevolge van de mergel- en grondbedekking.

De kans op een afname van de pilaarstabiliteit ten gevolge van de belasting door de huisjes is zeer gering.

5. Invloed aardpijpen, andere karstholtes en open boorgaten op de uitbreidingen van Thermae 2000

5.1 Aardpijpen en open boorgaten

Aardpijpen zijn verticale, cilindervormige karstholtes (door oplossing van kalk ontstaan) in de mergel, die met de bovenliggende grond zijn opgevuld. De grond kan bij aansnijding van

de aardpijp door een gangenstelsel in de gangen leegstromen, waarbij direct of later een krater aan het maaiveld kan ontstaan. Dit kan ook gebeuren bij een open boorgat.

Uit [9] bleek dat er 5 aardpijpen waren met een leegstroomgevaar van 4 of 5 binnen een straal van 10 m van de infrastructuur van Thermae 2000. Het ging om aardpijpen 11, 13, 15, 16 en 17 (Bijlage 5), die inmiddels zijn opgevangen.

In de Gemeentegroeve komen onder geen van de huisjes aardpijpen of open boorgaten voor [7].

5.2 Andere typen karstholtes

Karstholtes in Zuid-Limburg kunnen ook in andere vormen dan aardpijpen voorkomen:

1. *Holruimtes langs breuken en diaklazen.* De mergel ontleent zijn permeabiliteit voornamelijk aan discontinuïteiten zoals laagvlakken, breuken en diaklazen. Langs deze discontinuïteiten treedt dan ook eerder oplossing op. Breuken en diaklazen hebben in de mergel van Zuid-Limburg meestal een hellingshoek van 70-90°. Langs deze steile discontinuïtvlakken kan oplossing plaatsvinden, met name in de bovenste 10 m van de mergel. De breedte van deze holruimtes bedraagt meestal 1-20 cm. Het oppervlak van de openruimtes is onregelmatig en grillig gevormd. Ter plaatse van de uitbreidingen van Thermae 2000 is in de Gemeentegroeve één tektonische breuk aangetroffen (Bijlage 6).
2. *Horizontale holruimtes.* Boven relatief impermeabele lagen en in relatief makkelijk oplosbare lagen kan ook oplossing optreden. Hierdoor ontstaan horizontale oplossingsvlakken van enkele cm tot enkele dm dikte, ook met een onregelmatig en grillig oppervlak. In enkele delen van de Sibbergroeve bij Valkenburg komen dergelijke holruimtes veel voor, soms verschillende boven elkaar. De horizontale oplossingsvlakken kunnen zich over meerdere hectares uitstrekken, en zijn dikwijls onderbroken door “eilanden” van niet-opgeloste mergel.
3. *Tunnels.* Vooral waar dergelijke horizontale vlakken breuken en diaklazen snijden, kan de holruimte aanzienlijk in hoogte en breedte toenemen, waardoor een soort tunnel wordt gevormd. Deze zijn meestal slechts enkele dm hoog en niet meer dan enkele meters lang. Er zijn slechts enkele gevallen bekend van tunnels van meer dan 10 m lang en continu met een diameter van enkele dm (bv. Noordelijk Gangenstelsel St.Pietersberg).

4. *Grotten*. Onregelmatig gevormde ruimtes van enkele m hoogte, breedte en lengte door plaatselijke oplossing van kalk.
5. *Karren*. Het gaat hier om spleten met een diepte tot ca. 2 m aan de top van het mergelpakket.

Voor de bouw van het casino van Valkenburg zijn 239 boringen uitgevoerd. Bij 14 van deze boringen zijn karstholtes aangetroffen met een hoogte tot enkele meters [14]. De meeste holtes bevonden zich aan de top van het mergelpakket, en vermoedelijk gaat het hier om karren. Bij de opvulling van ondergrondse ruimtes op een grotere diepte (restholtes van een instortingsgebied in een oud gangenstelsel) zijn ook de karstholtes meegenomen. Uit volumes vulmateriaal bleek dat het om relatief kleine holtes ging. Volgens [14] betekenden de karstholtes hoogst waarschijnlijk geen risico voor de stabiliteit van de ondergrond.

Bij de plannen voor een niet gerealiseerd kuurhotel aan de westkant van de Cauberg zijn in 7 van de 13 boringen mogelijk holtes, met een hoogte van maximaal 2.5 m, aangetroffen. Van één holte kon worden vastgesteld dat het om karst ging. Verder waren de onderzoeksresultaten niet zodanig gedocumenteerd, dat kon worden vastgesteld dat het in alle 7 gevallen werkelijk om holtes ging.

Samenvattend kan worden gesteld dat er een geringe, maar niet geheel uit te sluiten kans op verzakkingen aan maaiveld bestaat ten gevolge van nazakking van grond in zich in aardpijpen of andere karstholtes 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.

6. Instroming van grond ten gevolg van een doorbraak van de mergelbedekking

De mergelbedekking boven de Trichtergroeve is onder de huisjes 11-17 ruim 6 m dik. De kans op een doorbraak van de mergelbedekking en instroming van grond is zeer gering.

7. Geraadpleegde bronnen

Door Thermae 2000 op 21-12-2021, 11-01-2022 en 21-01-2022 aangeleverde documenten:

1. FW ZS123situatie tekening gewicht dormaetini.pdf (mail met oppervlakte en belasting huisjes)
2. ZS123-211026-situatie thermae-bestaand nieuw.pdf
3. ZS123-220121-masterplan thermae 2022-2024.pdf
4. ZS123-220121-situatie nieuw.pdf

Overige literatuur:

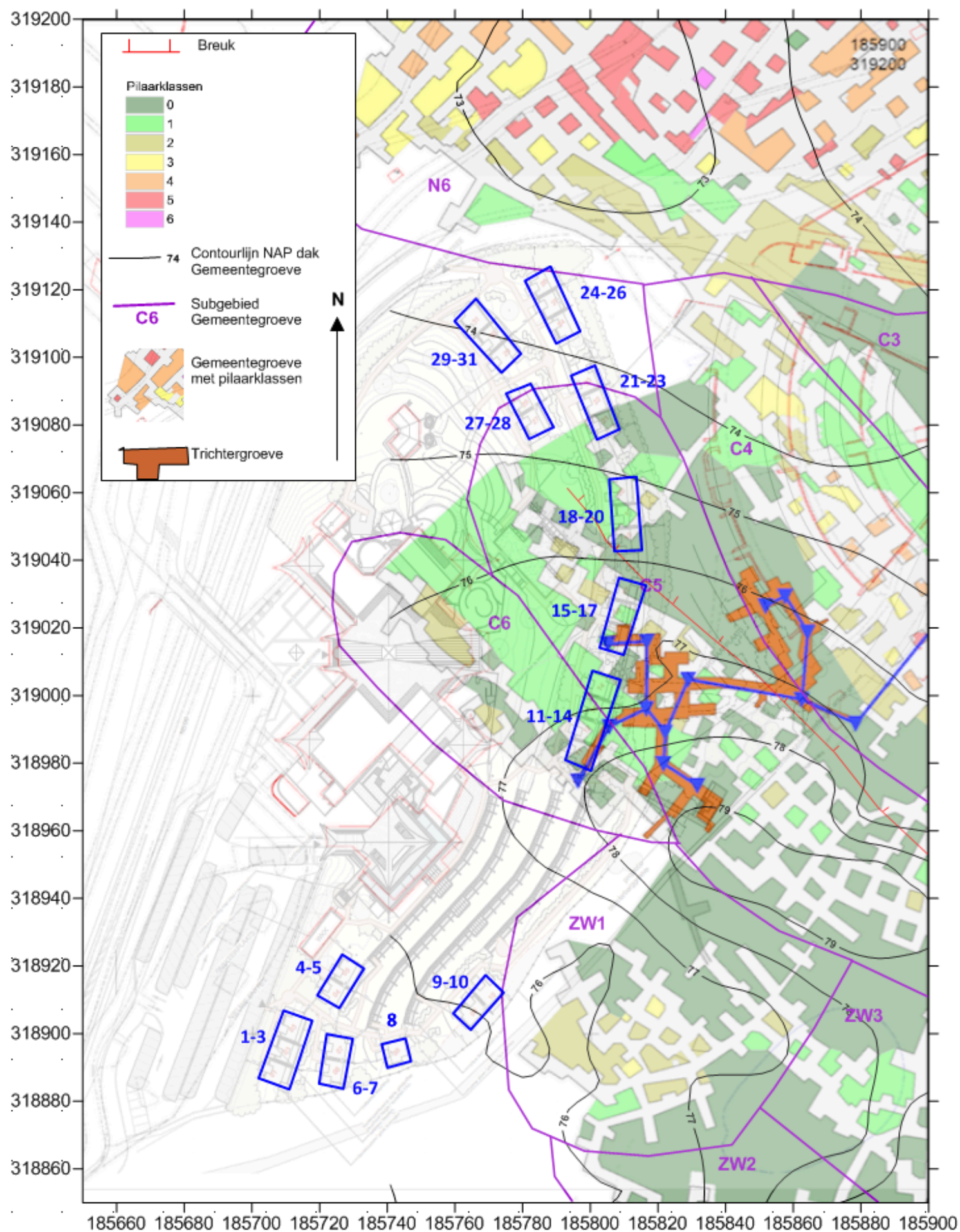
5. R.F. Bekendam (2017) *De stabiliteit van gangenstelsels in verband met uitbreidingen van Thermae 2000*, GeoControl rapport M01703, In opdracht van Thermae 2000 B.V., pp 39
6. R.F. Bekendam (2018) *De stabiliteit van gangenstelsels in verband met uitbreidingen van Thermae 2000_Versie 2018*, GeoControl rapport M01805, In opdracht van Thermae 2000 B.V., pp 40
7. R.F. Bekendam (2008) *Inventarisatie stabiliteit en milieu-onvriendelijke situaties in de Gemeentegroeve en de Monstergrot*, GeoControl rapport M00811, In opdracht van de Gemeente Valkenburg, pp 107
8. R.F. Bekendam (2013) *Inventarisatie van de pilaarstabiliteit en het gevaar voor een grootschalige instorting van de Trichtergrubbe*, GeoControl rapport M01316, In opdracht van de Provincie Limburg, pp 25
9. R.F. Bekendam (2018) *Stabiliteit pilaren en aardpijpen Trichtergroeve*, GeoControl rapport M01824, In opdracht van Thermae 2000 BV, pp 49
10. Verruijt, A. (1999) *Grondmechanica*, Delft University Press, pp 151
11. Bekendam, R.F. (2012) *De stabiliteit van de Gemeentegroeve in verband met de aanleg van het Red Bull Crashed Ice ijsparcours in het Kuurpark*, GeoControl rapport M0121 (pp 59)
12. 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.
13. Waltham, T., Bell, F. & Culshaw, M. (2005) *Sinkholes and subsidence*, Springer, pp. 382.
14. Krapp, L. & Vorwerk, S. (1996) *Kontroll-Bericht zur Verfüllung von Hohlräumen im Untergrund des Casino-Neubaus in Valkenburg/Niederlande*

BIJLAGEN

NB:

- | | |
|-----------|--|
| Bijlage 4 | Trichtergroeven met pilaarklassen (Bijlage 2 uit [9]) |
| Bijlage 5 | Trichtergroeven met aardpijpen (Bijlage 1 uit [9]) |
| Bijlage 6 | Algemene beschrijving van pilaarinstabiliteit en pilaarinstortingen (Bijlage 11 uit [6]) |

Bijlage 1. Plattegrond Gemeentegroeve en Trichtergroeve, met uitbreidingen Thermae 2000_2022



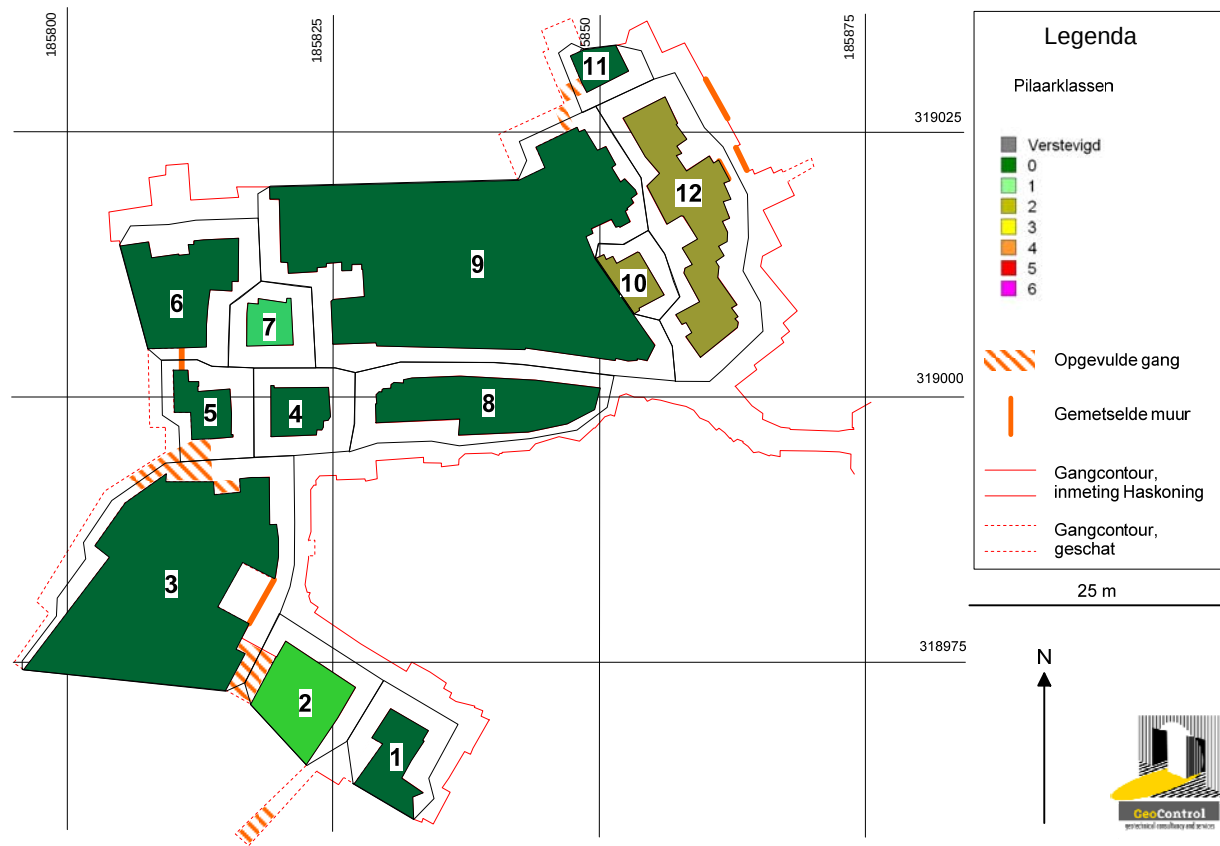
unit weight grond 20000.0
unit weight mergel 16000.0

	Oppervlakte	Totaal gewicht	Druk maaiveld p	NAP mv	NAP gangen	NAP Top mergel	Dikte grond	Dikte mergel	Diepte gangen	Oorspr. druk gangen sigma_0	Toename druk gangen sigma	Toename druk gangen sigma/sigma_0
	m^2	kg	N/m^2	m	m	m	m	m	m	N/m^2	N/m^2	%
11	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
12	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
13	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
14	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
15	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
16	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083
17	50.0	50000	10000	120.0	95.5	102	18.0	6.5	24.5	4.64E+05	385	0.083

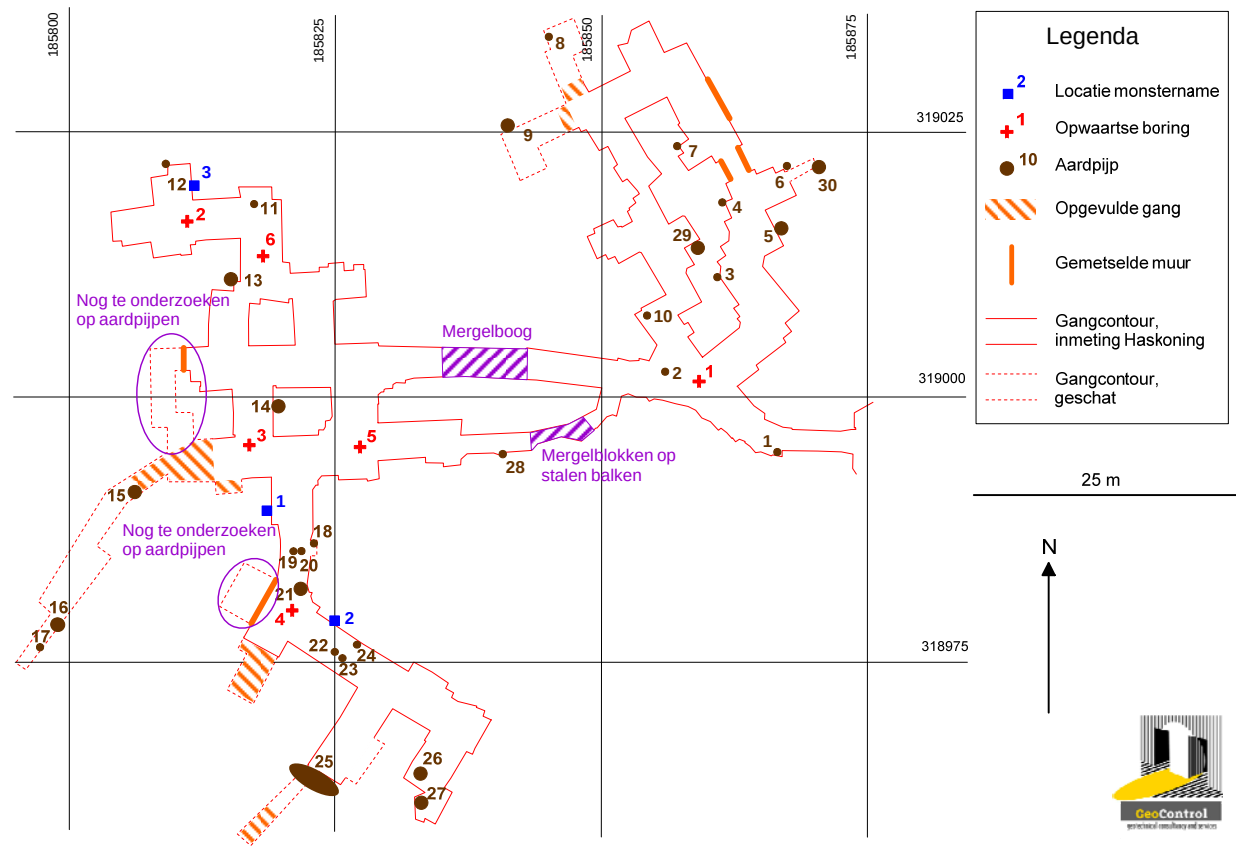
unit weight grond 20000.0
unit weight mergel 16000.0

	Oppervlakte	Totaal gewicht	Druk maaiveld p	NAP mv	NAP gangen	NAP Top mergel	Dikte grond	Dikte mergel	Diepte gangen	Oorspr. druk gangen sigma_0	Toename druk gangen sigma	Toename druk gangen sigma/sigma_0
	m^2	kg	N/m^2	m	m	m	m	m	m	N/m^2	N/m^2	%
11	50.0	50000	10000	120.0	77.5	102	18.0	24.5	42.5	7.52E+05	131	0.017
12	50.0	50000	10000	120.0	77.5	102	18.0	24.5	42.5	7.52E+05	131	0.017
13	50.0	50000	10000	120.0	77.0	102	18.0	25.0	43.0	7.60E+05	128	0.017
14	50.0	50000	10000	120.0	77.0	102	18.0	25.0	43.0	7.60E+05	128	0.017
15	50.0	50000	10000	120.0	76.5	102	18.0	25.5	43.5	7.68E+05	125	0.016
16	50.0	50000	10000	120.0	76.5	102	18.0	25.5	43.5	7.68E+05	125	0.016
17	50.0	50000	10000	120.0	76.0	102	18.0	26.0	44.0	7.76E+05	122	0.016
18	50.0	50000	10000	119.0	76.0	102	17.0	26.0	43.0	7.56E+05	128	0.017
19	50.0	50000	10000	119.0	75.5	102	17.0	26.5	43.5	7.64E+05	125	0.016
20	50.0	50000	10000	119.0	75.0	102	17.0	27.0	44.0	7.72E+05	122	0.016
21	50.0	50000	10000	115.0	74.5	102	13.0	27.5	40.5	7.00E+05	144	0.021
22	50.0	50000	10000	115.0	74.5	102	13.0	27.5	40.5	7.00E+05	144	0.021
23	50.0	50000	10000	115.0	74.0	102	13.0	28.0	41.0	7.08E+05	140	0.020
27	50.0	50000	10000	119.0	74.5	102	17.0	27.5	44.5	7.80E+05	119	0.015
28	50.0	50000	10000	119.0	74.5	102	17.0	27.5	44.5	7.80E+05	119	0.015

Bijlage 2. Pilaarklassen en tributary areas



Bijlage 1. Aardpijpen, boringen, monsterlocaties



BIJLAGE 11: ALGEMENE BESCHRIJVING VAN PILAARINSTABILITEIT EN PILAARINSTORTINGEN

Voor de volledigheid wordt in deze bijlage uiteengezet hoe pilaarinstabiliteit ontstaat en hoe daardoor een klein- of grootschalige instorting kan ontstaan. Verder wordt uitgelegd hoe, op basis van een visuele inspectie, het gevaar voor een instorting kan worden ingeschat. Deze aspecten zijn meer uitgebreid beschreven in eerdere publicaties [1,2].

11.1 Barst- en spatvorming en het bezwijken van pilaren

De mergelpilaren hebben als functie om de druk van de bovengrond op te vangen. Wanneer de gemiddelde verticale druk op een pilaar groter is dan zijn sterkte of bezwijkspanning, zal de pilaar zo ver in elkaar worden gedrukt dat barstvorming optreedt (Fig. 11.1). De barsten beginnen doorgaans dichtbij de hoeken van de pilaar (Fig. 11.2), aan de onder- en/of bovenkant, en kunnen uitgroeien over de gehele pilaarhoogte. Daarnaast veroorzaakt overbelasting het zogenaamde “spatten”, waarbij cm dikke plakken mergel van de pilaarwand loslaten. Een pilaar die door barst- of spatvorming is aangetast, wordt als “deels bezwiken” beschouwd. Uiteindelijk kunnen zich concave breukvlakken vormen, die de zijkanten van de pilaar scheiden van een zandlopervorige pilaarkern. De pilaar is dan “geheel bezwiken”.

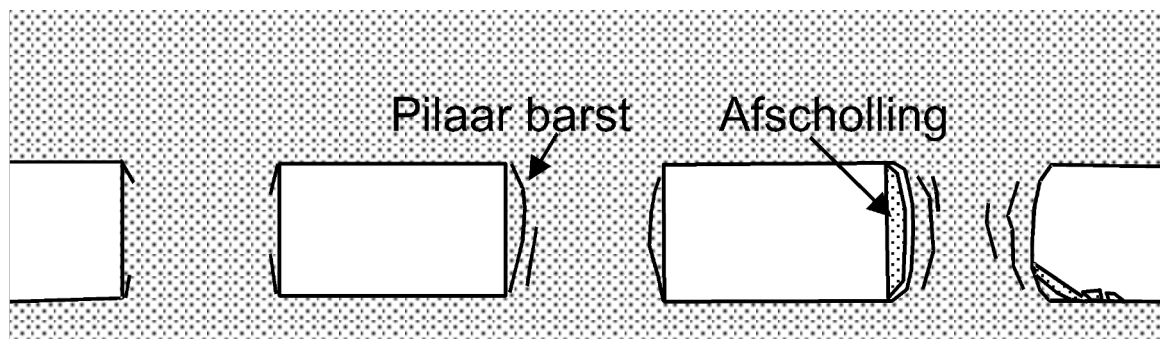


Fig. 11.1 Barst- en spatvorming in pilaren



Fig. 11.2 typische barstvorming op de hoek van een pilaar (Zonneberg vanuit ENCI-groeve)

11.2 Het instorten van pilaren

Een pilaar die is aangetast door barst- en spatvorming verliest een deel van zijn oorspronkelijke draagkracht. Een intacte pilaar heeft een zogenaamde pieksterkte, terwijl een geheel bezwiken pilaar nog slechts een, meestal beduidend lagere, reststerkte heeft (Fig. 11.3). Hoe groter de breedte/hoogte verhouding van een pilaar, hoe hoger zijn piek- en reststerkte. Ook de reststerkte als percentage van de pieksterkte neemt toe met een toename van de breedte/hoogte verhouding.

De verticale ineendrukking van een te zwakke, bezwiken pilaar blijft meestal toch beperkt, omdat de omringende pilaren een deel van de spanning overnemen. Als dit niet zo was, zou de pilaar voor een groot deel in elkaar gedrukt worden (“instorten”, in het Engels “to collapse”). In de meeste gevallen is het instorten van pilaren alleen op grote schaal mogelijk. Dit kan gebeuren wanneer de meeste pilaren in een groot deel van een gangenstelsel zijn bezwiken. Binnen enkele secondes worden dan vele hectares gangenstelsel verwoest. Hierbij speelt het verschijnsel kruip een belangrijke rol. Op het ontstaan van een grootschalige pilaarinstorting wordt in Sectie 11.4 nader ingegaan. In enkele gevallen is echter ook een kleinschalige pilaarinstorting mogelijk. Deze gevallen worden toegelicht in Sectie 11.8.

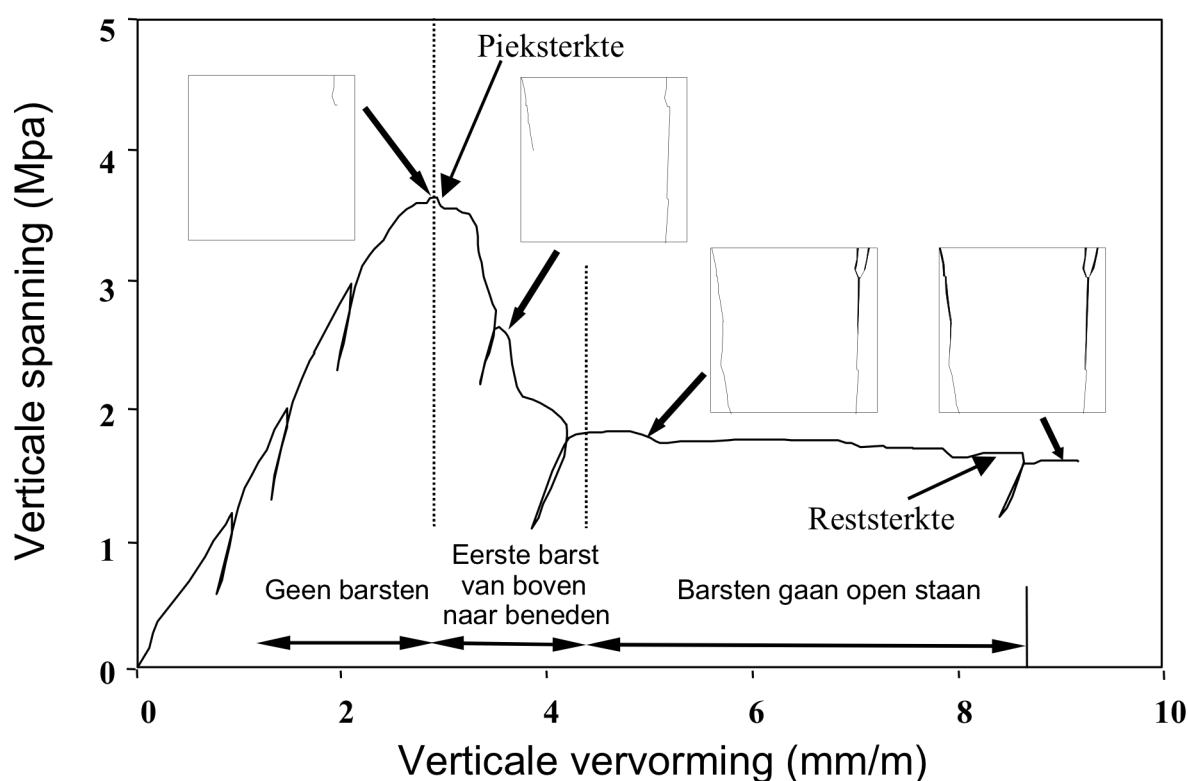


Fig. 11.3 Grafiek van de verticale spanning op een model-pilaar als functie van de verticale vervorming, zoals geregistreerd tijdens een laboratorium-experiment. Hierbij wordt de model-pilaar tussen twee drukplaten met constante snelheid in elkaar gedrukt. De eerste barstvorming treedt op bij het bereiken van de pieksterkte. Daarna vindt verdere barstgroei plaats, waarbij de spanning afneemt tot de reststerkte van de bezwiken pilaar is bereikt (uit [1]).

11.3 Kruip

Kruip kan worden omschreven als geleidelijke vervorming (samendrukking) onder een constante druk. Onder invloed van de min of meer constante druk van de bovengrond kan een mergelpilaar, die eerst intact was, in de loop van de tijd toch langzaam in elkaar worden gedrukt. Wanneer die druk groot genoeg is kan dit bij een bepaalde vervorming uiteindelijk toch leiden tot barstvorming, het bezwijken van de pilaar en verlies aan draagkracht (Fig. 11.4). Met kruip hebben de blokbrekers indertijd geen rekening gehouden. In een aantal gevallen ontstonden pilaren die vlak na de blokbrekers-activiteiten (nog) geen barsten vertoonden en dus sterk genoeg leken te zijn, maar later toch zijn bezwaken.

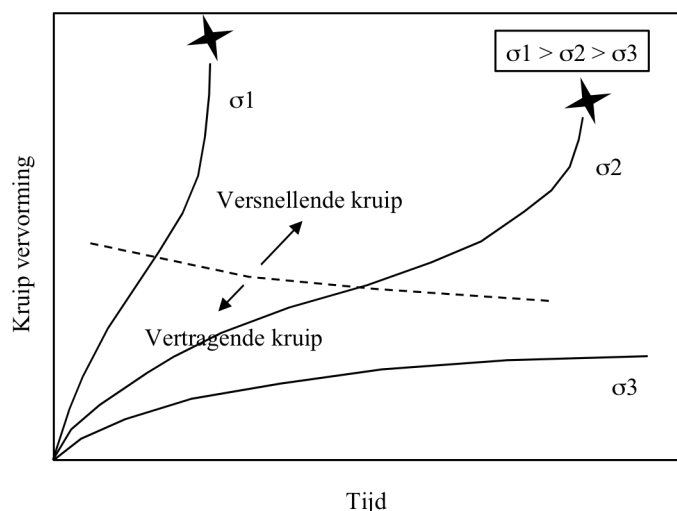


Fig. 11.4 Kruipvervorming van een mergelpilaar, bij een constante verticale druk, als functie van de tijd. Hoe dichtër de druk bij de korte-termijn pieksterkte ligt, hoe hogere kruipsnelheden. Bij een geringe vervorming neemt eerst de kruipsnelheid af. Daarna gaat voor ieder spanningsniveau bij een bepaalde hoeveelheid vervorming de kruipsnelheid weer toenemen, uiteindelijk met bezwijken als gevolg. Bij lage drukken blijft de pilaar in het gebied van vertragende kruip en zal bezwijken niet optreden.

11.4 Grootschalige instortingen ten gevolge van pilaarinstabiliteit

Zoals in Sectie 11.1 is beschreven, verliest een eenmaal bezweken en door barst- en spatvorming aangetaste pilaar een deel van zijn draagkracht. Dit verlies wordt gecompenseerd door een verhoging van de druk op de omringende pilaren, die echter op hun beurt ook weer verder kunnen gaan vervormen met barstvorming als gevolg.

Door dit domino-effect kan uiteindelijk een heel gangenstelsel of een belangrijk deel daarvan verslechteren. Dit kan -in sommige gevallen- leiden tot een grootschalige instorting, waarbij binnen enkele secondes vele hectares gangenstelsel worden verwoest. In het verleden is gebleken dat grootschalige instortingen zijn opgetreden tientallen jaren of zelfs meer dan 100 jaar na het beëindigen van de blokbrekers-activiteiten.

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.

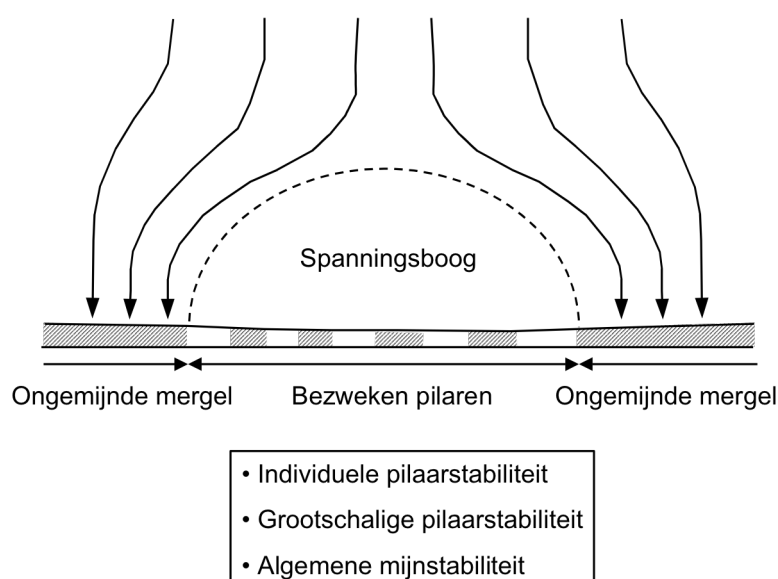


Fig. 11.5 Voor uitleg zie

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 kan, net als voor de individuele pilaarstabiliteit, worden uitgedrukt in een veiligheidsfactor $SF_{tot,0}$, waarbij hier de totale draagkracht van de pilaren samen wordt gedeeld door de totale kracht van de bovenliggende lagen die op die pilaren wordt uitgeoefend.

Voor $SF_{tot,0}$ wordt een waarde van meer dan 2 als voldoende beschouwd. Hierbij is verzwakking ten gevolge van kruip verdisconteerd. De kans op een grootschalige instorting is dan zeer klein. Een waarde van $SF_{tot,0}$ van minder dan 1.5 wordt zonder meer als onvoldoende beschouwd. Van groot belang is dat een gangenstelsel in voldoende deelgebieden wordt opgesplitst, zodat potentiële instortingsgebieden niet gemaskeerd worden door een voldoende $SF_{tot,0}$ waarde voor de gehele groeve.

Bij een onvoldoende grootschalige pilaarstabiliteit moet de algemene mijnstabiliteit 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 (Fig. 11.5). 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

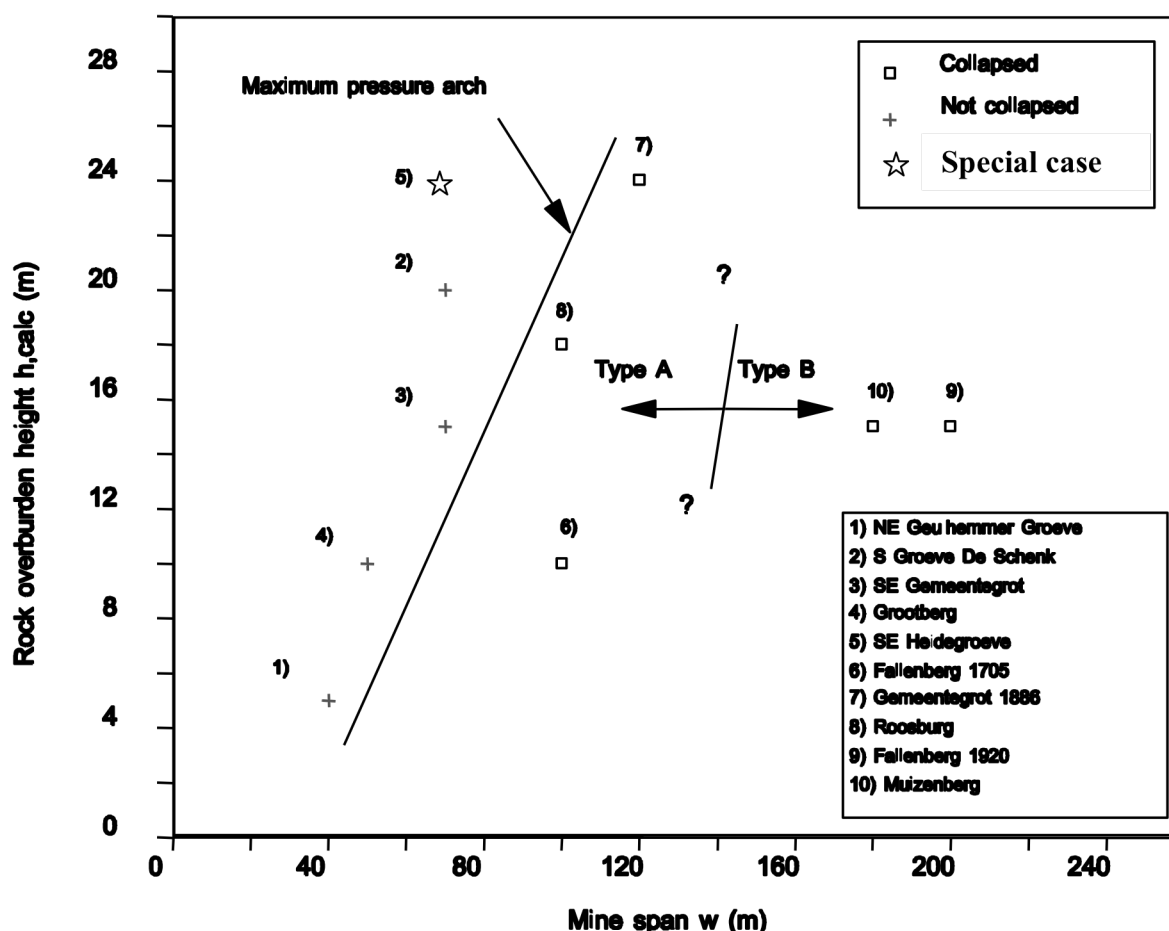


Fig. 11.6 Algemene mijnstabiliteit [1]

afnemende totale overspanning van het gangenstelsel (zie Fig. 11.6). 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 vermoedelijk is ingestort ten gevolge van een instabiel 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 mijnstabiliteit 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 diaklazen en de dikte van de grondlagen, afgezet boven op de mergel, niet beschouwd. Deze figuur moet dus met enige voorzichtigheid worden beschouwd.

Door regelmatige visuele inspectie kan men een grootschalige pilaarinstorting enkele maanden van tevoren aan zien komen. Er is dan binnen een korte periode sprake van een steeds snellere ineendrukking van de pilaren, herkenbaar aan steeds meer en ernstiger barst- en spatvorming. Verder zijn als waarschuwingstekenen het neerddwarrelen van mergelstof uit het plafond en krakende geluiden waargenomen. Vanwege het instortingsgevaar is het voor het vanuit de ondergrond verstevigen van het gangenstelsel dan doorgaans te laat, en moet het gangenstelsel als verloren worden beschouwd. Alleen opvullen van de gangen door boorgaten vanaf het oppervlak is dan nog een optie, wanneer men de bovengrond tegen verzakking wil behoeden.

Tot nu toe zijn minstens tien grootschalige instortingen in Nederland opgetreden. De meest recente grote instorting vond plaats in 1988 in de Heidegroeve bij Valkenburg a/d Geul (0.5 ha). Omdat het gangenstelsel op last van het Staatstoezicht op de Mijnen ontruimd was vielen toen geen slachtoffers. Verder zijn grootschalige instortingen bekend in de Gemeentegroeve (3 maal) en de Sibbergroeve (2 maal) bij Valkenburg, de Fallenberg (2 maal) en Muizenberg bij Kanne en de St.Pietersberg (minstens 3 maal). In België zijn de instortingen van de Roosburg bekend (minstens 2 maal).

11.5 Typen grootschalige pilaarinstortingen

Er kunnen twee typen worden onderscheiden (Fig. 11.7):

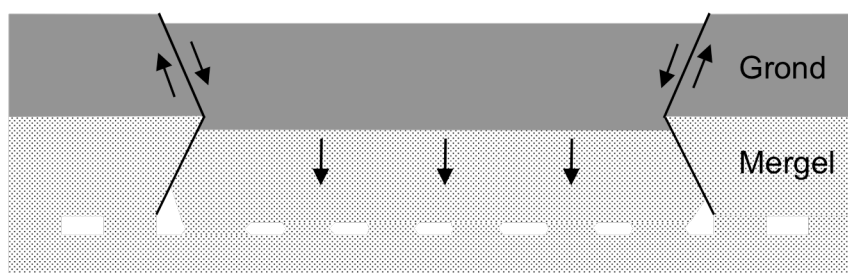
Type A) Het gehele mergeldak beweegt naar beneden langs door de instorting ontstane breuken aan de randen van het instortingsgebied. De breuken hellen van het instortingsgebied af onder een hellingshoek van 60° tot 80° en doorsnijden de mergel van het groevedak tot de top van de mergel. De breuken zijn dus niet van geologische oorsprong, maar ontstaan ten gevolge van spanningsconcentraties aan de rand van het te vormen instortingsgebied. Overigens kan de instorting zich ook voor een deel langs al bestaande zwaktezones bewegen, zoals diaklazen en geologische breuken. Meestal komt het mergeldak als één blok naar beneden, waarbij de onderliggende, voor een groot deel al bezwaken pilaren sterk in elkaar worden gedrukt. Dit type instorting komt het meeste voor. De kans op dit type instorting, ten opzichte van type B, neemt

toe met een toename van de dikte van het complete mergeldak (h_{mergel}) en een afname van de totale overspanning (w) van het in te storten gebied. Tot nu toe is dit type waargenomen voor w/h_{mergel} ratio's van 10 of minder.

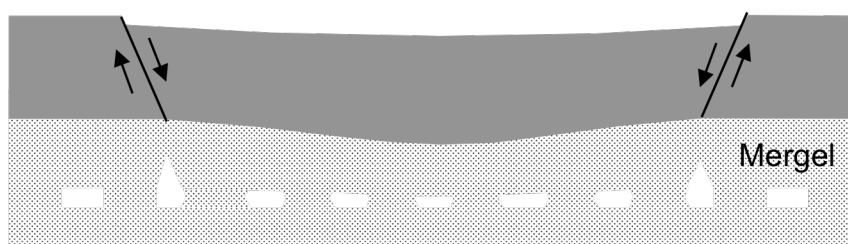
Type B) Hierbij worden geen nieuwe breuken gevormd, maar komt het mergeldak naar beneden als gevolg van doorbuiging. De pilaarverkorting is dus in het midden van het instortingsgebied groter dan aan de randen. Dit type instorting komt voor bij een relatief dun mergeldak en een grote overspanning. Bij de Fallenberg instorting van 1920 en die van de Muizenberg was sprake van dit type en bleek de w/h_{mergel} ratio 12 tot 13 te bedragen.

Bij beide typen instortingen schollen de zijkanten van de pilaren af en worden deze de gangen ingeduwd, waardoor de pilaren behalve zwaar beschadigd, ook breder worden (Fig. 11.8). Verder worden de gangen voor een deel opgevuld met fragmenten uit de pilaren en het dak. Deze opvulling is relatief groot, omdat de puinfragmenten meer ruimte innemen dan het intacte gesteente. Vaak is te zien dat pilaarschollen in de galerij roteren, en dan vast komen te zitten door het snel neerkomende groevedak. Het puin in de gangen steunt de pilaren aan de zijkant, en verder worden de pilaren korter en breder. Hierdoor worden de pilaren weer sterker en komt de instorting tot staan. Meestal blijft er nog enige ruimte over.

Hoofdtypen van grootschalige pilaarinstortingen:



A) Neerwaartse beweging van de bovenliggende lagen langs door de instorting ontstane breuken



B) Neerwaartse beweging van de bovenliggende lagen ten gevolge van doorbuiging van het mergeldak

Fig. 11.7



Fig. 11.8 Enkele dm verkorte pilaar in het inmiddels in 2003 opgevulde gedeelte van het Noordelijk Gangenstelsel

11.6 Pilaarclassificatie

Om de drukschade aan pilaren visueel te beoordelen en kwantitatief te beschrijven, en eventueel om berekende veiligheidsfactoren te kunnen valideren, is een pilaar classificatie systeem ingevoerd [1], dat later verder is verfijnd, waarbij het aantal klassen is uitgebreid van 4 naar 7 [2]. In dit rapport is hier een klasse 7 aan toegevoegd voor pilaren in instortingsgebieden.

In dit systeem zijn pilaren van klasse 0 en 1 respectievelijk niet en nauwelijks door barstvorming aangetast. Het aantal pilaarbarsten, de lengte en breedte daarvan neemt toe van klasse 2 tot klasse 7. Vanaf klasse 4 is sprake van belangrijke scholvorming (meer dan 1 dm dikte en meer dan 1 dm² oppervlak) in de pilaarwanden. Bij pilaren van klasse 5 en 6 is scholvorming opgetreden over respectievelijk een hele pilaarwand en meer dan de helft van het totale pilaaroppervlak. Klasse 7 pilaren zijn bovendien “ingestort” (collapsed), wat wil zeggen dat deze in een instortingsgebied liggen en enkele decimeters in elkaar zijn gedrukt. De verschillende pilaarklassen zijn schematisch weergegeven in Fig. 11.9.

Smalle uitsteeksels van pilaren vertonen veel eerder barstvorming dan de rest van de pilaar en worden in deze classificatie als aparte deelpilaar beschouwd. Verder dient barstvorming ten gevolge van de aanwezigheid van diaklazen buiten beschouwing te worden gelaten.

Binnen een pilaarclassificatie systeem wordt de hoeveelheid verticale indrukking, en de daarbij gepaard gaande horizontale uitzetting, van een pilaar beschreven. Hoe meer indrukking, hoe hoger de pilaarklasse. Uiteraard zal een toenemende pilaarklasse overeen komen met een afnemende veiligheidsfactor. Hierbij moet nog wel rekening worden gehouden met de ligging van een pilaar ten opzichte van het centrum van het stelsel: omdat de doorbuiging van het mergeldak toeneemt van de rand naar het midden van het gangenstelsel, zal, vooral bij een onvoldoende grootschalige pilaarstabiliteit, de pilaarvervorming, en dus ook de pilaarklasse, toenemen naar het centrum van het stelsel.

Pilaar classificatie

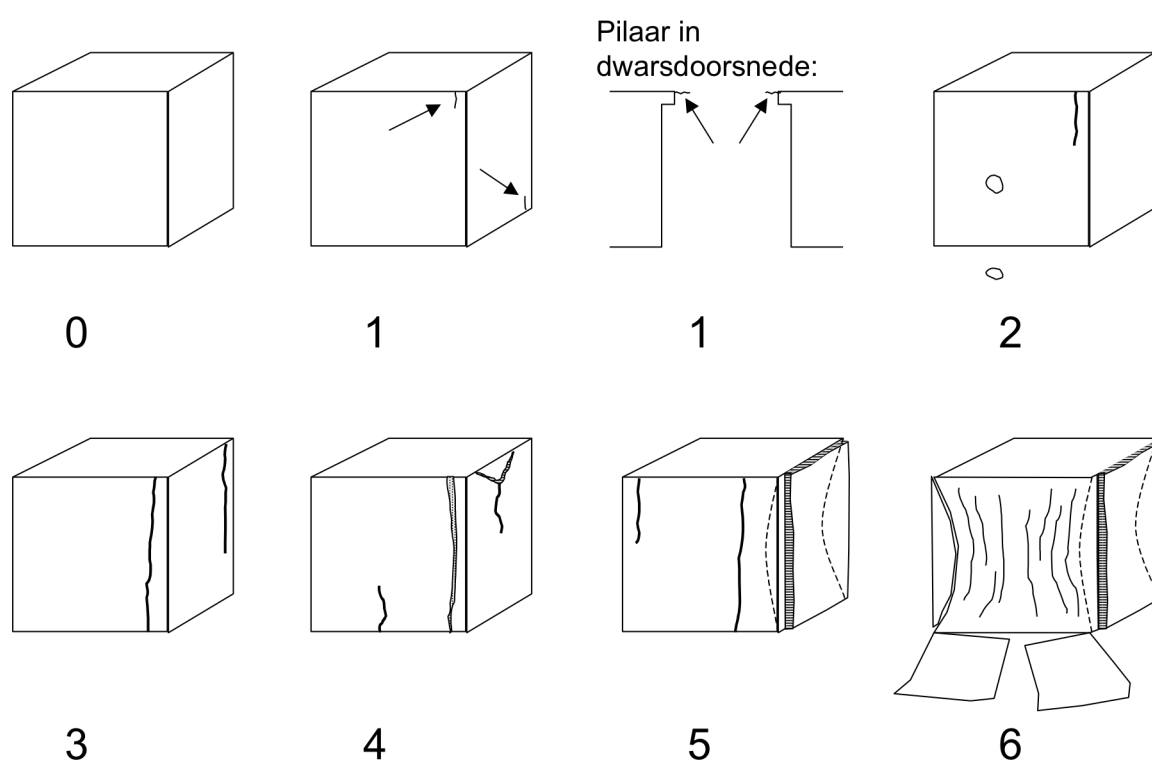


Fig. 11.9 Schematische weergave van het pilaar-classificatiesysteem

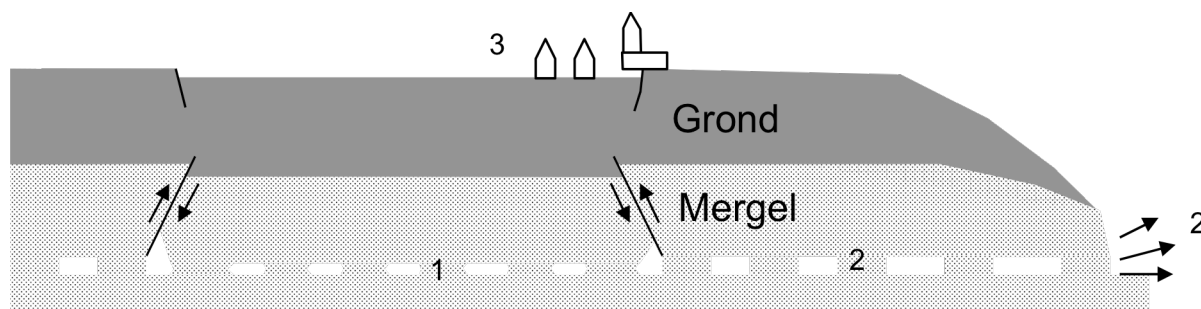


Fig. 11.10 Gevarenczones van een grootschalige instorting.

11.7 Gevaren van grootschalige instortingen

Grootschalige instortingen brengen drie belangrijke gevaren met zich mee (Fig. 11.10):

- 1. Mensen in het instortingsgebied zelf zullen de instorting waarschijnlijk niet overleven.
- 2. Een grootschalige pilaarinstorting gaat altijd gepaard met een zeer zware, vaak dodelijke drukkolf. Ook mensen die zich bevinden in andere delen van het gangenstelsel en zelfs daarbuiten, in de buurt van de ingang, zijn in groot gevaar. Bij de instorting van de Muizenberg bij Kanne (België) in 1926 waren drie van de vijf doden het gevolg van de drukkolf, waarvan twee zelfs buiten de groeve, bij de ingang.
- 3. Boven het instortingsgebied verzakt het oppervlak. Aan de rand van het zakkingsgebied ontstaan doorgaans breuken, met een verplaatsing van enkele decimeters tot meer dan een meter, en instortingskraters. Gebouwen boven deze breuken en kraters kunnen ernstig worden beschadigd of zelfs geheel of gedeeltelijk instorten. Bij een grootschalige dakinstorting zijn de verzakkingen doorgaans dieper dan bij een grootschalige pilaarinstorting, omdat in het eerste geval de gangen over de gehele hoogte met grond worden opgevuld, en er dus, in tegenstelling tot een grootschalige pilaarinstorting, geen vrije gangruimte overblijft. Uit massabalans-berekeningen blijkt dat de maximale bodemdaling v_z gelijk is aan: $v_z = [1-B(1-e)] H$, waarbij B de bulking factor is (de volumeverhouding tussen opgebroken- en intacte mergel), e de extractieratio (volume gewonnen mergel, gedeeld door het volume van de oorspronkelijk aanwezige mergel) en H de pilaarhoogte vóór de instorting. De bulking factor wordt op 1.4 geschat, en de extractieratio is voor de bestudeerde gangenstelsels ca. 0.5-0.6 (50-60 % extractie).

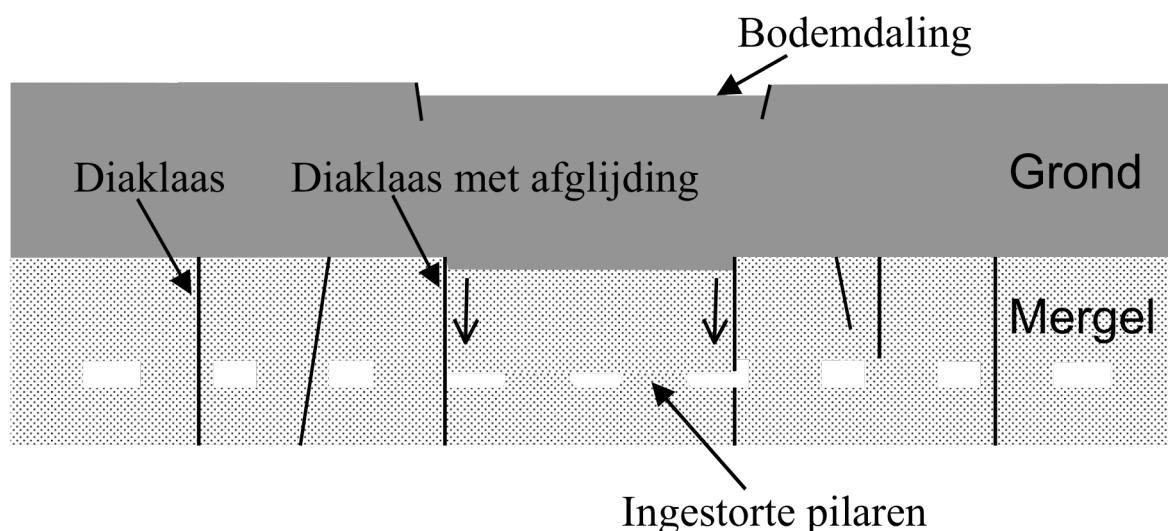


Fig. 11.11 Het instorten van een beperkt aantal pilaren, mogelijk gemaakt door de aanwezigheid van storingen rondom de pilaren.

11.8 Kleinschalige pilaarinstorting, begrensd door al bestaande breuken of diaklazen

Zoals in Sectie 11.2 is opgemerkt, is in de meeste gevallen het instorten van pilaren alleen op grote schaal mogelijk. Er is echter een situatie waarbij een enkele - of een beperkt aantal pilaren kunnen instorten. Dit is het geval wanneer een bezwiken pilaar voor een belangrijk deel is omringd door diaklazen, breuken en/of aardpijpen. [Diaklazen zijn discontinuïteiten binnen het gesteente die zich in een bepaald vlak ontwikkelen, en waarbij geen sprake is van een schuifbeweging langs het vlak. In het geval van tektonische breuken is er juist wel sprake van een schuifbeweging.] Wanneer de schuifweerstand van de diaklaas onvoldoende is, kunnen het complete mergeldak en de bovenliggende deklagen langs de diaklazen naar beneden schuiven en daarbij de pilaar in elkaar drukken (Fig. 11.11). De betreffende pilaren kunnen dan niet tegen instorting worden “beschermd” door omringende sterkere pilaren. Ook een dergelijke instorting gaat altijd gepaard met verzakkingen, begrensd door breuken, aan het maaiveld.

11.9 Literatuur

1. Bekendam, R.F. (1998) *Pillar stability and large-scale collapse of abandoned limestone room and pillar mines in South-Limburg, The Netherlands*, PhD-thesis TU Delft, pp 361
2. Bekendam, R.F. (2000) *Stabiliteitsbepaling ondergrondse mergelgroeven*, GeoControl rapport, Contr.nr. 66141, In opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen, pp 76.