

Beleid Monitoren en Vullen Cavernes Twente

Versie december 2024

Kenmerk: NH20241230



Inhoudsopgave

1. Samenvatting	3
2. Inleiding	4
2.1. Bodemdaling door cavernemigratie in het caverneveld Twenthe-Rijn	4
2.2. Eerdere versies Beleid monitoren en vullen cavernes Twente	5
2.2.1. Good Salt Mining Practice	5
2.2.2. Subsidence Management Policy (SMP) 2008	6
2.2.3. Beleid monitoren en vullen cavernes Twente 2017	6
2.2.4. Beleid monitoren en vullen cavernes Twente update 2022	6
2.3. Ontwikkelingen sinds juni 2022	6
2.4. Context versie december 2024	7
2.5. Leeswijzer	7
3. Risicoanalyse en -beheersing	8
3.1. Risicoanalyse	8
3.2. Risicobeheersing	9
3.2.1. Microseismische monitoring	9
3.2.2. Vijfjaarlijkse sonarmetingen	10
3.2.3. Opvulling cavernes	10
4. Migratiemodel 2024	12
4.1. Aanleiding	12
4.2. Werkwijze en rapportage	12
4.3. Verbeteringen migratiemodel 2024	13
4.3.1. Verbeterde bepaling waarschijnlijkheid (likelihood) van cavernemigratie	13
4.3.2. Verbeterde prognose van het migratieproces	14
4.3.3. Verbeterde prognose van bodemdaling	15
4.4. Impact verbeteringen migratiemodel op risicomatrix	15
4.4.1. F-Classificatie	15
4.4.2. S-Classificatie	16
4.4.3. Aantal niet inherent veilige cavernes	16
5. Eerste stappen analyse impact aan maaiveld	17
5.1. Effect van eventuele schuine migratie	17
6. Toekomstige wijzigingen en actualisatie	21
7. Referenties	21
8. Bijlagen	21

1. Samenvatting

Nobian wint sinds 1933 zout uit het caverneveld Twenthe-Rijn in de omgeving van Hengelo en Enschede. In de eerste twee (van vijf) fasen van ontwikkeling van dit caverneveld werden de cavernes nog niet ontwikkeld volgens de huidige principes waarmee lange termijn stabiliteit van de cavernes geborgd is. In het verleden zijn er cavernes in fase 1 en 2 van het caverneveld gemigreerd (laagsgewijs ingestort) en in een zestal gevallen heeft dit geleid tot aanzienlijke bodemdaling aan het maaiveld. Het sinkhole dat bij put TWR-070 (caverneserie 69-70-71) ontstond in 1991 is hier het meest sprekende voorbeeld van.

Vanaf 2007 voert Nobian (en zijn rechtsvoorgangers) gericht beleid om de vorming van sinkholes of bodemdalingstroggen te voorkomen door cavernes te monitoren en preventief te vullen met kalkslurry. In 2007 was dit de Subsidence Management Policy, in 2017 is dit beleid herzien onder de naam Beleid Monitoren en Opvullen Cavernes Twente (BMVCT). De voorliggende versie is de eerste grote update van het BMVCT. De aanleiding voor de update is dat de belangrijkste acties uit het BMVCT-2017 zijn uitgevoerd.

Door cavernes te vullen wordt het volume kleiner en dooft de eventuele migratie van een caveerne in de diepe ondergrond uit. Er kan dan geen sinkhole of bodemdalingstrog ontstaan. Er zal wel sprake zijn van beperkte bodemdaling als gevolg de deformatie in de diepe ondergrond. Het preventief vullen wordt uitgevoerd op volgorde van risico. Het risico wordt enerzijds bepaald door hoe waarschijnlijk het is dat een caveerne gaat migreren (F-klasse) en anderzijds door de impact aan maaiveld in het geval van volledige migratie (S-klasse).

In 2023-2024 is aan de hand van reconstructies van de migratie van een aantal cavernes die in het verleden gemigreerd zijn, een nieuw migratiemodel opgesteld. Met dit nieuwe migratiemodel 2024 kan beter bepaald worden hoe waarschijnlijk het is dat cavernes gaan migreren, hoe ver deze migratie kan ontwikkelen en hoeveel bodemdaling hierbij ontstaat. Het nieuwe model is complexer dan het oude model, maar sluit daardoor beter aan op de ondergrondse mechanismen en factoren die een rol spelen bij cavernemigratie. Het is daarmee een realistischer model waarin nog steeds conservatieve aannames zitten. Hiermee volgt er ook een nieuwe indeling in de F- en S-klasse. De positie van de cavernes in de risicomatrix is dus opnieuw bepaald door het migratiemodel 2024 toe te passen. Cavernes met een F-klasse van F2 (onwaarschijnlijk) en hoger en een S-klasse S2 en hoger zullen (deels) gevuld worden.

Op basis van deze vernieuwde inzichten blijven er 13 cavernes over die gevuld moeten worden¹.

Uit rapport 4 van de Update Migratie studie [6] blijkt dat er een kalkslurry volume nodig is van minimaal 4.788.375m³ (voorkomen van fase 3 bodemdaling) en een maximaal volume (alle cavernes 80% vulling) van 16.102.483m³. Met een gemiddelde jaarvolumes van kalkslurry van 500.000m³/jaar zal het vullen van de 13 cavernes respectievelijk tussen de zo'n 10 jaar en zo'n 32 jaar in beslag nemen.

¹ De risicomatrix bij deze versie van het Beleid Monitoren en Vullen Cavernes Twente staat in bijlage 1

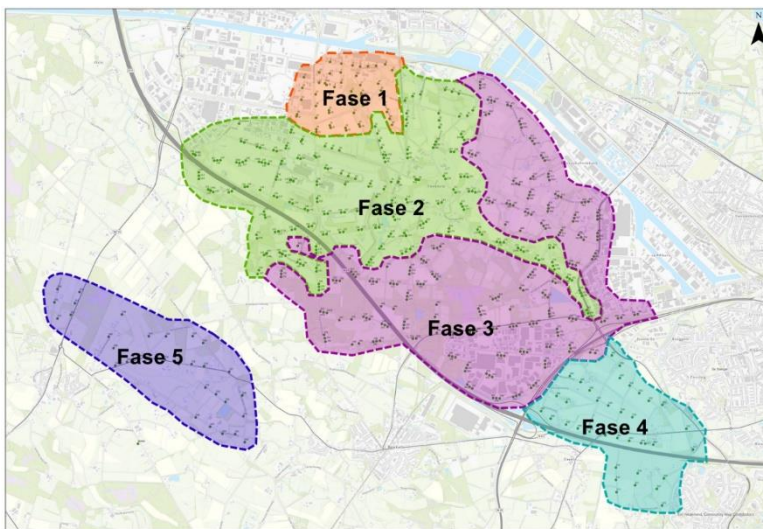
2. Inleiding

2.1. Bodemdaling door cavernemigratie in het caverneveld Twenthe-Rijn

Nobian wint in de omgeving van Hengelo en Enschede sinds 1933 zout uit de ondergrond door middel van oplosmijnbouw. Hierbij worden boorputten aangelegd waarin water wordt gepompt om het steenzout op te lossen. De ruwe pekkel die hierbij ontstaat, wordt vervolgens teruggevoerd naar de fabriek, gezuiverd en ingedampt tot zout. Door het oplossen van zout ontstaan holruimtes, de zogenaamde cavernes, in de ondergrondse zoutlaag. De ontwikkeling van het caverneveld Twenthe-Rijn is op de te delen in vijf fases (zie figuur 1):

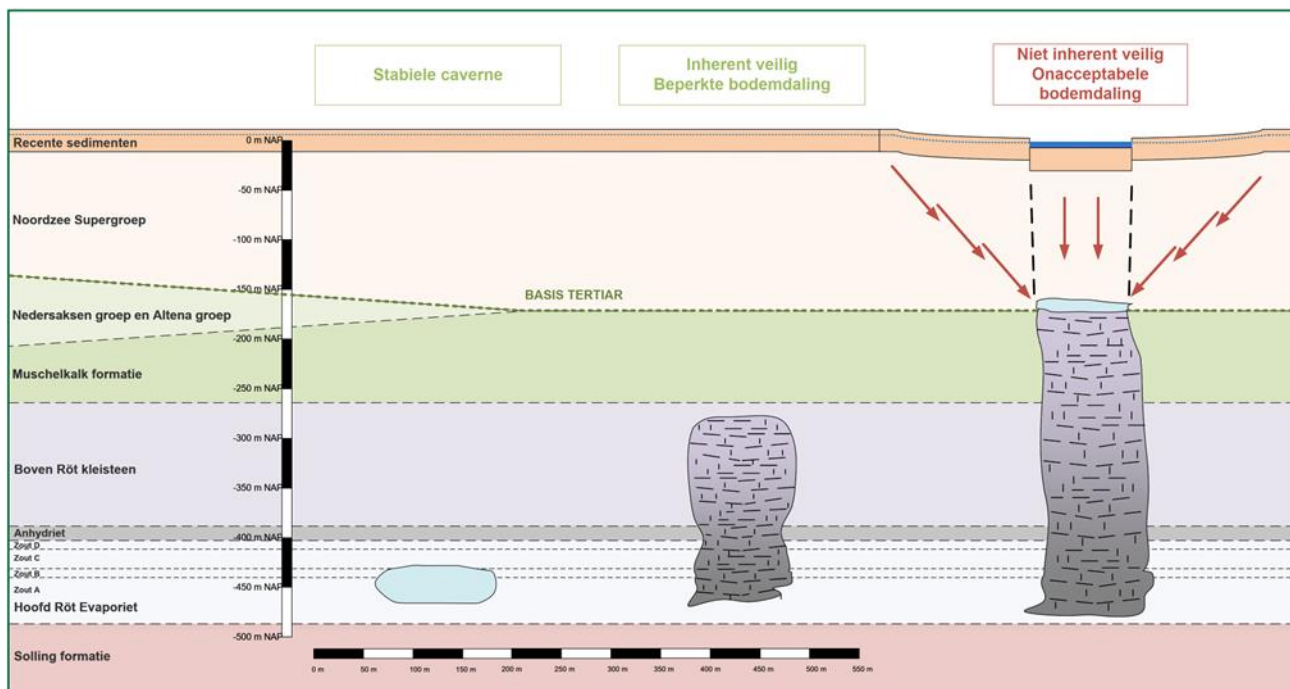
1. 1933-1958: 53 putten van waaruit 42 cavernes zijn ontwikkeld
2. 1958-1975: 226 putten van waaruit 93 cavernes zijn ontwikkeld
3. 1975-2005: 226 putten van waaruit 88 cavernes zijn/worden ontwikkeld
4. 2005-2013: 37 putten van waaruit 36 cavernes zijn/worden ontwikkeld
5. 2013-2020: 31 putten van waaruit tot heden 31 cavernes zijn/worden ontwikkeld

Cavernes waar mogelijk bodemdaling door toekomstige cavernemigratie kan ontstaan bevinden zich in fase 2. Bij de cavernes in fase 1 heeft alle mogelijke migratie al plaatsgevonden en de cavernes in fase 3 en verder hebben een stabiel caverne dak waardoor migratie is uitgesloten.



Figuur 1: Indeling Twenthe-Rijn caverneveld in 5 fases van ontwikkeling

Tussen 1963 en 1991 is op zes locaties in de fase 1 en fase 2 gebieden van het caverneveld bodemdaling ontstaan die bleek te zijn veroorzaakt door migratie van cavernes naar het maaiveld. Bij cavernemigratie is het caverne dak instabiel en breken de gesteentelagen in het dak van de caveerne één voor één af, waarna het gesteente als puin op de bodem van de caveerne valt. Een *stabiel* caverne dak bestaat uit ten minste 5 m zout (uit zoutlaag C) wat ervoor zorgt dat de bovenliggende anhydrietlaag intact blijft waardoor migratie uitgesloten wordt. Wanneer het 5 m veiligheidsdak in zout C en/of de anhydrietlaag aangetast zijn, is de caveerne '*potentieel instabiel*' en kan het dak bezwijken waarmee het migratieproces begint. De caveerne verplaatst (migreert) door de lagen richting het maaiveld. Tijdens dit proces vult de caveerne zichzelf langzaam op omdat het puin van de gesteentelagen meer volume inneemt dan de oorspronkelijke lagen. Het verloop van het migratieproces is afhankelijk van factoren als de grootte en vorm van de caveerne en de sterkte en dikte van de lagen boven de caveerne. In de ondergrond zit een overgang van gesteentelagen (zoals steenzout en kleisteen) in de diepe ondergrond naar grondlagen (zand en klei) in de ondiepe ondergrond. Gesteentelagen hebben een zekere sterkte en het migratieproces door deze lagen neemt zo'n 15 jaar in beslag. Grondlagen zijn veel minder sterk. Wanneer het migratieproces doorgaat tot in deze grondlagen ontstaat er veel meer bodemdaling aan het maaiveld. Een caveerne is dan '*niet inherent veilig*'. Wanneer het migratieproces in de diepe ondergrond uitdooft is de caveerne '*inherent veilig*' en leidt de migratie niet tot aanzienlijke bodemdaling. Ook hiervan zijn een aantal praktijkvoorbeelden bekend. In Figuur 2 zijn een stabiele caveerne, een migrerende inherent veilige en een niet inherent veilige caveerne geïllustreerd in een doorsnede van de ondergrond. De grens tussen gesteente- en grondlagen is aangegeven met 'Basis Tertiair'.



Figuur 2: Stabiele cavernne, inherent veilige cavernne en niet inherent veilige cavernne

Uiteindelijk mondt het migratieproces zonder preventieve maatregelen uit in 1 van de 3 mogelijke vormen van bodemdaling aan het maaiveld:

- **Sinkhole** (bij niet inherent veilige cavernne): een gat in de grond dat meerdere meters diep is en een straal van enkele tientallen meters kan hebben. Hoewel het migratieproces door de diepe ondergrond zo'n 15 jaar duurt, kan een sinkhole binnen een dag ontstaan.
- **Trog** (bij niet inherent veilige cavernne): een met het blote oog duidelijk zichtbaar zakkingsgebied dat in het diepste punt enkele meters diep kan zijn. Ook hier duurt het migratieproces door de diepe ondergrond zo'n 15 jaar. De vorming van de trog gaat over maanden tot een jaar.
- **Kom** (bij inherent veilige cavernne): een met het blote oog niet zichtbaar zakkingsgebied dat in het diepste punt enkele decimeters (tot maximaal 50 cm) diep kan zijn. Het migratieproces is hierbij in de diepe ondergrond uitgedoofd en bereikt de ondiepe grondlagen niet.

Het ontstaan van een sinkhole of trog geeft een mate van bodemdaling die een aanzienlijke impact aan het maaiveld heeft. Daarom worden cavernes waarvoor dit risico bestaat preventief gevuld met kalkslurry. Dit is een restproduct dat ontstaat bij de zuivering van ruwe pekkel bij de zoutfabriek. De kalkslurry wordt in de cavernne gepompt en verdringt daarmee de aanwezige pekkel. De kalkslurry bevat vaste deeltjes die bezinken op de bodem van de cavernne. Hierdoor wordt de cavernne gevuld met vaste stof en wordt het cavernnevolume kleiner. Als vervolgens het migratieproces begint, zal de preventief gevulde cavernne veel minder kunnen migreren dan de cavernne zonder vulling. Het preventief vullen van cavernes is erop gericht om het migratieproces in de diepe ondergrond te laten uitdoven en zo te voorkomen dat het kan leiden tot een sinkhole of trog. Cavernes die niet inherent veilig zijn, worden op deze manier inherent veilig gemaakt.

2.2. Eerdere versies Beleid monitoren en vullen cavernes Twente

2.2.1. Good Salt Mining Practice

Naar aanleiding van het ontstaan van bodemdaling door cavernemigratie zijn onderzoeken naar de oorzaken uitgevoerd. Deze hebben in 2004 geleid tot het vaststellen van richtlijnen voor de ontwikkeling van stabiele en veilige cavernes, de zogenaamde Good Salt Mining Practice (GSMP). Als onderdeel van de winningsplannen

van Nobian voor het caverneveld Twenthe-Rijn zijn de GSMP richtlijnen ook onderschreven door Staatstoezicht op de Mijnen en het Ministerie van Economische Zaken. De cavernes in fase 3, 4 en 5 van het caverneveld voldoen aan GSMP richtlijnen. Cavernes waar nog migratie zou kunnen plaatsvinden, zitten in fase 2 van het caverneveld.

2.2.2. Subsidence Management Policy (SMP) 2008

Om de risico's van de potentieel instabiele cavernes te bepalen en maatregelen vast te stellen, werd de Stuurgroep Bodemdaling door Zoutwinning in Twente opgericht, waaraan de verschillende overheden en Nobian deelnamen. De stuurgroep concludeerde in 2008 dat persoonlijke ongevallen als gevolg van migrerende cavernes kunnen worden uitgesloten omdat jaren van te voren kan worden voorzien wanneer bodemdaling zou kunnen ontstaan. Het ontstaan van significante materiële schade kon niet worden uitgesloten. De stuurgroep deed de volgende aanbevelingen om schade te voorkomen:

- Eens per vijf jaar monitoren van potentieel instabiele cavernes met sonar om te controleren of de caveerne niet is begonnen met migreren
- Openboren van niet toegankelijke cavernes die mogelijk ook potentieel instabiel en niet inherent veilig zijn
- Preventief opvullen van potentieel instabiele cavernes in de nabijheid van Rijksweg 35
- Onderzoek naar alternatieve vulmaterialen om het opvullen te versnellen

2.2.3. Beleid monitoren en vullen cavernes Twente 2017

Het Beleid monitoren en vullen cavernes Twente (BMVCT) is opgesteld toen vrijwel alle aanbevelingen uit het SMP 2008 waren opgevolgd. Voor iedere caveerne is een risicoanalyse gedaan die gevalideerd is door Deltares. Elke caveerne heeft daarmee een F-classificatie (Frequency) gekregen die aangeeft hoe groot de kans op cavernemigratie is en een S-classificatie (Severity) die het effect van cavernemigratie aangeeft. De F- en S-classificatie bepalen de positie van de caveerne in de risicomatrix. Daarnaast is er middels bowtie-diagrammen een risicobeheersmethode opgesteld voor het preventief vullen van cavernes en het vullen van meerdere tegelijk migrerende cavernes. In het BMVCT 2017 zijn de volgende maatregelen opgenomen:

- Continue (24/7) monitoring van eventuele cavernemigratie door middel van een microseismisch meetnet.
- Opvullen (weer inherent veilig maken) van cavernes op volgorde van risico.
- Verder onderzoek naar de migratie van cavernes en het gedrag van de vulstof in de cavernes.
- Het afsluiten van het fase 1 gebied van het caverneveld.

2.2.4. Beleid monitoren en vullen cavernes Twente update 2022

De update van het BMVCT in 2022 betrof vooral een aanpassing van de risicoanalyse van een aantal cavernes op basis van nieuw beschikbaar gekomen informatie. Voorbeelden zijn nieuwe informatie over de cavernevorm uit nieuwe sonarmetingen en gewijzigde bodemdalingsprognoses die daarbij horen. Daarnaast waren de cavernes 60 en 86 onder het terrein van Twence opnieuw toegankelijk gemaakt middels de nieuw geboorde putten TWR-062A en TWR-087A. Tot slot is er een beslisboom voor opvolging bij microseismische trillingen toegevoegd op basis van ca. 5 jaar ervaring met microseismische monitoring.

Het onderzoek naar migratie van cavernes met als doel het model voor cavernemigratie te verbeteren was op dat moment in de opstartfase. Het gedrag van slurry in cavernes op basis van lab-experimenten en veldtesten in gevulde cavernes was grotendeels uitgevoerd, maar nog niet afgerond. Voor het afsluiten van de laatste twee putten in het fase 1 gebied (TWR-023 en TWR-ON1) waren voorbereidende werkzaamheden gaande.

2.3. Ontwikkelingen sinds juni 2022

In 2023 en 2024 is er door Relnvent en K-Utec in samenwerking met Nobian intensief gewerkt aan het verbeteren van de kennis van cavernemigratie op basis van informatie van cavernes die in het verleden gemigreerd zijn. Vervolgens is het model om eventuele toekomstige migratie van cavernes te voorspellen aanzienlijk verbeterd, evenals de bijbehorende bodemdalingsprognoses. De resultaten van het onderzoek naar kalkslurry in gevulde cavernes zijn ook opgenomen in het verbeterde model. Hoofdstuk 4 bevat een uitgebreide toelichting op het nieuwe 'migratiemodel 2024'.

Voor de nog af te sluiten putten TWR-023 en TWR-ON1 in het fase 1 gebied zijn de laatste werkzaamheden en onderzoeken in 2024 uitgevoerd. Het abandonneren (afsluiten) van deze putten volgt in de komende jaren.

Een aantal cavernes hebben op basis van nieuwe metingen een andere positie in de risicomatrix gekregen. Dit betreft de risicomatrix die gebaseerd is op het oude migratiemodel. Het gaat om:

- Cavernes waar migratie is geconstateerd (metingen in put TWR-072 en TWR-106-107). Deze zijn afgescheiden van de delen van de cavernes die niet gemigreerd zijn (TWR-75 en -76 en TWR-104-105). De gemigreerde delen komen niet meer in de matrix voor, omdat geen sprake meer is van een kans.
- Cavernes die gevuld zijn met kalkslurry (caverne 132). Deze heeft nu S-classificatie S1.
- Cavernes die op basis van nieuwe sonarmetingen niet inherent veilig bleken conform het oude migratiemodel (180, 231, 256, 285, 311, 399 en 428). Deze bleken alsnog inherent veilig (S-classificatie S1) volgens het nieuwe migratiemodel. Omdat 285, 311, 399 en 428 stabiele cavernes uit fase 3 van de caverneveld ontwikkeling zijn, wijken ze niet meer af van de rest van het fase 3 gebied en zijn ze niet meer in de matrix opgenomen.

2.4. Context versie december 2024

In deze versie 'december 2024' worden de ontwikkelingen meegenomen die omschreven staan in paragraaf 2.3. De belangrijkste wijziging is het toepassen van het nieuwe migratiemodel inclusief het gedrag van slurry in een caverne. Dit zorgt bij een aantal cavernes voor een wezenlijk ander beeld van de kans op cavernemigratie (F-classificatie) en hoe ver de migratie kan ontwikkelen (belangrijk voor de bepaling van de S-classificatie). Momenteel wordt er nog gewerkt aan een verbetering van de impactanalyse waarmee de definitieve S-classificatie per caverne bepaald kan worden. Hiervoor wordt een nieuwe scoringsmethodiek ontwikkeld die een verbetering is van de methodiek die in 2016/2017 door Deltares is opgesteld. Deze werkzaamheden lopen nog door tot in de eerste maanden van 2025. Aan het einde van het eerste kwartaal van 2025 zal een update geleverd worden met daarin de definitieve S-classificatie volgens de nieuwe scoringsmethodiek.

In deze versie december 2024 wordt dus al wel rekening gehouden met de F-classificatie en berekening van het mogelijke migratietraject volgens het nieuwe migratiemodel. De S-classificatie is nog gebaseerd op de classificatie volgens de Deltares methodiek [1], maar hierbij zijn wel de bodemdalingsprognoses uit het nieuwe migratiemodel gebruikt.

2.5. Leeswijzer

In hoofdstuk 3 wordt toegelicht hoe risicomanagement Nobian-breed toegepast wordt en hoe dit van toepassing is op bodemdaling door cavernemigratie. Hoofdstuk 4 is gewijd aan het verbeterde model voor cavernemigratie. In hoofdstuk 4.4.3 worden de eerste stappen van de impactanalyse aan maaiveld beschreven. In hoofdstuk 6 wordt omschreven hoe dit beleid in de toekomst zal worden gewijzigd en geactualiseerd.

3. Risicoanalyse en -beheersing

3.1. Risicoanalyse

In Nobians Cavern Stability and Integrity Management System CSIMS [2] is omschreven hoe risicoanalyses Nobian-breed worden uitgevoerd. Dit beleid sluit daar zo goed mogelijk op aan. In de basis bestaat een risicoanalyse uit 4 stappen:

1. Identificatie van het gevaar.
2. Bepaling risico door F- en S-classificatie toe te kennen aan de ongemitigeerde situatie.
3. Identificatie van mogelijke preventieve en mitigerende maatregelen die het risico verlagen.
4. Bepaling restrisico door F- en S-classificatie toe te kennen aan de gemitigeerde situatie.

Dit beleid is de invulling van het CSIMS met als doel het ontstaan van een sinkhole of bodemdalingstrog aan het maaiveld, als gevolg van een migrerende caveerne, te voorkomen. Het ontstaan van een sinkhole of trog is dus het te beheersen risico. Op dit moment zijn er geen cavernes actief aan het migreren. Zolang een caveerne niet migreert, kan er geen sinkhole of trog ontstaan. Als een caveerne wel migreert, is het afhankelijk van de ondergrondse situatie of dit tot een sinkhole of trog kan leiden. Vervolgens is het afhankelijk van de bovengrondse situatie hoe ernstig de gevolgen van een sinkhole of trog kunnen zijn.

De F-classificatie (frequency) geeft aan hoe groot de waarschijnlijkheid is dat een caveerne kan migreren. Dit is volledig afhankelijk van ondergrondse factoren zoals de sterkte en vorm van het cavernedak. De F-klasse varieert van F0 (extreem onwaarschijnlijk) tot F6 (zeer waarschijnlijk). In Tabel 1 is per F-klasse aangegeven wat de kwalitatieve omschrijving is van de bijbehorende waarschijnlijkheid. In het migratiemodel 2024 is per caveerne met een likelihood-score aangegeven hoe groot de waarschijnlijkheid is dat een caveerne begint met migreren. De likelihood-score varieert tussen 0 en 8 en wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4. In Tabel 1 is aangegeven welke likelihood-score bij welke F-klasse hoort.

F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Extreem onwaarschijnlijk	Zeer onwaarschijnlijk	Onwaarschijnlijk	Beperkt	Mogelijk	Waarschijnlijk	Zeer waarschijnlijk
Likelihood-score 0 en 1*	Likelihood-score 1* en 2	Likelihood-score 3	Likelihood-score 4	Likelihood-score 5	Likelihood-score 6 tot 8	Actief migrerende cavernes

Tabel 1 Kwalitatieve omschrijving waarschijnlijkheid per F-klasse, * in paragraaf 4.3.1 wordt toegelicht hoe likelihood-score 1 in F0 en F1 wordt ingedeeld

De S-classificatie (severity) is in eerste instantie afhankelijk van ondergrondse factoren die bepalen of de migratie van een caveerne tot een sinkhole of trog kan leiden. Dit wordt inzichtelijk gemaakt met het migratiemodel 2024. Vervolgens bepaalt de bovengrondse situatie hoe ernstig de gevolgen van een sinkhole of trog zijn. Voor dit onderdeel van de S-classificatie wordt voorlopig nog de methodiek toegepast die in 2016-2017 met Deltares is opgesteld [1] en waarnaar verwezen wordt als de 'Deltares methodiek'. In Tabel 2 is per klasse de mate van impact aangegeven.

S4	Sinkhole of trog leidt tot schade aan meerdere gebouwen en/of meerdere vitale infrastructuur, en/of de bodembeschermende folie onder de stortlocaties van Twence
S3	Sinkhole of trog leidt tot schade aan een gebouw, vitale infrastructuur, of de bodembeschermende folie onder de stortlocaties van Twence
S2	Sinkhole of trog geeft schade aan bijvoorbeeld een weiland / niet vitale infrastructuur
S1	Migratie leidt niet tot een sinkhole of trog

Tabel 2: Omschrijving S-classes Deltares Methodiek

Het migratiemodel 2024 bepaalt dus per caveerne of de S-klasse S1 is of hoger. Als de S-classificatie hoger is dan S1 wordt vervolgens met de Deltares methodiek bepaald of de S-classificatie S2, S3 of S4 is. Hierbij worden de bodemdalingsprognoses volgens het nieuwe migratiemodel gebruikt.

De combinatie van de F- en S-klasse bepaalt de positie van een caveerne in de risicomatrix, zie Tabel 3. Cavernes die in de rode vakken komen, worden met hoge prioriteit gevuld. Cavernes in de donkergele vlakken hebben een lagere prioriteit en komen aan de beurt nadat de cavernes in de rode vlakken gevuld zijn. Daarna komen de cavernes in de lichtgele vlakken aan de beurt. Cavernes in groene vlakken hoeven niet

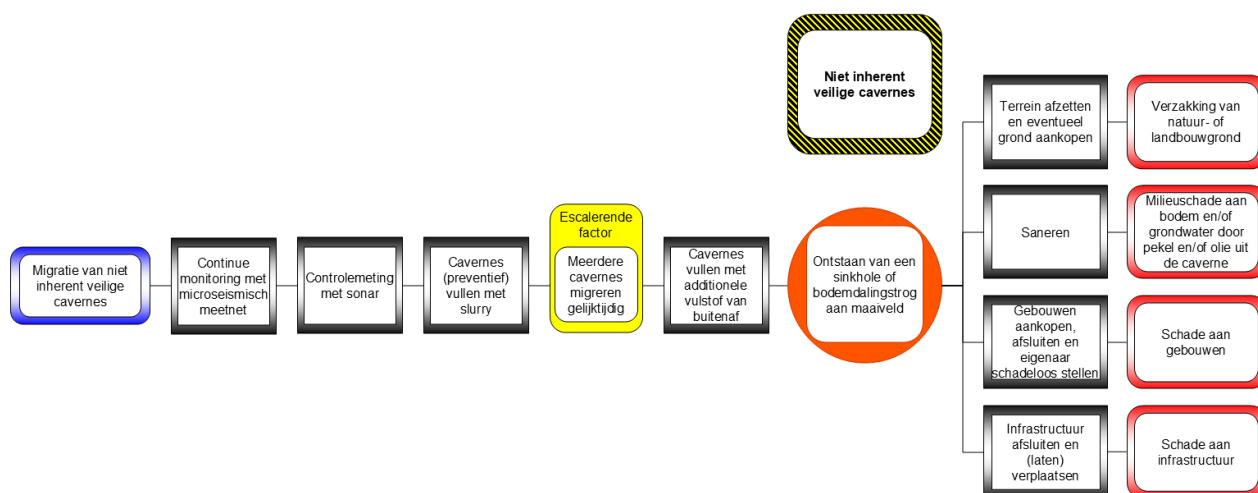
gevuld te worden. Bijlage 1 bevat de ingevulde risicomatrix. In de loop van de jaren kan de situatie per caveerne veranderen. Bijvoorbeeld op basis van een nieuwe sonarmeting of na het afronden van het vullen van een caveerne. In hoofdstuk 6 staat omschreven hoe dergelijke wijzigingen in dit beleid worden verwerkt.

S4							
S3							
S2							
S1							
	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6

Tabel 3: Risicomatrix

3.2. Risicobeheersing

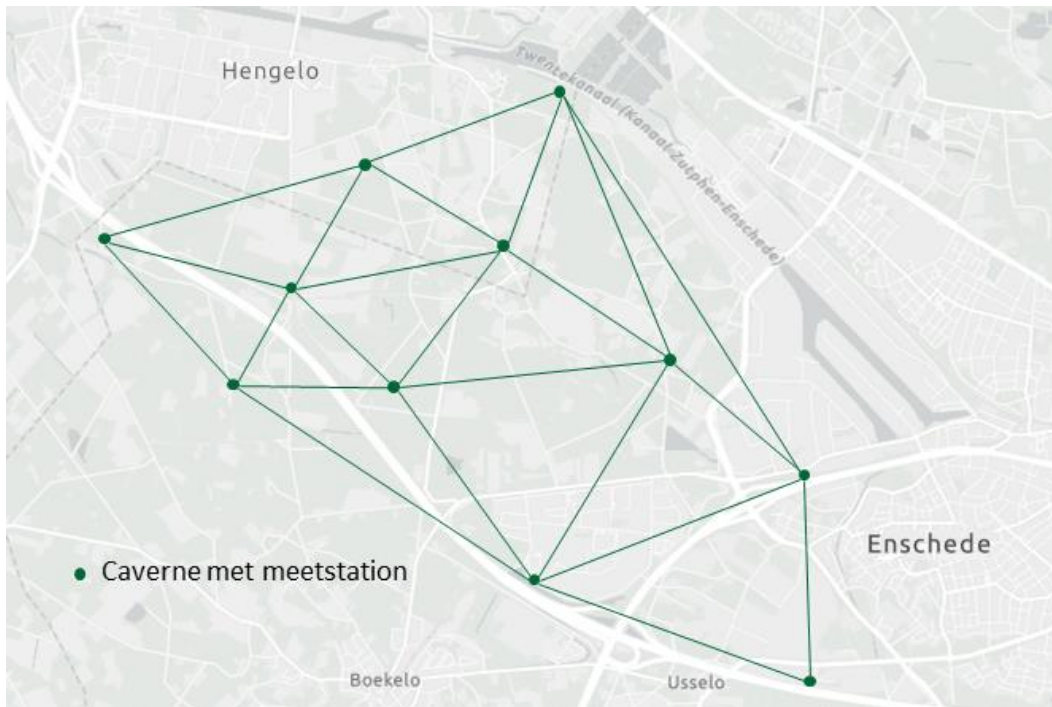
De beheersing van het risico op een sinkhole of bodemdalingstrog wordt weergegeven in de vorm van een bowtie-diagram, zie Figuur 3. In de bow tie terminologie is het gevaar de niet inherent veilige cavernes in de ondergrond. Dit staat in het zwart/geel gearceerde blok in Figuur 3. De kritieke gebeurtenis / top event (oranje cirkel) is het ontstaan van een sinkhole of trog aan het maaiveld. De bedreiging of oorzaak (blauw blok) is migratie van niet inherent veilige cavernes. Wanneer een caveerne begint met migreren duurt het ca. 15 jaar voordat er uiteindelijk een sinkhole of trog aan het maaiveld ontstaat. In de tussenliggende periode zitten een 'barrières' (zwarte blokken) die ingezet worden om te voorkomen dat de migratie van de caveerne tot een sinkhole of trog leidt. De eerste twee, microseismische monitoring en vijfjaarlijkse sonarmetingen, zijn erop gericht om migratie tijdig te signaleren. In paragraaf 3.2.1 en 3.2.2 wordt hier nader op ingegaan. De volgende barrière is het vullen van een caveerne met kalkslurry. Dit wordt al preventief gedaan op volgorde van het risico. Als een niet inherent veilige caveerne begint met migreren, zal deze met voorrang gevuld worden. Indien er dusdanig veel cavernes tegelijkertijd migreren (escalerende factor) dat de vulling met kalkslurry niet toereikend is, kan een vulstof van een externe bron aangevoerd worden. De mitigerende maatregelen van het opvullen van cavernes wordt nader toegelicht in paragraaf 3.2.3.



Figuur 3: bow tie van de risicobeheersing voor het ontstaan van een sinkhole of trog

3.2.1. Microseismische monitoring

Door middel van een microseismisch meetnet wordt continu gemonitord of één van de niet inherent veilige cavernes begint te migreren. In 2016 is het meetnet gestart in een proefopstelling met drie meetpunten. Sinds begin 2018 is het meetnet met 10 meetstations volledig in gebruik voor monitoring van niet inherent veilige cavernes. In 2023 is het meetnet nog uitgebreid met 3 locaties rondom het gebied waar nog actief pek wordt gewonnen. Een kaart met alle meetstations is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Locatie van de microseismische meetstations

Het meetnet is in staat om verschillende types seismische trillingen waar te nemen, te weten:

1. Een geomechanische trilling: een beweging langs een bestaand, vaak natuurlijk breukvlak of een laagovergang.
2. Het ontstaan van een barst in het gesteente boven, onder of tussen de cavernes

De meetapparatuur met toebehoren wordt geleverd en onderhouden door de firma K-UTEC uit Sondershausen in Duitsland. K-UTEC heeft jarenlange ervaring met dit type monitoring in zoutmijnen, bruinkoolmijnen en cavernevelden. De resultaten worden bij K-UTEC geïnterpreteerd en vervolgens aan Nobian gerapporteerd.

Nadat een trilling aan Nobian gerapporteerd is, onderneemt Nobian vervolgstappen aan de hand van een beslisboom (bijlage 2). Afhankelijk van het aantal en type trillingen en de sterkte kan overgegaan worden tot het uitvoeren van een sonarmeting. Daarnaast communiceert Nobian actief over de gemeten trillingen met de toezichthouder, eventuele stakeholders en het publiek. Afhankelijk van de aard en sterkte van de trilling en de risicoclassificatie van de betreffende caverne, vindt de communicatie plaats op korte termijn (binnen dagen) of via kwartaalrapportages.

3.2.2. Vijfjaarlijkse sonarmetingen

Bij de niet inherent veilige cavernes wordt iedere 5 jaar een sonarmeting uitgevoerd. Hiermee wordt de vorm van de caverne in kaart gebracht en vergeleken met de voorgaande meting(en) om te zien of er veranderingen zijn. De bevindingen van deze vergelijking worden samengevat in een 'stabiliteitsrapport'. Microseismische trillingen kunnen er toe leiden dat er eerder controlemetingen worden uitgevoerd. Voor de vijfjaarlijkse termijn wordt altijd gekeken naar de laatst uitgevoerde meting. Voorbeeld: Een caverne is in 2023 gemeten volgens het vijfjaarlijkse interval. In 2024 wordt er een controlemeting uitgevoerd naar aanleiding van microseismische trillingen. De volgende vijfjaarlijkse meting wordt dan doorgeschoven naar 2029. Vanzelfsprekend kunnen microseismische trillingen er in de tussenliggende periode voor zorgen dat er eerder dan 2029 een meting wordt uitgevoerd.

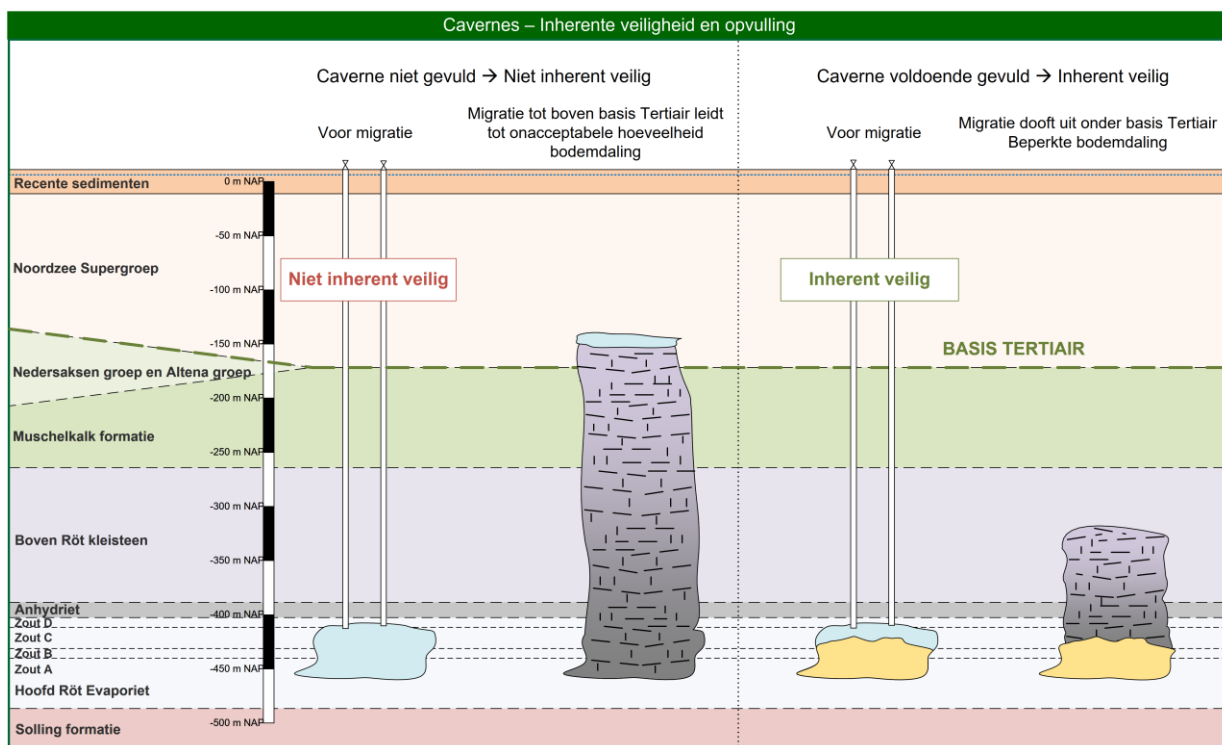
3.2.3. Opvulling cavernes

Vanaf de jaren 1940 worden uitgeproduceerde cavernes opgevuld met kalkslurry uit het zoutproductieproces. Vanaf 2005, direct na de totstandkoming van de Good Salt Mining Practice, wordt de kalkslurry gericht ingezet

om niet inherent veilige cavernes preventief op te vullen. De kalkslurry wordt in de caveerne gepompt en verdringt daarmee de aanwezige pekel. De kalkslurry bevat vaste deeltjes die bezinken op de bodem van de caveerne. Hierdoor wordt de caveerne gevuld met vaste stof en wordt het cavernevolume kleiner. Als vervolgens het migratieproces begint, zal de preventief gevulde caveerne minder ver kunnen migreren dan de caveerne zonder vulling. Dit is geïllustreerd in Figuur 5. Het preventief vullen van cavernes is erop gericht om het migratieproces in de diepe ondergrond te laten uitdoven en zo te voorkomen dat het kan leiden tot een sinkhole of trog. Op deze manier wordt een niet inherent veilige caveerne preventief inherent veilig gemaakt.

Wanneer toch één of enkele cavernes zouden gaan migreren dan zou dit zonder tegenmaatregelen kunnen leiden tot bodemdaling en bijbehorende milieuschade. Dit kan voorkomen worden door de vulling met kalkslurry gericht uit te voeren in de migrerende caveerne(s). Deze beheersmethode is geldig zolang niet meer cavernes tegelijk migreren dan tijdig met kalkslurry van Nobian Hengelo opgevuld kunnen worden (momenteel maximaal vier).

Het worst-case scenario houdt in dat vijf of meer cavernes tegelijk gaan migreren. Dit is afgeleid van de gemiddelde vultijd per caveerne om inherente veiligheid te bereiken (2,5 tot 3 jaar) en het tijdpad van migratie van een caveerne van huidige diepte naar het maaiveld (10-15 jaar). In dat geval kunnen ze niet meer allemaal tijdig met kalkslurry kunnen worden opgevuld om bodemdaling te voorkomen. Dankzij het micro-seismisch meetnet wordt migratie vanaf het begin waargenomen en heeft Nobian de volle 10-15 jaar om maatregelen te nemen. De kans dat vijf of meer cavernes tegelijk gaan migreren is verwaarloosbaar klein, omdat in de periode 1958-2024 er in totaal slechts zes fase 2 cavernes gemigreerd zijn. Mocht de worst-case situatie zich toch voordoen dan zal bodemdaling voorkomen worden door de inzet van additioneel vulmateriaal naast kalkslurry. Mocht zelfs dat niet voor alle cavernes lukken dan verschuift de focus van het ten allen tijde voorkomen van bodemdaling naar het minimaliseren van de eventuele effecten. Per caveerne die niet tijdig gevuld zou kunnen worden, worden dan gerichte schadebeperkende maatregelen genomen.



Figuur 5: Schets van voor en na het migratieproces van een niet inherent veilige caveerne (links) en een caveerne die dankzij vulling inherent veilig is (rechts).

4. Migratiemodel 2024

4.1. Aanleiding

Het migratiemodel waarmee de afgelopen tientallen jaren gewerkt is, hier het 'oude migratiemodel' of 'Bekendam-algoritme' genoemd, was op diverse vlakken zeer conservatief. Uit diverse observaties in het caverneveld was bekend dat cavernes die volgens het oude migratiemodel kunnen migreren, vele tientallen jaren en tot op heden onveranderd zijn gebleven. Het migratiemodel gaat er vanuit dat alle cavernes waar niet over de volledige breedte van het cavernedak het 5 m dikke veiligheidsdak in zout C intact is, kunnen migreren. Daarnaast is van cavernes die wel gemigreerd zijn bekend dat ze niet altijd zo ver zijn gemigreerd als verwacht werd op basis van het oude migratiemodel. Het oude model gaat ervan uit dat wanneer een caveerne slechts op 1 punt zodanig hoog is dat deze niet inherent veilig is, migratie altijd zal leiden tot een sinkhole of trog. Dit uitgangspunt levert een simpel model op, maar het is ook zeer conservatief. Het gevolg is dat er volgens dit model vele tientallen cavernes gevuld moeten worden voordat ze voor de lange termijn veilig afgesloten kunnen worden.

Aspecten die niet in het oude migratiemodel zaten zijn:

- Hoeveel zout en anhydriet er nog in het cavernedak zit voorafgaand aan migratie, met andere woorden: de daadwerkelijke situatie van het cavernedak
- Invloed van de cavernevorm op het migratieproces
- Delaminatie (het doorbuigen van gesteentelagen boven de puinkolom, waardoor deze lagen uiteindelijk op de puinkolom rusten en niet meer afbreken)
- Het gedrag van slurry in een caveerne tijdens migratie

Daarnaast rekende het oude model met een zeer conservatieve bulking factor van 1,11. Daarvan kon Nobian op basis van steeds meer nieuwe informatie (o.a. boring TWR-87A bij Twence) vaststellen dat dit geen realistische waarde was.

Het onderzoek naar cavernemigratie met als doel het verbeteren van het model voor cavernemigratie was in het tweede kwartaal van 2022 opgestart door GeoControl (Roland Bekendam), de maker van het oude migratiemodel. Roland Bekendam kwam echter door een tragisch ongeval om het leven in de zomer van 2022. Het onderzoeksproject liep daarom vertraging op. Uiteindelijk ging Reinvent begin 2023 in samenwerking met K-Utec van start met het project. Eind 2024 is het nieuwe migratiemodel (migratiemodel 2024) opgeleverd.

4.2. Werkwijze en rapportage

De aspecten die in de vorige paragraaf genoemd zijn, zijn bestudeerd voor 10 cavernes die in het verleden gemigreerd zijn en waar relatief veel gegevens van bekend zijn. Het gaat om de cavernes 15, 30-31, 33-34-35-36, 37, 49-50, 64-65, 69-70-71, 72-75-76-77, 86-87-87A en 106-107. Een aantal van deze cavernes was met slurry gevuld. Het onderzoek bij deze cavernes bestond uit 3 stappen:

1. Reconstructie van de uitloging van de caveerne om de cavernevorm voorafgaand aan migratie te bepalen. Niet bij alle cavernes was namelijk een sonarmeting beschikbaar van de situatie na afloop van het uitloog- of vulproces.
2. Reconstructie van het migratieproces op basis van sonarmetingen, boorgatmetingen en notities in de boorboeken.
3. Het reconstrueren van de bodemdaling tijdens het migratieproces op basis van historische meetreeksen.

Dit leidde tot een nieuw migratiemodel (het BJP (Bekendam-Jakob-Pinkse) algoritme) dat geprojecteerd is op de cavernes die volgens het oude migratiemodel potentieel instabiel en niet inherent veilig waren. Voor deze groep cavernes is bepaald:

- Hoe waarschijnlijk het is dat de cavernes gaan migreren (likelihood).
- Hoever het migratieproces zich kan ontwikkelen (leidt het tot een sinkhole/trog of blijft het beperkt tot een kom).
- Hoeveel bodemdaling er kan ontstaan als gevolg van de migratie.

Het migratiemodel 2024 is opgeleverd in de vorm van 4 rapporten:

- Report 1: Fundamental principles concerning cavern migration in the TWR brinefield [3]
Hierin staan de basisprincipes omschreven omtrent de historische uitloging, opvulling, migratie en bodemdaling die tijdens het bestuderen van de 10 cavernes vastgesteld zijn.
- Report 2: Description of the updated algorithm to predict subsidence by migration [4]
Hierin staat het BJP (Bekendam-Jakob-Pinkse) algoritme omschreven waarmee het migratieproces en de bijbehorende bodemdaling berekend worden voor cavernes die (nog) niet gemigreerd zijn.
- Report 3: Validation of the input parameters by the assessment of migration behaviour of migrated caverns and determination of the likelihood of migration [5]
Hierin is de reconstructie van de 10 gemigreerde cavernes uitgeschreven. Hiermee wordt onderbouwd dat het BJP algoritme gebruikt kan worden voor het gehele gebied. Dit rapport bevat tevens de omschrijving van de likelihood-score
- Report 4: Subsidence predictions for potential future migration and recommendations on mitigative action by means of backfilling [6]
Dit rapport bevat de uitgangspunten en resultaten per caverne waarvoor de toekomstige migratie en bodemdaling bepaald is met het BJP algoritme

4.3. Verbeteringen migratiemodel 2024

Voor een uitgebreide omschrijving van het onderzoek naar cavernemigratie en het migratiemodel 2024 dat hieruit ontstaan is wordt verwezen naar de hierboven genoemde rapportages. In deze paragraaf worden de belangrijkste bevindingen en uitkomsten kort toegelicht.

4.3.1. Verbeterde bepaling waarschijnlijkheid (likelihood) van cavernemigratie

Uit het onderzoek naar de gemigreerde cavernes is gebleken dat deze cavernes een aantal factoren gemeen hebben waardoor ze konden migreren. Aan deze factoren is een score toegekend om voor de (nog) niet gemigreerde cavernes te kunnen bepalen in welke mate deze factor aanwezig is. De factoren en de bijbehorende scores zijn opgenomen in Tabel 4.

Factor: Hydraulische radius (HR)			
Toelichting: De hydraulische radius is de verhouding tussen de oppervlakte en de omtrek van het cavernedak op de diepte van de onderkant van het 5 m veiligheidsdak in zout C. Gemigreerde cavernes hebben een hydraulische radius van 20 m of meer.			
HR = 0 → score 0	0 < HR < 10 → score 1	10 < HR < 15 → score 2	HR > 15 → score 3
Factor: Blootstelling anhydrietlaag			
Toelichting: Het zout direct onder de anhydrietlaag is belangrijk voor de stabiliteit van het cavernedak. Als er geen zout meer aanwezig is onder de anhydrietlaag, dan is deze blootgesteld			
Nee → Score 0	Waarschijnlijk → score 1	Ja → score 2	
Factor: Anhydrietlaag in contact met water			
Toelichting: Door contact met water wordt anhydriet omgezet in gips. Dit leidt tot verzwakking en scheurvorming in het dak. Wanneer er geen of zeer weinig afdekmiddel is gebruikt als mijnbouwhulpstof, is een blootgestelde anhydrietlaag in contact geweest met water			
Nee → Score 0	Waarschijnlijk → score 1	Ja → score 2	
Factor: Aanwezigheid van breuken			
Toelichting: Breuken kunnen invloed hebben op de sterkte van de anhydrietlaag en het migratieproces door de lagen boven het zout beïnvloeden. De aanwezigheid van breuken is echter niet overal bekend of aangetoond. Deze factor wordt daarom niet als bepalend gezien.			
Nee → score 0	Ja → score 1		

Tabel 4: Factoren en scores berekening likelihood cavernemigratie

Door de score voor alle factoren op te tellen wordt de totale likelihood-score berekend. De vertaling van de likelihood-score naar de F-classificatie is omschreven in paragraaf 4.4.1. De F-classificatie wordt hiermee dus bepaald aan de hand van de factoren waarvan in het onderzoek is gebleken dat ze bepalend zijn voor het optreden van migratie. Dit maakt de beoordeling per caverne complexer, maar wel realistischer omdat de achterliggende mechanismen worden meegenomen.

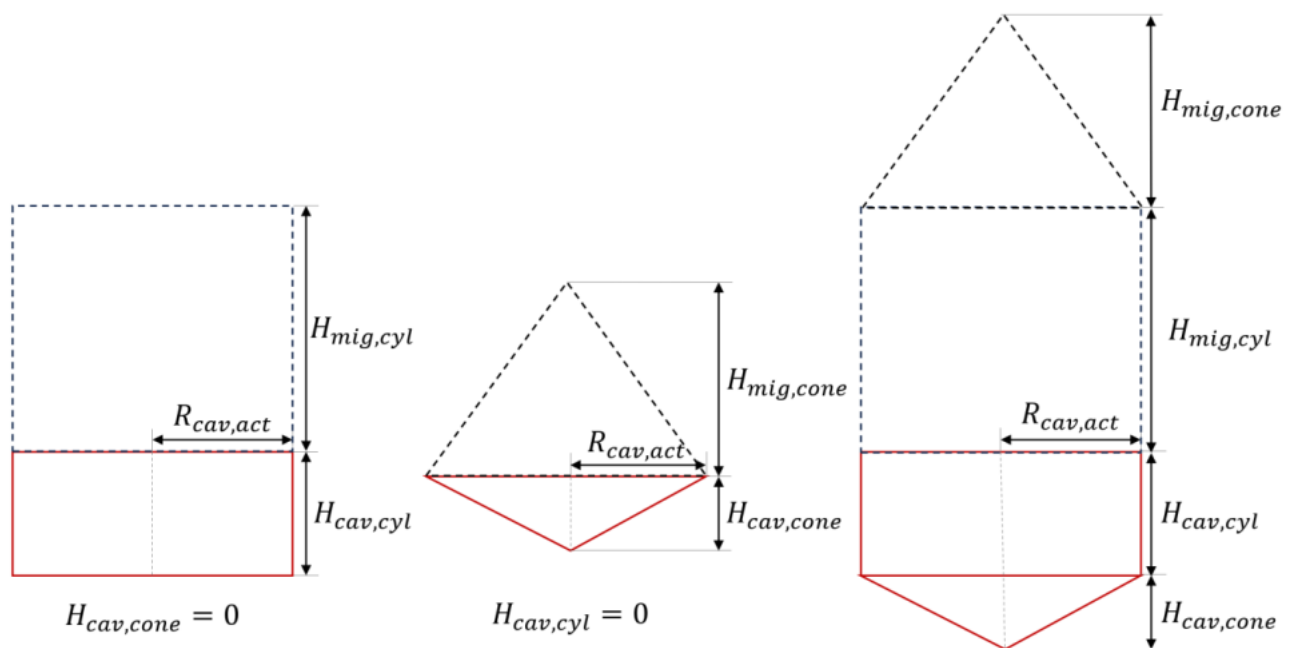
4.3.2. Verbeterde prognose van het migratieproces

Invloed van cavernevorm op het migratieproces

In het oude migratiemodel werd de vorm van de caverne voorafgaand aan migratie versimpeld tot een representatieve hoogte. Met deze hoogte en de bulking factor werd bepaald tot hoever de caverne kon migreren. Er werd uitgegaan van verticale migratie. Dat wil zeggen dat de breedte van de migratiekolom over het hele migratietraject constant is. Uit de reconstructie van gemigreerde cavernes is gebleken dat de cavernevorm belangrijk is om het migratietraject goed te kunnen reconstrueren en dat de breedte van de migratiekolom gedurende migratie kan afnemen. Daarom wordt in het migratiemodel 2024 gewerkt met 3 representatieve cavernevormen. Deze vormen zijn omschreven in Tabel 5 en hierin staat ook hoe de diameter van de migratiekolom verandert over het migratietraject. Figuur 6 illustreert de representatieve cavernevormen en het bijbehorende migratietraject.

Representatieve cavernevorm	Diameter migratiekolom
Cilinder	Gelijk aan diameter representatieve caverne en constant over het migratietraject
Omgekeerde kegel	Gelijk aan diameter van het grondvlak van de kegel bij de start van migratie en afnemend naar 0 tot de top van het migratietraject
Omgekeerde kegel + cilinder	Gelijk aan diameter representatieve caverne en constant over het cilindrische deel van het migratietraject en afnemend naar 0 tot de top van het migratietraject.

Tabel 5: representatieve cavernevormen en diameter bijbehorend migratietraject



Figuur 6: Representatieve cavernevormen migratiemodel 2024 - links: cilinder, midden: omgekeerde kegel, rechts: omgekeerde kegel + cilinder, uit ref **Error! Reference source not found.**

Bulking factor

Uit de reconstructie van gemigreerde cavernes is gebleken dat wanneer gerekend wordt met een bulking factor van 1,20, dit het beste overeenkomt met het waargenomen migratietraject. Het effect van het verhogen van de bulking factor is dat het cavernevolumen gedurende het migratieproces sneller afneemt. Migratie dooft dan op grotere diepte uit. In het migratiemodel 2024 geeft de bulking factor weer hoe het volume van gebroken en gedelamineerd gesteente uit het cavernedak meer ruimte inneemt dan de intacte lagen. In het oude migratiemodel was de bulking factor 1,11 en was deze waarde impliciet een combinatie van daadwerkelijke bulking en de compactie van kalkslurry onder het gewicht van een puinkolom. Deze waarde geeft daarom voor cavernes waarin geen kalkslurry zit, een te conservatieve reconstructie van het migratietraject. In het nieuwe migratiemodel zijn deze twee effecten, bulking van gebroken en gedelamineerd

gesteente enerzijds en het gedrag van slurry in een caveerne anderzijds, onafhankelijk van elkaar meegenomen.

Delaminatie

Gedetailleerd onderzoek aan gamma-metingen in de putten van gemigreerde cavernes [7]**Error! Reference source not found.** laat zien dat er boven de puinkolom een zone zit waar de gesteentelagen al iets vervormen (doorhangen) als gevolg van de migratie dieper in de ondergrond. Wanneer het doorhangende gesteente op de puinkolom rust, zal het niet meer verder afbreken en zal migratie stoppen. Dit effect is in het migratiemodel 2024 verwerkt door de bovenkant van het migratietraject te definiëren als de bovenkant van de gedelamineerde lagen of 'yielded zone'. In de bulking factor van 1,20 is dit meegenomen.

Gedrag van slurry

Uit onderzoek naar het gedrag van slurry door middel van lab- en veldtesten [8] is voor het migratiemodel afgeleid [3] dat er bij vulling met kalkslurry met 3 aspecten rekening gehouden moet worden:

1. Compactie van kalkslurry onder het eigen gewicht nadat het in de caveerne is gebracht.
In het migratiemodel 2024 wordt rekening gehouden met 15% consolidatie onder eigen gewicht
2. De bovenste laag kalkslurry is niet goed gecompacteerd en biedt minder weerstand tegen indringend puin.
In het migratiemodel 2024 wordt de bovenste 2 m van de kalkslurryberg niet meegerekend als volume dat weerstand biedt tegen indringing van vallend gesteente. Dit is conservatief omdat het gebaseerd is op indringingstesten met een puntbelasting (buisenstreng) in gevulde cavernes.
3. De samendrukking van kalkslurry wanneer het gewicht van de puinkolom op de berg kalkslurry drukt, tijdens en na afloop van migratie.
In het migratiemodel 2024 wordt rekening gehouden met 30% samendrukking door de belasting van de puinkolom.

Met bovenstaande factoren wordt rekening gehouden in de berekening van het volume kalkslurry dat nodig is om een caveerne zodanig te vullen dat migratie niet meer kan leiden tot een sinkhole of trog. Overall is het conservatief om het op deze manier in de berekening te implementeren. Dit is nader toegelicht in paragraaf 2.3 van [4].

Door de implementatie van bovengenoemde aspecten is het migratiemodel 2024 ook hierin complexer dan het oude model, maar wel realistischer. Het leidt daarom tot een betrouwbaardere berekening van de mogelijke migratie bij cavernes die nog niet gemigreerd zijn.

4.3.3. Verbeterde prognose van bodemdaling

Naast het mogelijke migratietraject, berekent het BJP algoritme ook hoeveel bodemdaling er kan ontstaan als gevolg van migratie. In het oude migratiemodel was er voor inherent veilige cavernes een maximale hoeveelheid bodemdaling berekend die afhankelijk was van de diameter van de caveerne. Er was geen (herleidbare) relatie met de cavernehoogte terwijl deze bepalend is voor hoe ver een caveerne kan migreren en dus hoeveel deformatie er in de ondergrond plaatsvindt. In het migratiemodel 2024 wordt de hoogte van de caveerne wel meegenomen in de berekende hoeveelheid bodemdaling. Dit betekent in vrijwel alle gevallen dat de berekende hoeveelheid bodemdaling bij migratie van inherent veilige cavernes groter is dan volgens het oude migratiemodel.

4.4. Impact verbeteringen migratiemodel op risicomatrix

4.4.1. F-Classificatie

Met het introduceren van de likelihood-score kan beter beoordeeld worden hoe waarschijnlijk het is dat een caveerne in de toekomst gaat migreren. Uit de likelihood-score is een doorvertaling gemaakt naar de F-klassen in Tabel 1 die binnen geheel Nobian gehanteerd worden.

Hoge waarschijnlijkheid

Allereerst is geconstateerd dat cavernes waarvan de migratie gereconstrueerd is een likelihood-score van 6 of hoger hebben. Van cavernes die nog niet gemigreerd zijn en ook een likelihood-score van 6 of hoger hebben is geconcludeerd dat migratie 'waarschijnlijk' is (klasse F5). Er is niet voor 'zeer waarschijnlijk' (klasse F6) gekozen omdat deze klasse past bij zaken die herhaaldelijk kunnen voorkomen. In een fabrieksomgeving kan daarbij gedacht worden aan een lekkende buis. Dezelfde buis kan vaker en op verschillende plekken lek raken. Een caveerne kan maar één keer beginnen met migreren. Bovendien geldt voor cavernes die

gemigreerd zijn dat dit proces al begon tijdens de uitloging en/of slurry vulling of binnen enkele jaren na afloop hiervan. Voor veel cavernes met een likelihood-score van 6 of hoger is de situatie al vele decennia niet veranderd. 'Zeer waarschijnlijk' of F6 is daarom een te zware F-klasse. Wanneer een caverne actief aan het migreren is, zal deze wel naar F6 verplaatst worden.

Lage waarschijnlijkheid

Aan het andere einde van spectrum (F0) horen de cavernes waarvan migratie extreem onwaarschijnlijk is. Dit zijn cavernes met een intact veiligheidsdak van 5 m in zout C. Deze cavernes hebben een likelihood-score 0. Daarnaast zijn er ook cavernes met een intact veiligheidsdak die een likelihood-score 1 hebben omdat er bekende breuken in de ondergrond zitten. Als er echter een intact veiligheidsdak aanwezig is, dan vormen deze breuken geen extra risico. Daarom zijn cavernes die een totale likelihood-score van 1 hebben vanwege de aanwezigheid van breuken ook in F0 geplaatst. Bij de andere overige cavernes die een likelihood-score van 1 hebben is het veiligheidsdak van 5 m zout C niet overal intact, daarom komen deze cavernes in klasse F1 terecht. Ook de cavernes met likelihood-score 2 komen hier terecht. Voor geen van deze cavernes is de anhydrietlaag boven het zout aangetast en daarom is migratie 'zeer onwaarschijnlijk' (F1).

Door het aanbrengen van het onderscheid in de cavernes met likelihoodscore 1 kan, net als voorheen, tussen twee F-klassen de grens aangegeven worden tussen cavernes die stabiel zijn (klasse F0) en cavernes die potentieel instabiel zijn (klasse F1 en hoger).

De tussenliggende likelihood-scores en F-klassen zijn in oplopende volgorde aan elkaar gekoppeld zoals te zien is in Tabel 1.

4.4.2. S-Classificatie

De verbeteringen die toegelicht zijn in 4.3.2 zorgen ervoor dat het gemodelleerde verloop van het migratieproces in het migratiemodel 2024 beter aansluit bij de migratie zoals deze in de praktijk is waargenomen. Het mogelijke migratietraject van de (nog) niet gemigreerde cavernes is met het migratiemodel 2024 dus ook beter te voorspellen. Zoals in paragraaf 3.1 is toegelicht, is het voor de S-classificatie per caverne belangrijk of het migratiemodel 2024 aangeeft of migratie diep in de ondergrond uitdooft (S1), of (zonder maatregelen) kan leiden tot een sinkhole of trog (S2 of hoger). Cavernes in klasse S1 zijn daarom inherent veilig en cavernes in klasse S2, S3 of S4 zijn niet inherent veilig.

Een groot aantal cavernes dat volgens het oude migratiemodel niet inherent veilig was en dus tot een sinkhole of trog kon leiden, kan in het nieuwe model geen sinkhole of trog meer geven. Dit komt met name door de hogere bulking factor en het realistischer meenemen van de cavernevorm. Deze cavernes zijn met het migratiemodel 2024 als inherent veilig (S1) geclassificeerd en behoeven daarom geen opvulling met kalkslurry.

Bij het toepassen van de Deltares methodiek zijn al wel de bodemdalingsprognoses uit het migratiemodel 2024 gebruikt. Sommige niet inherent veilige cavernes hebben daarom een hogere S-klasse dan volgens de vorige versie van het beleid uit 2022. Dit komt doordat:

- Het invloedsgebied volgens het nieuwe migratiemodel groter is, waardoor er meer objecten in vallen.
- Er in sommige gevallen objecten zoals gebouwen en leidingen bij zijn gekomen.

4.4.3. Aantal niet inherent veilige cavernes

Bovengenoemde verbeteringen leiden tot een aanzienlijk gewijzigde risicomatrix (bijlage 1). Het aantal cavernes dat niet inherent veilig is en nog gevuld moet worden, is afgenomen van 59 (status maart 2024 op basis van het oude migratiemodel) naar 21 (bijlage 1, op basis van het nieuwe migratiemodel). Van deze 21 cavernes zijn er vier stabiel, migratie is bij die cavernes vrijwel uitgesloten. Tot nu toe zijn alleen cavernes met likelihoodscore 6 of hoger (F-classificatie F5 in de risicomatrix) daadwerkelijk gemigreerd. In de nieuwe risicomatrix zijn er nog slechts zeven niet inherent veilige cavernes met F-classificatie F5.

5. Eerste stappen analyse impact aan maaiveld

In deze versie (december 2024) van dit beleid wordt voor de onderverdeling van de S-classificatie in S2, S3 en S4 nog vastgehouden aan de methodiek van Deltares, zie Tabel 2. Er wordt momenteel gewerkt aan een herziening van deze methodiek. Deze herziening heeft geen invloed op de beoordeling per caveerne of deze opgevuld moet worden of niet, maar kan wel gevolgen hebben voor de volgorde.

Bij de impactanalyse aan maaiveld wordt bekeken aan hoeveel en welke objecten er schade zal ontstaan als gevolg van bodemdaling door cavernemigratie. Per caveerne wordt daarom in beeld gebracht wat het grondgebruik is (bijvoorbeeld agrarisch, natuur, industrie) en welke objecten er aanwezig zijn (bijvoorbeeld woningen, bedrijfspanden, wegen, kabels en leidingen en speciale objecten zoals de bodembeschermende folie onder de stortlocaties van Twence). Soms zal er ook een verdere onderverdeling gemaakt worden. Zo heeft bij 'wegen' schade aan een zandweg een andere impact dan schade aan een snelweg. Daarnaast moeten ook de objecten in verschillende categorieën ten opzichte van elkaar gewogen kunnen worden. Hoe verhoudt bijvoorbeeld schade aan 5 huizen zich ten opzichte van schade aan een regionale weg? Zo ontstaat er een scoringsmethodiek waarmee per caveerne op eenduidige wijze een score bepaald kan worden. De score-ranges kunnen dan gekoppeld worden aan een S-klasse. Wanneer de situatie verandert, bijvoorbeeld door de bouw van een nieuw huis, kan eenvoudig de score op een controleerbare wijze aangepast worden.

5.1. Effect van eventuele schuine migratie

Het migratiemodel 2024 geeft per caveerne een prognose van de bodemdaling en de daarvan afgeleide parameters zoals scheefstand, horizontale vervorming, kromming en relatieve rotatie. Deze prognoses geven aan hoeveel bodemdaling er optreedt ter plaatse van de aanwezige objecten zoals een huis of een leiding. Het uitgangspunt hierbij is dat de caveerne recht naar boven migreert. Maar migratie kan ook schuin naar boven gaan waardoor het centrum van de sinkhole, trog of kom op een andere plek uitkomt dan volgens de prognose. Deze onzekerheid moet meegenomen worden in de afbakening van het invloedsgebied voor de impactanalyse. Daarnaast heeft het ook effect op hoe groot de bodemdaling, scheefstand, horizontale vervorming, kromming, en relatieve rotatie is op de plek van een object binnen de invloedsfeer. Om op een praktische manier met deze onzekerheid om te gaan is gekeken naar de bodemdalingsprognoses voor verschillende cavernes.

Voor de bodemdalingsprognoses bij sinkholes zijn per caveerne 3 contouren met elkaar vergeleken:

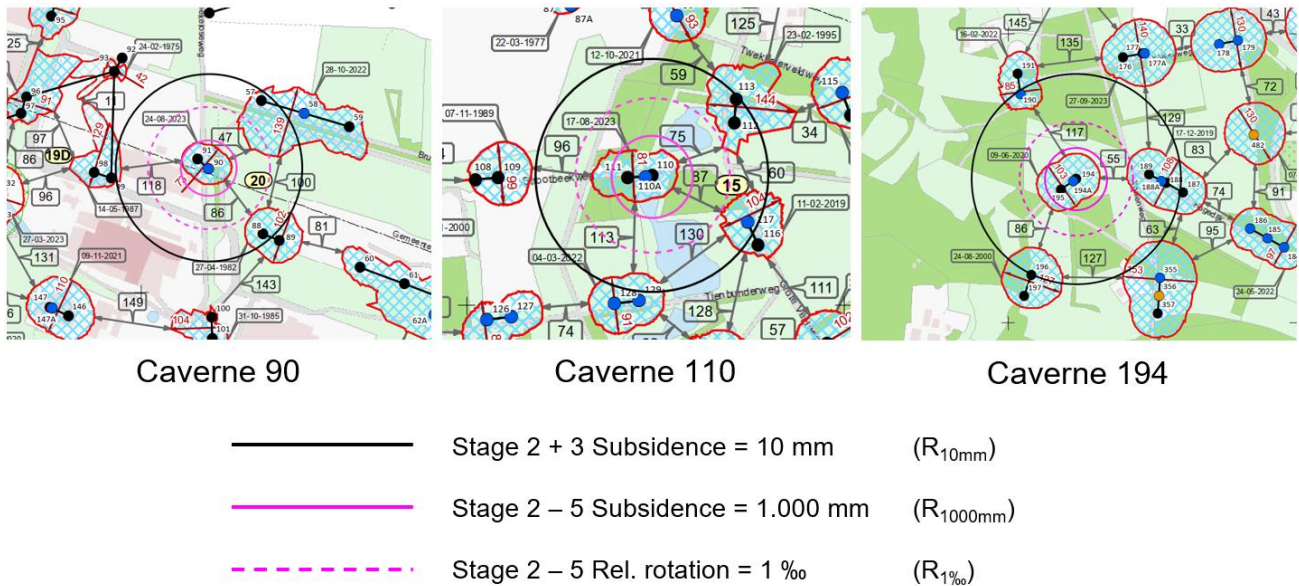
- De contour waar de bodemdaling 1 m (1000 mm) is, met straal R_{1000mm}
Van plekken waar de bodemdaling 1 m of meer is kan gesteld worden dat ze zich in de sinkhole/trog bevinden. De contour hier direct buiten is de 0,5 m contour en een dergelijke mate van bodemdaling kan ook voorkomen bij komvormige bodemdaling. Deze 1 m contour valt voor veel cavernes ongeveer samen met de maxcontour van de cavernes op de holruimtekaart, zie Figuur 7 voor een aantal voorbeelden.
- De buitenste contour waar de relatieve rotatie 1 ‰ is, met straal $R_{1‰}$
Buiten deze contour is de relatieve rotatie kleiner dan 1 ‰ en bij een dergelijke waarde is de kans op schade minimaal. Binnen deze contour volgt vaak op korte afstand de contour van 5 ‰ waar de kans op schade zeer reëel is.
- De contour waar de bodemdaling 1 cm (10 mm) is, met straal R_{10mm}
Dit is de buitenste contour die weergegeven wordt. Deze overlapt vaak met naastgelegen cavernes.

Wat opvalt is dat in de meeste gevallen geldt $R_{10mm} \geq R_{1000mm} + R_{1‰}$, zie Figuur 8. voor een aantal voorbeelden.

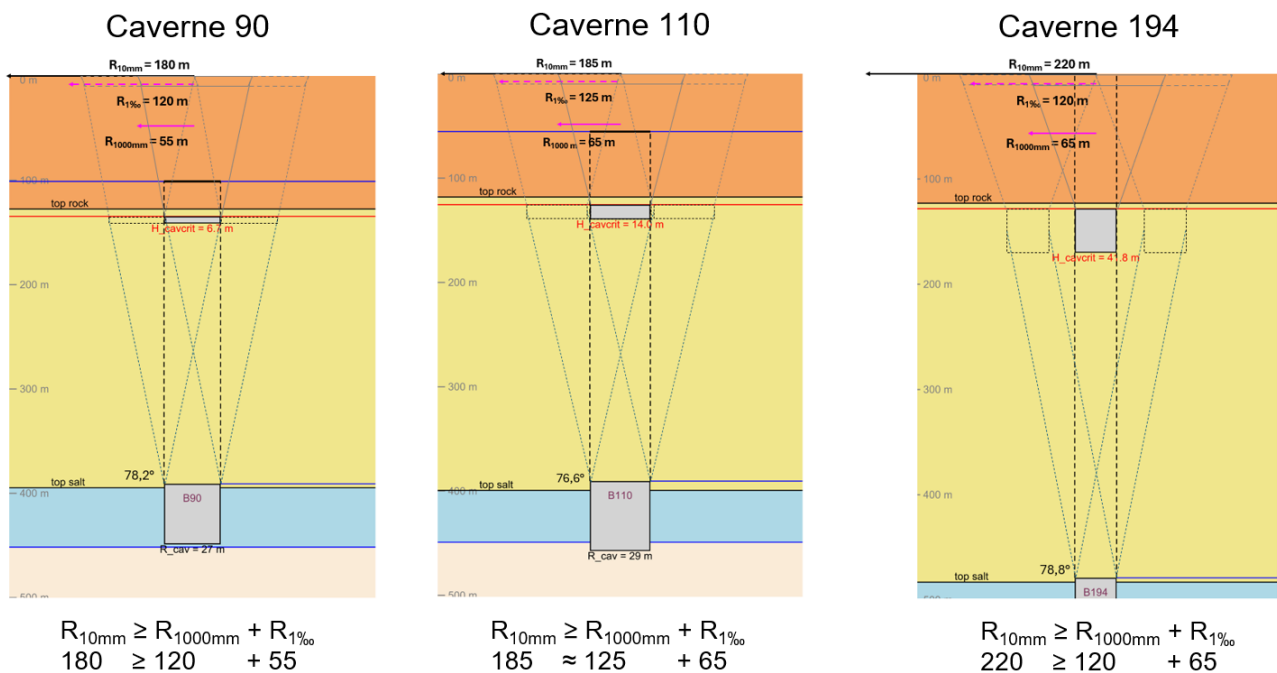
Er wordt aangenomen dat overal binnen de 1 m contour het centrum van het bodemdalingsgebied kan uitkomen als gevolg van migratie schuin naar boven². Dan valt het gebied waar de relatieve rotatie groter dan 1 ‰ kan zijn binnen de 1 cm contour. Dat wil zeggen dat, rekening houdend met schuine migratie, de kans op schade buiten de 1 cm contour minimaal is. Daarom worden objecten buiten deze contour buiten

² De 1 m contour omvat de maxcontour van de caveerne of het deel van de caveerne waar in het dak migratie zou kunnen plaatsvinden. Bij het bekende praktijkgeval van schuine migratie (167-168-169) is de migrerende caveerne ook boven de originele caveerne gebleven.

beschouwing gelaten. Binnen deze contour is de relatieve rotatie bij schuine migratie al snel aanzienlijk meer dan 1 ‰ en is er een zeer reële kans op schade. Daarom wordt de maximaal berekende scheefstand, horizontale vervorming, kromming en relatieve rotatie overal binnen de 1 cm contour toegepast.

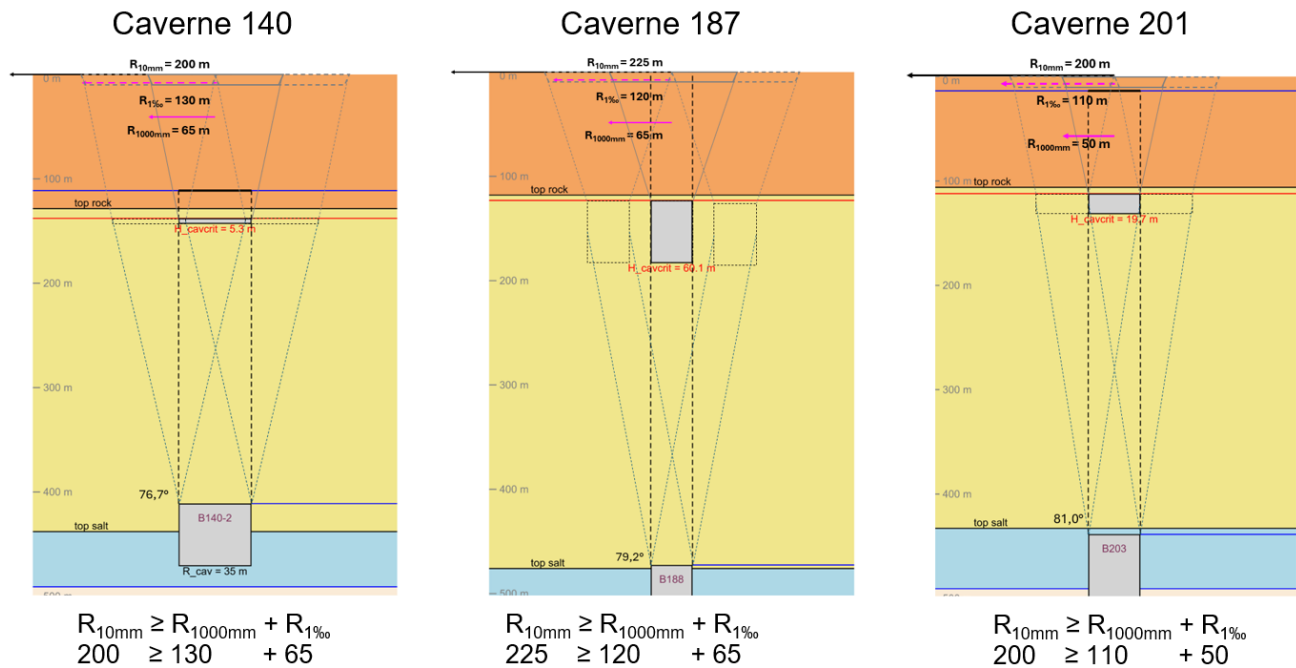


Figuur 7: Voorbeelden van contouren R_{10mm} , R_{1000mm} en $R_{1‰}$ op de holruimtekaart



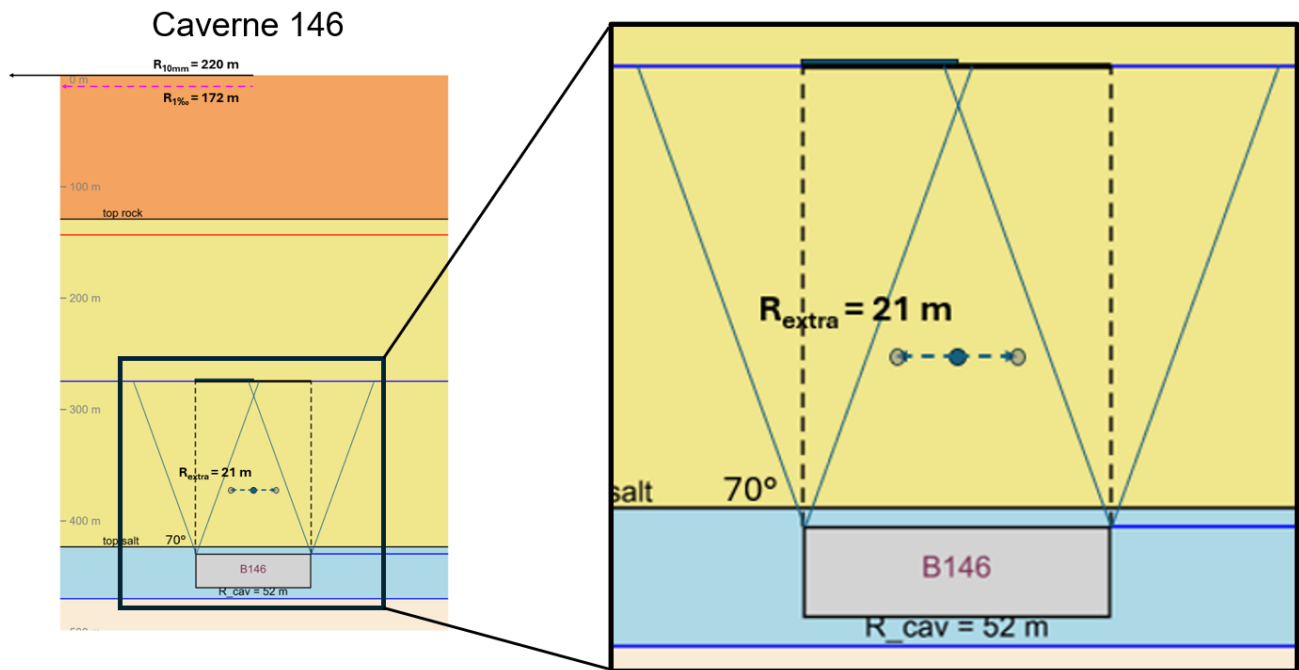
Figuur 8: Voorbeelden van R_{10mm} , R_{1000mm} en $R_{1‰}$ en de hoek van schuine migratie geprojecteerd op dwarsdoorsneden van het migratietraject

Deze gedachtelijn kan ook voortgezet worden om rekening te houden met schuine migratie bij cavernes die niet zover kunnen migreren dat er een sinkhole of trog uit ontstaat. De hoek waaronder een cave (die een sinkhole kan geven) moet migreren zodat het centrum van de bodemdaling op de 1 m contour uitkomt, is berekend voor een aantal cavernes en varieert tussen de 75 en 80°. In Figuur 8 is deze hoek aangegeven en in Figuur 9 voor nog een aantal andere cavernes. De berekende hoeken sluiten aan bij het praktijkvoorbeeld 167-168-169 waar deze hoek ca. 75° is. In een enkel geval werd een hoek van ca. 71° berekend. Daarom is als ondergrens een conservatieve waarde van 70° aangehouden.



Figuur 9: Voorbeelden van R_{10mm} , R_{1000mm} en $R_{1\%o}$ en de hoek van schuine migratie geprojecteerd op dwarsdoorsneden van het migratietraject

Bij inherent veilige cavernes eindigt de migratiekolom diep in de ondergrond. De bodemdalingsprognose wordt vervolgens berekend vanuit het centrum van de migratiekolom, weergegeven met een blauwe stip in Figuur 10. Door schuine migratie verplaatst het middelpunt zich horizontaal. Wanneer met 70° gerekend wordt als hoek voor schuine migratie, dan kan de verplaatsing van het middelpunt per caverne berekend worden met de hoogte van de migratiekolom. In Figuur 10 verplaatst het middelpunt naar de positie van de grijze stip. Deze verplaatsing (R_{extra}) is gemiddeld ca. 20 m en kan opgeteld worden bij de straal van de 1‰ contour. Voor caverne 146 uit Figuur 10 geldt dus bij rechte migratie is $R_{1\%o} = 172\text{ m}$. Bij schuine migratie is R_{extra} voor deze caverne 21 m. Voor de impact aan maaiveld wordt de straal van de 1‰ contour dan $172 + 21 = 193\text{ m}$ waardoor er mogelijk meer objecten in deze contour vallen. Deze 193 m is kleiner dan de 220 m voor R_{10mm} . Dus ook voor inherent veilige cavernes geldt generiek dat $R_{10mm} \geq R_{extra} + R_{1\%o}$. Dit geeft aan dat ook bij schuine migratie de kans op schade buiten de 1 cm contour minimaal is. Daarom worden objecten buiten deze contour buiten beschouwing gelaten. Voor de contouren van scheefstand, horizontale vervorming, kromming en relatieve rotatie wordt de verplaatsing R_{extra} opgeteld bij de straal van de bestaande contourlijn om te bepalen wat de maximale waarde kan zijn bij een object aan het maaiveld.



Figuur 10: Schuine migratie bij inherent veilige caverne onder een hoek van 70°

Samenvattend wordt er op de volgende manier rekening gehouden met de onzekerheid door eventuele schuine migratie:

- Bij sinkholes en troggen wordt aan alle objecten binnen de 1 cm contour de maximaal berekende waarde voor scheefstand, horizontale vervorming, kromming en relatieve rotatie toegekend. Objecten buiten de 1cm contour worden buiten beschouwing gelaten.
- Bij kommen wordt bij de contouren van scheefstand, horizontale vervorming, kromming en relatieve rotatie een extra straal opgeteld gebaseerd op migratie onder een hoek van 70° die op dezelfde diepte uitdooft als de berekende migratie recht naar boven. Objecten buiten de 1 cm contour worden buiten beschouwing gelaten.

6. Toekomstige wijzigingen en actualisatie

Op de korte en lange termijn kunnen er veranderingen zijn die ertoe leiden dat dit beleid gewijzigd en/of de bijbehorende bijlagen gewijzigd moeten worden. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen veranderingen die leiden tot een inhoudelijke wijziging van het beleid en veranderingen die alleen zorgen voor wijzigingen in de bijlage.

Allereerst zal het beleid in het eerste kwartaal van 2025 aangepast worden met de verbeterde S-classificatie. Daarnaast kunnen er diverse redenen zijn om het beleid te herzien, zoals:

- Kennisontwikkeling van het caverneveld
- Kennisontwikkeling in een bredere context, zoals in de industrie of in de wetenschap die van toepassing zijn op het caverneveld
- Wijzigingen in het CSIMS

Wanneer dergelijke ontwikkelingen of wijzigingen zich voordoen wordt binnen een passende termijn gekeken of het beleid hierop aangepast moet worden. Verder wordt ten minste iedere 5 jaar het gehele beleid geëvalueerd en waar nodig gewijzigd.

Wijzigingen die het beleid niet veranderen, maar wel impact hebben op bijlagen, zoals de risicomatrix worden ten minste eens per jaar doorgevoerd. Afhankelijk van de hoeveelheid en de aard van de wijzigingen wordt hier een praktisch moment voor gekozen. Voorbeelden van dergelijke wijzigingen zijn:

- Een nieuwe bodemdalingsprognose zorgt voor een nieuwe S-classificatie.
- Het vullen van een caveerne is afgerond en de nieuwe S-classificatie is bepaald.
- Een caveerne begint met migreren en de F-classificatie verandert.

7. Referenties

- [1] Review risk assessment zoutcavernes Nobian, 2021, Deltares, kenmerk: 11207720-000-GEO-0002, 10-12-2021
- [2] Cavern Stability and Integrity Management Systems (CSIMS), 2024, Nobian, versie 2.0, d.d. 28-03-2024
- [3] Update Migration study Twenthe-Rijn – Report part 1: Fundamental principles concerning cavern migration in the TWR brinefield, 2023, Reinvent GmbH, version V1, 28-12-2023
- [4] Update Migration study Twenthe-Rijn – Report part 2: The Bekendam-Jakob-Pinkse (BJP) subsidence prognosis algorithm for migrating salt caverns in a bedded stratigraphy, 2024, Reinvent GmbH and K-UTEC AG Salt Technologies, Rev. 05, 04-11-2024
- [5] Update Migration study Twenthe-Rijn – Report part 3: Validation of the BJP-Algorithm by assessment of historical migration behaviour of selected TWR caverns and determination of the likelihood of migration, 2024, Reinvent GmbH, december 2024
- [6] Update Migration study Twenthe-Rijn – Report part 4: Subsidence predictions for potential future migration and recommendations on mitigative action by means of backfilling, 2024, Reinvent GmbH, december 2024
- [7] TWR North identification of delamination based on GRlogs, GEOWULF laboratories, 2019, kenmerk: GL19.401, April 2019
- [8] Samenvatting en integratie onderzoeken kalkslurry 2019-2024, Nobian, 2024, kenmerk: NH20240911, september 2024

8. Bijlagen

1. Risicomatrix versie december 2024
2. Communicatieprotocol en TLS – Micro-seismisch meetnet Twenthe-Rijn

**Beleid Monitoren en Vullen
Cavernes Twente**

Versie december 2024

Chemistry
you can count on



Bijlage 1: Risicomatrix versie december 2024

S4	239	201, 225, 234	151, 215	138, 204		60, 81, 90, 130, 140	
S3	156, 209	80			110	57	
S2	347				187	194	
S1	63, 104, 146, 148, 207, 211, 213, 218, 228, 231, 242, 245, 248, 253, 256	84, 120, 159, 176, 178, 180, 223	76, 77, 100, 102, 122	75, 112, 132, 192, 259	134, 126	51, 52, 55, 67, 73, 78, 94, 98, 108, 114, 116, 118, 124, 128, 136, 144, 149, 153, 162, 165, 173, 184, 190	
	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6

Rode cavernenummers zijn cavernes die al gevuld zijn met kalkslurry



Microseismisch meetnet Twente-Rijn

Communicatieprotocol en Traffic Light System

Versie december 2024



Doel

Doel

Doel van het meetnetwerk

- 24/7 monitoring van potentieel instabiele cavernes om migratie van cavernes tijdig te signaleren

Doel van het communicatieprotocol

- Transparantie geven over wat verwacht mag worden van Nobian na registratie van (micro)seismische activiteit door middel van een beslisboom waarin voor elke gemeten (reeks) trilling(en) vast is gelegd welke actie genomen wordt (Traffic Light System [TLS] of verkeerslicht principe)

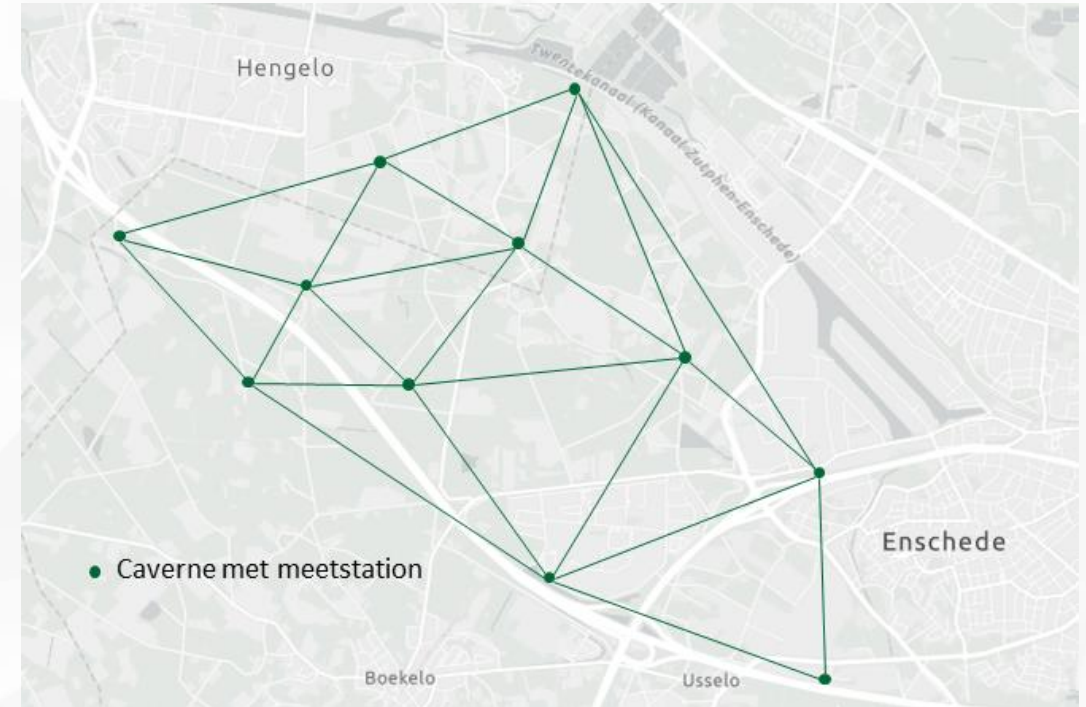
Meetnetwerk

Het meetnetwerk

Het meetnet bestaat uit 14 meetstations op 11 locaties. Er zijn 4 hydrofoons die zich in cavernes bevinden, 8 geofoons die zich op 40 à 50 m diepte bevinden en 2 ondiepe geofoons die op enkele meters diepte zitten.

K-Utec voert continue monitoring uit en interpreteert de gemeten trillingen.

Microseismisch meetnet Twente-Rijn Gemeente Hengelo en Enschede



Beslisboom

Bepalen kleur verkeerslicht

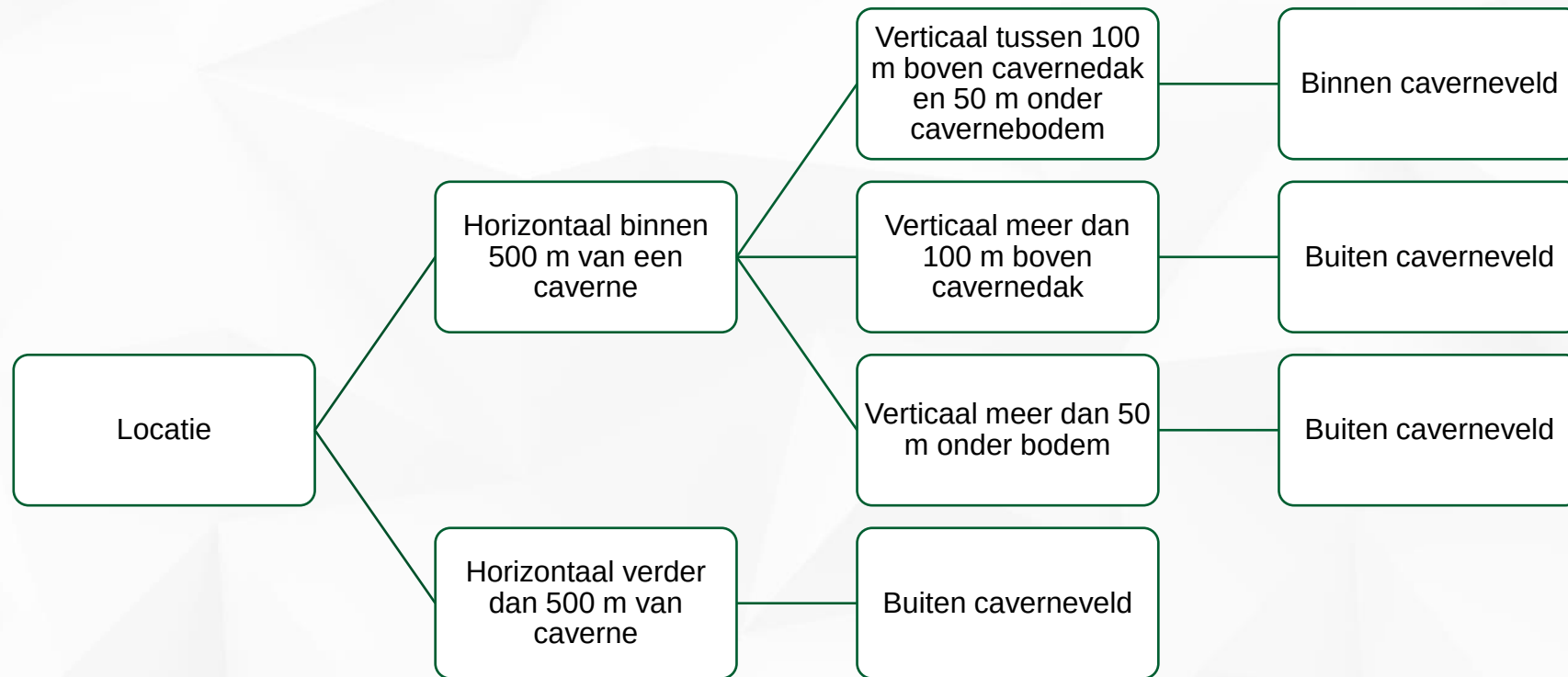
Onderscheid op basis van de volgende criteria

- Locatie trilling t.o.v. de cavernes
 - binnen caverneveld
 - buiten caverneveld
- Aantal trillingen per etmaal (N)
 - $N < 3$
 - $N \geq 3$
- Type trilling
 - Geomechanisch
 - Vallend gesteente
 - Scheur in gesteente
- Zwaarte van de trilling (Magnitude, M)
 - $M < -1,0$
 - $-1,0 \leq M < 0,0$
 - $0,0 \leq M < 1,0$
 - $M \geq 1,0$

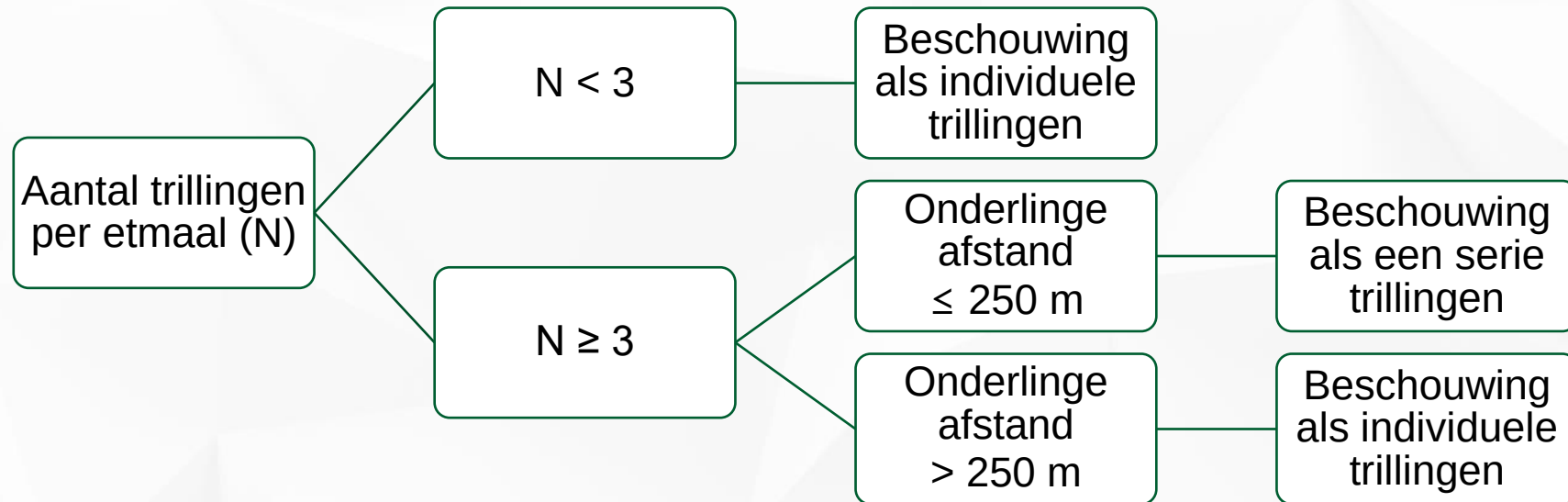
Definities

- Geomechanisch Beweging langs een al bestaand breukvlak of laaggrens in de ondergrond
- Vallend gesteente Het afbreken van gesteente uit het dak of de wand van een caverne
- Scheur in gesteente Vorming van een nieuwe scheur in het zout of boven- of onderliggend gesteente
- Magnitude Maat voor de zwaarte (hoeveelheid vrijkomende energie) van een trilling
- Groen Laag niveau van (achtergrond)seismiciteit, geen actie nodig
- Oranje Trillingen die niet tot een direct risico leiden voor de cavernestabiliteit, maar wel nader onderzoek behoeven
- Rood Trillingen die mogelijk een Risico voor de cavernestabiliteit vormen en waarbij het borgen van de veiligheid de eerste prioriteit is

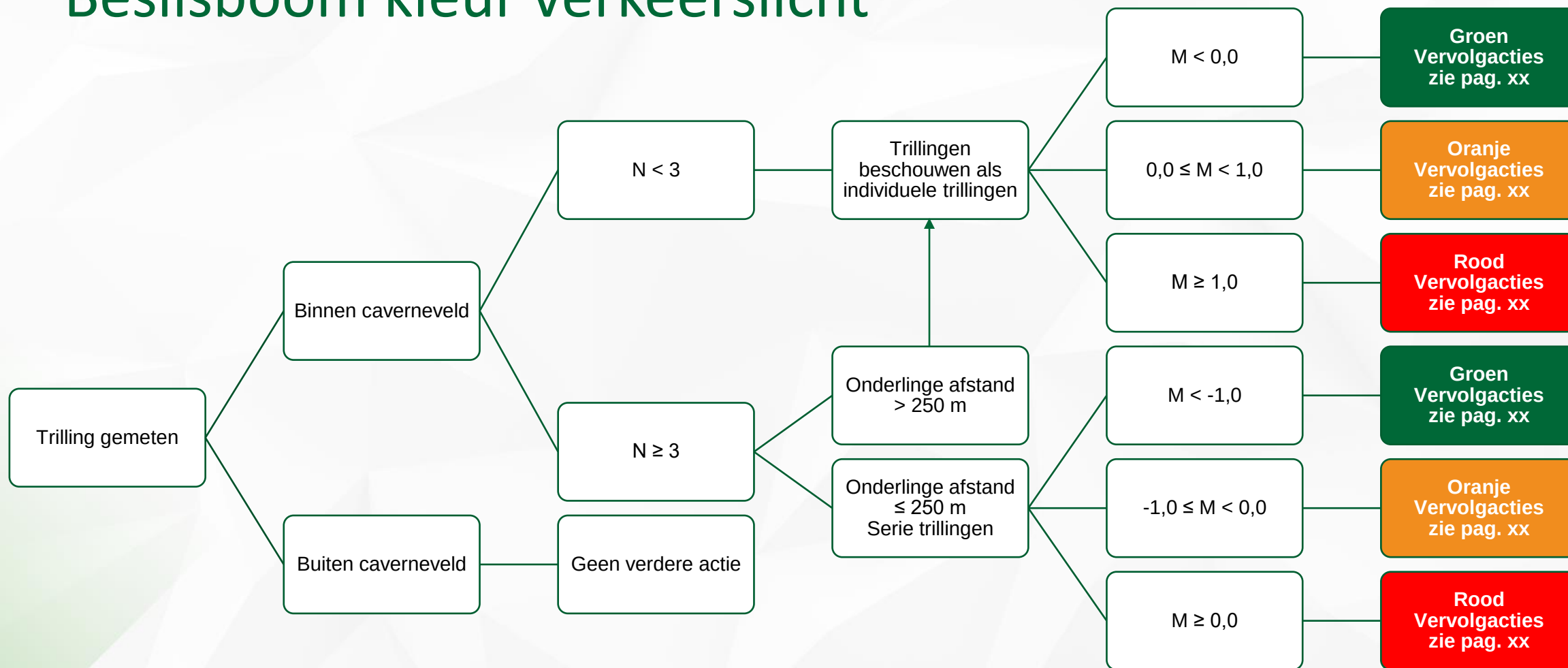
Beslisboom binnen of buiten caverneveld



Beslisboom individuele of serie trillingen

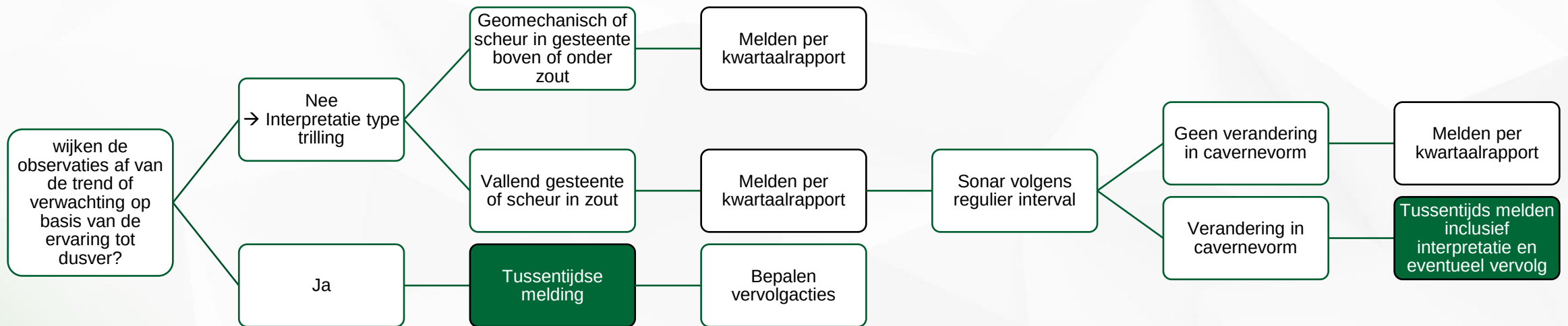


Beslisboom kleur verkeerslicht



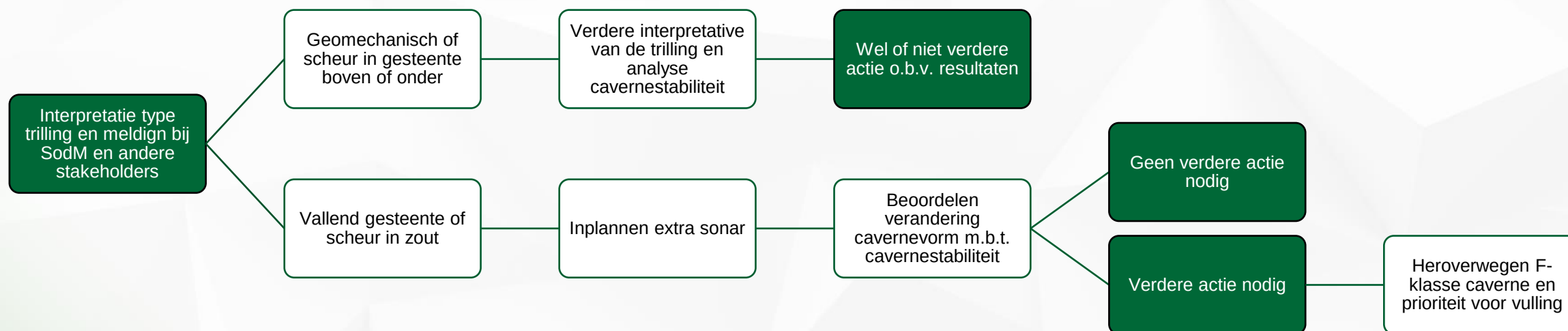
Vervolgacties per kleur van het verkeerslicht

Vervolgacties verkeerslicht GROEN



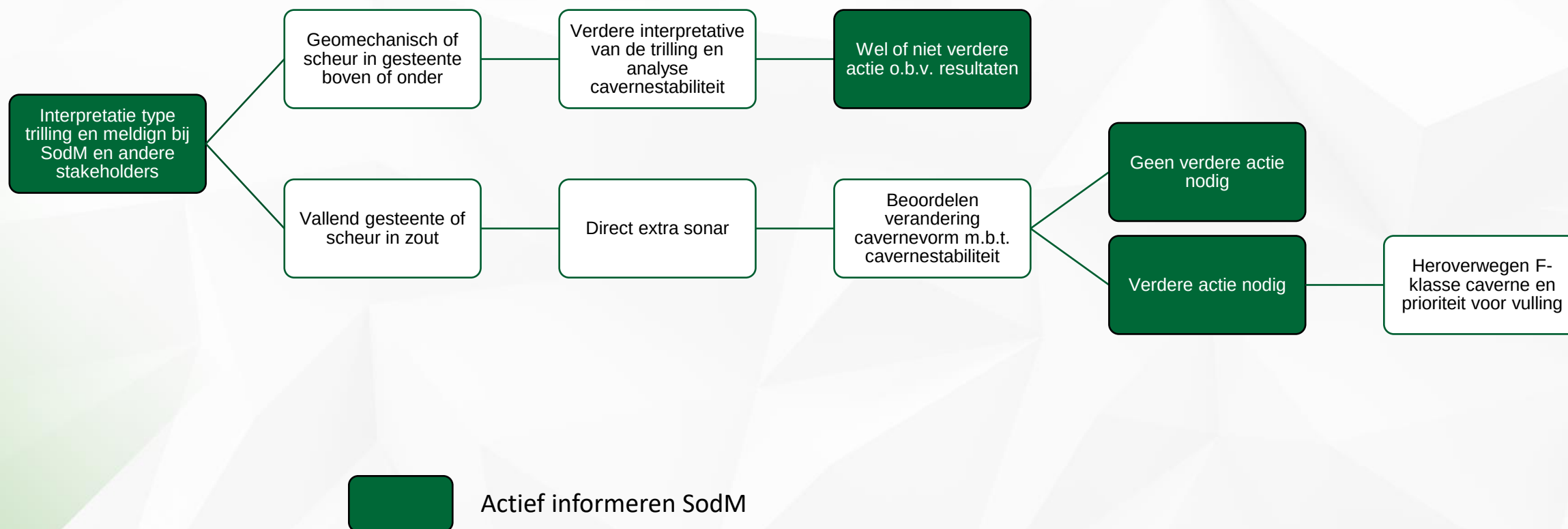
Actief informeren SodM

Vervolgacties verkeerslicht ORANJE



Actief informeren SodM

Vervolgacties verkeerslicht **ROOD**



Rapportage

Rapportage

Locatie trilling	Magnitude	Tijdpad eerste melding
Binnen caverneveld N < 3 per etmaal	M < 0,0	Na afloop van het lopende kwartaal*
	0,0 ≤ M < 1,0	Binnen 2 werkdagen
	M ≥ 1,0	Binnen 48 uur
Binnen caverneveld N ≥ 3 per etmaal	M < -1,0	Na afloop van het lopende kwartaal*
	-1,0 ≤ M < 0,0	Binnen 2 werkdagen
	M ≥ 0,0	Binnen 48 uur

* Wanneer trillingen afwijken van het gebruikelijke beeld worden ze tussentijds gemeld bij SodM

Waargenomen trillingen met een magnitude $M \geq 1,0$ worden ook gemeld aan de betreffende gemeente, de veiligheidsregio en de provincie

Rapportage

Delen van data gemeten events en opvolging

- Meetgegevens K-UTEC → KNMI
- Gegevens interpretatie trilling K-UTEC → Nobian
- Groene trillingen Nobian → Nobian website en SodM (per kwartaal)
- Oranje trillingen Nobian → SodM (+ overheden*)
- Rode trillingen Nobian → SodM + overheden

* Indien de trilling een magnitude $M \geq 1,0$ heeft

Plan-Do-Check-Act

