



Pijlerstabiliteit van caverneclusters en cavernerijen

**Aanvullende analyse bij
Verwijderingsplan Mijnbouwwerk Zout Twenthe-Rijn fase 3**

Auteur: 5.1.2.e
GeoDetect

Versie: v.2.def

Publicatiedatum: 15 december 2022

Goedkeuring: 5.1.2.e, Nobian MDC



Inhoud

Managementsamenvatting.....	1
1 Aanleiding tot aanvullend rapport.....	3
2 Herbeoordeling pijlerstabiliteit van caveclusters en -rijen	3
2.1 Caveclusters.....	3
2.2 Cavererijen	5
3 Lange-termijn bodemdaling door zoutwinning in Twenthe-Rijn.....	6
4 Conclusies	6
5 Referenties	8
Bijlage 1: Ontwikkelingsfasen zoutwinning in vergunningsgebied Twenthe-Rijn	9
Bijlage 2: Pijlerstabiliteitstabel uit Verwijderingsplan Twenthe-Rijn fase 3.....	10
Bijlage 3: Herberekening pijlerstabiliteit caveclusters.....	12
Bijlage 4: Geometrie van de onderzochte caveclusters.....	13
Bijlage 5: Maatwerk cavernehoogten in buiten-cirkel van centrale pijler van cluster 1	28
Bijlage 6: Maatwerk cavernehoogten in buiten-cirkel van centrale pijler van cluster M24	30
Bijlage 7: Geometrie van de onderzochte cavererijen	33
Bijlage 8: Bodemdaling in 2100 door caveconvergentie in Twenthe-Rijn fase 2, 3 en 4	39

Managementsamenvatting

In het kader van het Sluitingsplan Twenthe Rijn fase 3 (ref.1) is in 2019 de stabiliteit van 12 cavernecusters en 13 maatwerkconfiguraties onderzocht (ref.2). Inmiddels zijn de cavernes van één cluster en twee maatwerkconfiguraties (1 cavernerij en 1 doublet) geabandonneerd. Het Sluitingsplan wordt vervangen door een nieuw Verwijderingsplan Mijnbouwwerk Zout Twenthe-Rijn fase 3 (ref.3), conform Art.44 en Art.44a, Mijnbouwwet, en Art.40c, Mijnbouwbesluit.

Op verzoek van Nobian heeft GeoDetect in dit aanvullende rapport bij het Verwijderingsplan fase 3 opnieuw de pijlerstabiliteit van de nog niet geabandonneerde clusters en maatwerkconfiguraties beoordeeld, gebaseerd op de recentste Nobian cave-metingen (peildatum 28 maart 2022) en overige cavegegevens (BPB tabel Stabiliteit, peildatum 16 november 2022). De aanvullende analyse heeft geleid tot de volgende inzichten.

Conclusies:

a) Cavernecusters

- Ter voorkoming van ongewenst veel bodemdaling boven een cavernecuster dient de benuttingsgraad van de zoutsterkte (bij druk- en/of trekbelasting) in de centrale pijler van het cluster niet meer dan 30% van de korte-termijn steenzoutsterkte te bedragen.
- De in dit rapport toegepaste globale benadering van cavernehoogten, die zijn ontleend aan de Nobian BPB Tabel Stabiliteit, heeft in eerste instantie opgeleverd dat de centrale pijler van de cavernecusters 1 en M24A tamelijk zwaar belast worden met een benuttingsgraad van, respectievelijk, 39% en 41%.
- De globale benadering houdt geen rekening met de soms zeer grillige vorm van een cave. Daarom zijn de clusters 1 en M24A aan een gedetailleerd nader onderzoek onderworpen met gebruikmaking van diverse dwarsdoorsneden van de betreffende cavernes. Maatwerk-stabiliteitsberekeningen hebben vervolgens uitgewezen dat de belasting van de centrale pijler van cavernecuster 1 feitelijk 34% bedraagt, en van cluster M24A slechts 21%. Alleen de pijler van cluster 1 is dus enigszins overbelast.
- Volgens de 'tributary loading area'-berekening mag de centrale pijler van cluster 1 niet hoger zijn dan 20,3 m. Volgens de GSMP-richtlijn voor inherente veiligheid mogen de cavernes van cluster 1 echter een maximale hoogte van 29,6 m hebben. Alle drie cavernes van het cluster voldoen ruimschoots aan die voorwaarde, maar toch is de centrale pijler overbelast (34%). Anderzijds mag de centrale pijler van cluster 10 een hoogte tot 41,1 m hebben, terwijl door de geringe clusterdiepte van 360 m een veilige cavernehoogte van maximaal 20,5 m is toegestaan.
- De GSMP-richtlijnen zijn primair bedoeld voor cavernes, die worden aangelegd in een rij-configuratie. Bovengenoemde voorbeelden uit de clusteranalyse maken duidelijk dat in het geval van geclusterde cavernes de richtlijnen onvoldoende rekening houden met de combinatie van inherent veilige cavernehoogte en draagkracht van de centrale pijler.

b) Cavernerijen

- Bij het onderzoek van de cavernerijen is de BGR-modellering voor pijlerstabiliteit van in rijen gelegen cavernes toegepast (ref.5). BGR heeft de minimaal vereiste breedte van de flankerende zoutpijlers van een cavernerij berekend voor drie benuttingsgraden (25, 30, 35%) en twee cavernehoogten (25, 40 m), als functie van de gemiddelde dak-overspanning van de cavernes in de rij. De onderzochte cavernerijen zijn enigszins onregelmatig van vorm, omdat de lengteassen van de cavernes niet altijd perfect in elkaars verlengde liggen. De vereiste breedte van de flankerende zoutpijlers is standaard getoetst met de BGR normen, die gebaseerd zijn op het 30%-benuttingscriterium van zoutsterkte. De flankerende pijlers van de rijen, waarin de diepteligging van de cavernes niet meer dan enige tientallen meters (meer of minder) afwijkt van de BGR referentie diepte van 450 m beneden maaiveld, voldoen ruimschoots aan de BGR normen.

- De caverrierijen M3 en M8 liggen op 500 m diepte en meer. Om de BGR normen enigszins toepasbaar te houden voor een grotere diepte (zonder de noodzaak tot uitgebreide nieuwe 'plane-strain' FE-modellering) dienen de diepere flankerende pijlers schijnbaar minder belast te worden. Toepassing van het BGR 25%-benuttingscriterium leidt tot flankerende zoutpijlers, die breder moeten zijn ter beperking van caverneconvergentie en bodemdaling. De flankerende pijlers van de rijen M3 en M8 hebben een zodanig breedte-overschot, dat ze zeer ruim voldoen aan de BGR 25%-normen. Waarschijnlijk zou zelfs aan een 30%-breedtenorm voldaan worden, indien die berekend zou zijn voor een juiste referentiediepte.

Aanbeveling

Men zou het tweedimensionale 'plane strain' rekenmodel opnieuw kunnen toepassen om voor een gemiddelde caverndiepte van 500 m nieuwe tabellen van de vereiste pijlerbreedte op te stellen als functie van de overspanning van het cavernedak (met cavernehoogte $H = 25$ m en 40 m, en benuttingsgraad $\eta = 25\%$, 30% en 35%). Deze breedte-normen zijn met name generiek nuttig voor het Ganzebos terrein, waar de cavernes gemiddeld 50 m dieper liggen dan in het gebied van de Twenthe-Rijn fasen 3 en 4 zoutwinning.

1 Aanleiding tot aanvullend rapport

In mei 2019 is al een analyse van de pijlerstabiliteit van 12 cavernecusters en 13 maatwerk configuraties gepubliceerd in Addendum I (ref.2) in aanvulling op een generiek Sluitingsplan conform Art.39, Mijnbouwbesluit, voor putten in de Twenthe-Rijn winningsvergunning, die zijn ontwikkeld tijdens fase 3 van de zoutwinning (ref.1). Bijlage 1 toont de ligging van het Twenthe-Rijn fase-3 gebied.

Het Sluitingsplan wordt nu vervangen door een nieuw Verwijderingsplan Mijnbouwwerk Zout Twenthe-Rijn fase 3 (ref.3), conform Art.44 en Art.44a, Mijnbouwwet, en Art.40c, Mijnbouwbesluit. De nu voorliggende aanvullende stabiliteitsanalyse is in overeenstemming gebracht met de opzet van het Verwijderingsplan en de meest actuele cave-ne-afmetingen in het winningsgebied.

In bijlage 2 is de Stabiliteitstabel uit het Verwijderingsplan Twenthe-Rijn fase 3 getoond. De tabel bevat voor 142 putten de relevante gegevens, die nodig zijn om de pijlerstabiliteit tussen de te abandonneren cavernes en de omliggende cavernes vast te stellen. De stabiliteit wordt beoordeeld aan de hand van specifieke geometrische en gesteente-mechanische randvoorwaarden voortgekomen uit studies en analyses van het Hengelo cave-neveld (BGR, refs.4-8, en RESPEC, refs.9,10). Deze randvoorwaarden hangen samen de GSMP-richtlijnen van Nobian (Good Salt Mining Practice, ref.11) voor de aanleg van veilige cavernes met een cumulatieve lange-termijn bodemdaling aan maaiveld van maximaal 5 cm per eeuw.

De GSMP-richtlijnen hebben niet alleen betrekking op de stabiliteit van de zoutpijlers en het zoutdak van de cavernes, maar ook op de inherente veilige maximale hoogte van een cave-ne ter voorkoming van de vorming van een eventuele instortingskrater aan maaiveld. In de meeste fase-3 cavernes is in zoutlaag C boven de cavernes een veiligheidsdak van minstens 5 m dikte gehandhaafd, waardoor het dak op de lange termijn naar verwachting stabiel blijft. De inherent veilige hoogte van een cave-ne wordt bepaald met een effectieve bulking factor van 1,11 voor de gesteentelagen boven een cave-ne.

Na 2019 zijn de afmetingen van een aantal cavernes gewijzigd ten opzichte van de gegevens die zijn toegepast in de analyse uit Addendum I. De wijzigingen zijn deels het gevolg van voortgezette zoutwinning, maar grotendeels afkomstig van nieuwe holruimtemetingen, waarbij de cavernes of uithoeken daarvan beter in beeld zijn gebracht. In dit rapport is daarom de pijlerstabiliteit van diverse cavernecusters en maatwerkconfiguraties opnieuw geanalyseerd.

2 Herbeoordeling pijlerstabiliteit van cavernecusters en -rijen

2.1 Cavernecusters

Op het caverneterrein van het Verwijderingsplan Twenthe Rijn fase 3 liggen 15 cavernecusters, met de volgnummers 1 t/m 12 (refs.2,10), en M22 t/m M24 (ref.2; aldaar zijnde de maatwerk configuraties M4, M6, M9), waarvan in Addendum I de lange-termijn stabiliteit van de centrale zoutpijlers tussen de cavernes is onderzocht. Inmiddels zijn de drie cavernes van cavernecuster 6 geabandonneerd, zodat dit cluster niet verder onderzocht behoeft te worden. Dit geldt ook voor de maatwerk configuraties M1, M5, M13 (cavernerijen) en M7 (doublet), waarvan de cavernes intussen zijn geabandonneerd of geen wijzigingen hebben ondergaan. De resterende cavernerijen worden in sectie 2.2 opnieuw beoordeeld.

‘Tributary loading area’ rekenprocedure

De pijlerstabiliteit van de cavernecusters wordt berekend met de ‘tributary loading area’-procedure (ref.9). De afmeting van de centrale zoutpijler van een cavernecuster valt goed vast te stellen (‘Inscribed pillar diameter’, binnen-cirkel). Ook de cumulatieve cave-nehoek, die de som is van de openingshoeken van de samenstellende cavernes gezien vanuit het middelpunt van de centrale pijler, valt nauwkeurig te bepalen. De doorsnede van de ondersteunende buiten-cirkel (‘Overscribed

pillar diameter') kan men niet eenduidig vaststellen, omdat het uitgangspunt van een loodrechte doorsnijding van de buiten-cirkel met de maximum-contour van de cavernes niet tegelijkertijd voor alle doorsnijdingen mogelijk is. De niet-straalsgewijze oriëntatie van de lengteassen van veel fase-3 cavernes, gezien vanuit het middelpunt van de centrale pijler, verhindert dat. Een gevoeligheidsanalyse heeft aangetoond, dat de doorsnede van de buiten-cirkel geen kritische parameter is in de berekening van de toelaatbare pijlerhoogte bij een bepaalde benuttingsgraad. Een wijziging van 10% in de grootte van de doorsnede van de buiten-cirkel geeft een 3% verandering in de toelaatbare pijlerhoogte. Daarentegen is de hoogteberekening zeer gevoelig voor de doorsnede van de binnen-cirkel. Een verkleining van 10% in de doorsnede geeft een verkleining van 15% in de toelaatbare pijlerhoogte.

In de tabel van bijlage 3 zijn alle invoergegevens en rekenresultaten voor de 15 cavernecusters samengevat. De drukgradiënten voor de verticale gesteentespanning en de pekeldruk in de caveerne zijn Nobian standaardwaarden voor gesteente-mechanische studies. Volgens de GSMP-richtlijnen (ref.11) dient de bodemdaling door zoutwinning in het Twente-Rijn gebied begrensd te worden tot maximaal 5 cm per eeuw. Een belangrijk criterium voor de lange-termijn pijlerstabiliteit is de benuttingsgraad van de zoutsterkte (bij druk- en/of trekbelasting) in de centrale pijler. Ter voorkoming van ongewenst veel bodemdaling boven een cluster dient de benuttingsgraad niet meer dan 30% van de korte-termijn steenzoutsterkte te bedragen. Bij een grotere pijlerbelasting zal de bodemdalingssnelheid toenemen. Vanaf meer dan 40% benuttingsgraad bij drukbelasting en meer dan 50% bij trekbelasting neemt bovendien de kans op dilatatie (microscheurvorming) in de zoutpijler toe (ref.7, Abbildung 23, 24).

Op basis van de geometrie van de centrale clusterpijler berekent de procedure voor een 30% benuttingsgraad de maximaal toelaatbare hoogte van de centrale pijler. In bijlage 4 is de geometrie van de 15 onderzochte cavernecusters afgebeeld. De maximale pijlerhoogte hangt mede af van de grootte van de binnen- en buiten-cirkels, van de cumulatieve cavernehoek van het cluster, en van de gemiddelde diepteligging van het cluster. Als eerste globale benadering van de gemiddelde hoogte van een aan de centrale pijler grenzende caveerne wordt het gemiddelde van de cavernehoogte ter plaatse van de bijbehorende putten genomen. De betreffende hoogtes zijn ontleend aan de Nobian BPB Tabel Stabiliteit (peildatum 16 november 2022). Uit de gemiddelde cavernehoogtes wordt de gemiddelde hoogte van het gehele cluster berekend, die vergeleken wordt met de maximaal toelaatbare pijlerhoogte. In de laatste kolom van de tabel in bijlage 3 staat de werkelijke benuttingsgraad van de zoutsterkte van de centrale pijler van een cavernecuster vermeld. De centrale pijler van de clusters 1 en M24 wordt met, respectievelijk, 39% en 41% tamelijk zwaar belast.

Bepaling cavernehogten in buiten-cirkel bij overschrijding 30% benuttingsgraad

De toegepaste globale benadering van cavernehogten houdt geen rekening met de soms zeer grillige vorm van een caveerne. Er kunnen rond de schoen van een casing lokale uitwassingen in het cavernedak aanwezig zijn, waardoor de lokale hoogte niet representatief is voor de caveerne als geheel. Ook kan een caveerne ongelijkmatig zijn uitgeloozd met een kleinere of juist grotere cavernehoogte dan gemiddeld in de buiten-cirkel van de centrale clusterpijler, waardoor de berekende benuttingsgraad van de pijler ook onvoldoende representatief is. Deze overwegingen hebben ertoe geleid de clusters 1 en M24A aan een gedetailleerd nader onderzoek te onderwerpen.

In bijlage 5 is het maatwerk getoond, waarmee de cavernehogtes in het domein van de buiten-cirkel van de centrale pijler van cluster 1 nauwkeurig zijn bepaald. De centrale-pijler flankerende hoogte bedraagt gemiddeld 21,3 m voor caveerne 239; 18,2 m voor caveerne 248; 27,0 m voor caveerne 270. Aan de tabel van bijlage 3 is een clusterberekening toegevoegd, aangeduid als '1-actual'. De maatwerk-stabiliteitsberekening wijst uit dat de benuttingsgraad van de centrale pijler is gedaald van 39% naar een realistischer 34%, hetgeen nog steeds aan de hoge kant is.

In bijlage 6 is het maatwerk getoond, waarmee de cavernehoogtes in het domein van de buiten-cirkel van de centrale pijler van cluster M24 in detail zijn bepaald. De centrale-pijler flankerende hoogte bedraagt gemiddeld 36,0 m voor caveerne 184; 22,8 m voor caveerne 187; 11,5 m voor caveerne 355. Aan de tabel van bijlage 3 is een clusterberekening toegevoegd, aangeduid als 'M24-actual'. De maatwerk-stabiliteitsberekening wijst uit dat de benuttingsgraad van de centrale pijler is gedaald van 41% naar een realistischer 21%. Dit nieuwe resultaat geeft aan dat er bij cluster M24 geen sprake is van een overbelaste centrale pijler vanwege het specifieke hoogteprofiel van de grillig gevormde cavernes.

Draagkracht centrale pijler cavernecusters niet verdisconteerd in GSMP-richtlijnen

In cluster M24 heeft caveerne 184 een opmerkelijke hoogte van gemiddeld 54,5 m ter plaatse van de putten 184-185-186. Nobian is van plan de caveerne gedeeltelijk op te vullen. Deze caveerne mag volgens de GSMP-richtlijnen ter voorkoming van een instortingskrater aan maaiveld niet hoger zijn dan 37,0 m bij toepassing van de standaard bulking factor van 1,11. Aan de tabel van bijlage 3 is voor de volledigheid een kolom toegevoegd, waarin de maximale inherent-veilige hoogte van de cavernes in de clusters staat aangegeven. Volgens de 'tributary loading area'-berekening mag de centrale pijler van cluster M24 evenwel niet hoger zijn dan 28,6 m. Indien de hoogtes van alle drie M24 cavernes theoretisch keurig beneden de inherente veiligheidsgrens van 37,0 m hadden gelegen, zou de zoutsterkte-benutting in de centrale pijler toch 36% hebben bedragen. Ditzelfde is het geval met cluster 1. Volgens de 'tributary loading area'-berekening mag de centrale pijler niet hoger zijn dan 20,3 m. Volgens de GSMP-richtlijn voor inherente veiligheid mogen de cavernes van cluster 1 een maximale hoogte van 29,6 m hebben. Alle drie cavernes voldoen ruimschoots aan die voorwaarde, maar toch is de centrale pijler (zonder en met maatwerk) enigszins overbelast. Het omgekeerde verschijnsel komt ook voor, zoals blijkt uit cluster 10. Gezien de geometrie van de centrale pijler mag de pijlerhoogte 41,1 m bedragen, terwijl vanwege de gemiddelde clusterdiepte van slechts 360 m de inherent veilige cavernehoogte niet meer dan 20,5 m bedraagt. Caveerne 259 in dit cluster is met een gemiddelde hoogte van 24,6 m bij een redelijk gelijkmatige dakopbouw duidelijk te hoog en dus ook een opvul-kandidaat.

Deze voorbeelden uit de clusteranalyse maken duidelijk dat de GSMP-richtlijnen in het geval van geclusterde cavernes onvoldoende rekening houden met de combinatie van de inherent veilige cavernehoogtes en de draagkracht van de centrale pijlers. De GSMP-richtlijnen zijn in eerste instantie dan ook bedoeld voor cavernes, die worden aangelegd in een rij-configuratie. Na invoering van de richtlijnen in 2004 heeft men in de nieuwe Twente-Rijn winningsgebieden fase 4 (Usseleres) en fase 5 (Ganzebos) de vorming van nieuwe cluster-configuraties van cavernes doelbewust vermeden. Uit de clusterstabiliteitsberekeningen in bijlage 3 kan men globaal opmaken, dat bij centrale pijlers met een doorsnede van minder dan 100 m overbelasting dreigt. Bij clusters die tientallen meters dieper liggen dan de referentiediepte van 450 m beneden maaiveld dreigt overbelasting al bij minder dan 110 m doorsnede.

2.2 Cavernerijen

De resterende maatwerkconfiguraties ter herbeoordeling zijn de volgende cavernerijen: M2, M3, M8, en M10 t/m M12. In bijlage 7 zijn van elke rij de betreffende cavernes en de geometrie weergegeven. De cavernerijen kunnen in grote lijnen worden gekenschetst volgens de BGR-modellering voor pijlerstabiliteit van in rijen gelegen cavernes (ref.5). Voor drie benuttingsgraden (25, 30, 35%) heeft BGR de minimaal vereiste breedte van de flankerende zoutpijlers van een cavernerij berekend voor gemiddelde cavernehoogten van 25 m en 40 m. De vereiste breedtes voor pijlerstabiliteit zijn gegeven als functie van de gemiddelde dak-overspanning van de cavernes in de rij (ref.5, Tabel 3).

Het toegepaste rekenmodel is een tweedimensionaal 'plane strain' FE-model. In dit model wordt verondersteld dat de cavernes een oneindig lange rij vormen loodrecht op het verticale vlak van het FE-model. De pijlers tussen de cavernes in de rij worden onbelast verondersteld, waardoor de

flankerende pijlers de volledige belasting van de bovenliggende aardlagen moeten opvangen. Het model kan alleen vervorming in het verticale modelvlak berekenen. Er kan geen vervorming in richtingen loodrecht op dit vlak optreden. De BGR-modellering is conservatief om twee redenen: de tussenpijlers dragen geen last en de maximum benuttingsgraad, die meestal alleen plaatselijk optreedt in het overgangsgebied tussen cavernedak en zoutpijler, is maatgevend.

In werkelijkheid zijn de rijstructuren in het boorterrein Hengelo tamelijk kort en bovendien onregelmatig gevormd, omdat de lengteassen van de cavernes niet perfect in elkaars verlengde liggen. De rijen beginnen of eindigen soms in een opnieuw beoordeeld cavernecollier als inbegrepen in de tabel van bijlage 3.

In bijlage 7 wordt per cavernerij kort toegelicht waarom de rij-structuur in principe voldoet aan de BGR-normen voor pijlerstabiliteit (30% benuttingsgraad) ondanks een enigszins afwijkende lijngeometrie. Voor een diepte van minder dan 450 m beneden maaiveld (BGR-referentiediepte) is de stabiliteitstoetsing aan de hand van de BGR-normen aan de conservatieve (strenge) kant. Rij M8 ligt uitzonderlijk diep met een gemiddelde diepte van 538 m beneden maaiveld. De gewenste flankerende pijlerbreedte ter beperking van de lange-termijn bodemdaling (GSMP, < 5 cm per eeuw) zal meer dienen te bedragen dan uit de BGR tabel voor 30% benuttingsgraad volgt. Daarom wordt in dit geval de stabiliteit getoetst voor een pijlerbreedte met de lagere benuttingsgraad van 25%.

Sommige cavernes in een rij liggen in een clusterachtige structuur met cavernes buiten de rij. In die gevallen (M2, M3) is de doorsnede van de binnen-cirkel (centrale zoutpijler) minstens 120 m, zodat de belasting van de centrale zoutpijler minder dan 30% van de zoutsterkte bedraagt. Daarmee wordt automatisch voldaan aan de BGR-stabiliteitsnorm voor cavernes in een rij.

3 Lange-termijn bodemdaling door zoutwinning in Twenthe-Rijn

Volgens de GSMP-richtlijnen dient de bodemdaling door zoutwinning in het Twenthe-Rijn gebied begrensd te worden tot maximaal 5 cm per eeuw. Uit dit criterium vloeit als randvoorwaarde voort dat de benuttingsgraad van het zout in een centrale clusterpijler en in de flankerende zoutpijlers van een cavernerij niet meer dan 30% van de korte-termijn steenzoutsterkte mag bedragen.

Uit een recente studie naar bodemdaling in het winningsgebied van Twenthe-Rijn fasen 2, 3 en 4 is gebleken dat de verwachte bodemdaling tot het jaar 2100 maximaal 4,5 cm zal bedragen, en dan vooral op locaties met een concentratie aan cavernecolliers. In bijlage 8 is de totaal verwachte bodemdaling in 2100 getoond (ref.12). In het fase-2 gebied met de cavernes 51-259 zijn de oudste peilmerken ingemeten in de periode 1955-1971. In het fase-3 gebied met de cavernes 262-485 zijn de oudste peilmerken ingemeten in de periode 1971-1997 (ref.13). Voor de fasen 2 en 3 zijn de in bijlage 8 verwachte dalingswaarden in het jaar 2100 dus representatief voor een dalingsperiode van meer dan een eeuw. In het fase-4 gebied met de cavernes 486-525 zijn de peilmerken ingemeten voor aanvang van de pekelwinning in 2008.

4 Conclusies

Caverneclusters

- Ter voorkoming van ongewenst veel bodemdaling boven een cavernecollier dient de benuttingsgraad van de zoutsterkte (bij druk- en/of trekbelasting) in de centrale pijler van het cluster niet meer dan 30% van de korte-termijn steenzoutsterkte te bedragen.
- De in dit rapport toegepaste globale benadering van cavernehoogten, die zijn ontleend aan de Nobian BPB Tabel Stabiliteit, heeft in eerste instantie opgeleverd dat de centrale pijler van de cavernecolliers 1 en M24A tamelijk zwaar belast worden met een benuttingsgraad van, respectievelijk, 39% en 41%.
- De globale benadering houdt geen rekening met de soms zeer grillige vorm van een caverne. Daarom zijn de clusters 1 en M24A aan een gedetailleerd nader onderzoek onderworpen met

gebruikmaking van diverse dwarsdoorsneden van de betreffende cavernes. Maatwerk-stabiliteitsberekeningen hebben vervolgens uitgewezen dat de belasting van de centrale pijler van cavernecuster 1 feitelijk 34% bedraagt, en van cluster M24A slechts 21%. Alleen de pijler van cluster 1 is dus enigszins overbelast.

- Volgens de 'tributary loading area'-berekening mag de centrale pijler van cluster 1 niet hoger zijn dan 20,3 m. Volgens de GSMP-richtlijn voor inherente veiligheid mogen de cavernes van cluster 1 echter een maximale hoogte van 29,6 m hebben. Alle drie cavernes van het cluster voldoen ruimschoots aan die voorwaarde, maar toch is de centrale pijler overbelast (34%). Anderzijds mag de centrale pijler van cluster 10 een hoogte tot 41,1 m hebben, terwijl door de geringe clusterdiepte van 360 m een veilige cavernehoogte van maximaal 20,5 m is toegestaan.
- De GSMP-richtlijnen zijn primair bedoeld voor cavernes, die worden aangelegd in een rij-configuratie. Bovengenoemde voorbeelden uit de clusteranalyse maken duidelijk dat in het geval van geclusterde cavernes de richtlijnen onvoldoende rekening houden met de combinatie van inherent veilige cavernehoogte en draagkracht van de centrale pijler.

Cavernerijen

- Bij het onderzoek van de cavernerijen is de BGR-modellering voor pijlerstabiliteit van in rijen gelegen cavernes toegepast (ref.5). BGR heeft de minimaal vereiste breedte van de flankerende zoutpijlers van een cavernerij berekend voor drie benuttingsgraden (25, 30, 35%) en twee cavernehoogten (25, 40 m), als functie van de gemiddelde dak-overspanning van de cavernes in de rij. De onderzochte cavernerijen zijn enigszins onregelmatig van vorm, omdat de lengteassen van de cavernes niet altijd perfect in elkaars verlengde liggen. De vereiste breedte van de flankerende zoutpijlers is standaard getoetst met de BGR normen, die gebaseerd zijn op het 30%-benuttingscriterium van zoutsterkte. De flankerende pijlers van de rijen, waarin de diepteligging van de cavernes niet meer dan enige tientallen meters (meer of minder) afwijkt van de BGR referentiediepte van 450 m beneden maaiveld, voldoen ruimschoots aan de BGR normen.
- De cavernerijen M3 en M8 liggen op 500 m diepte en meer. Om de BGR normen enigszins toepasbaar te houden voor een grotere diepte (zonder de noodzaak tot uitgebreide nieuwe 'plane-strain' FE-modellering) dienen de diepere flankerende pijlers schijnbaar minder belast te worden. Toepassing van het BGR 25%-benuttingscriterium leidt tot flankerende zoutpijlers, die breder moeten zijn ter beperking van cavernconvergentie en bodemdaling. De flankerende pijlers van de rijen M3 en M8 hebben een zodanig breedte-overschot, dat ze zeer ruim voldoen aan de BGR 25%-normen. Waarschijnlijk zou zelfs aan een 30%-breedtenorm voldaan worden, indien die berekend zou zijn voor een juiste referentiediepte.

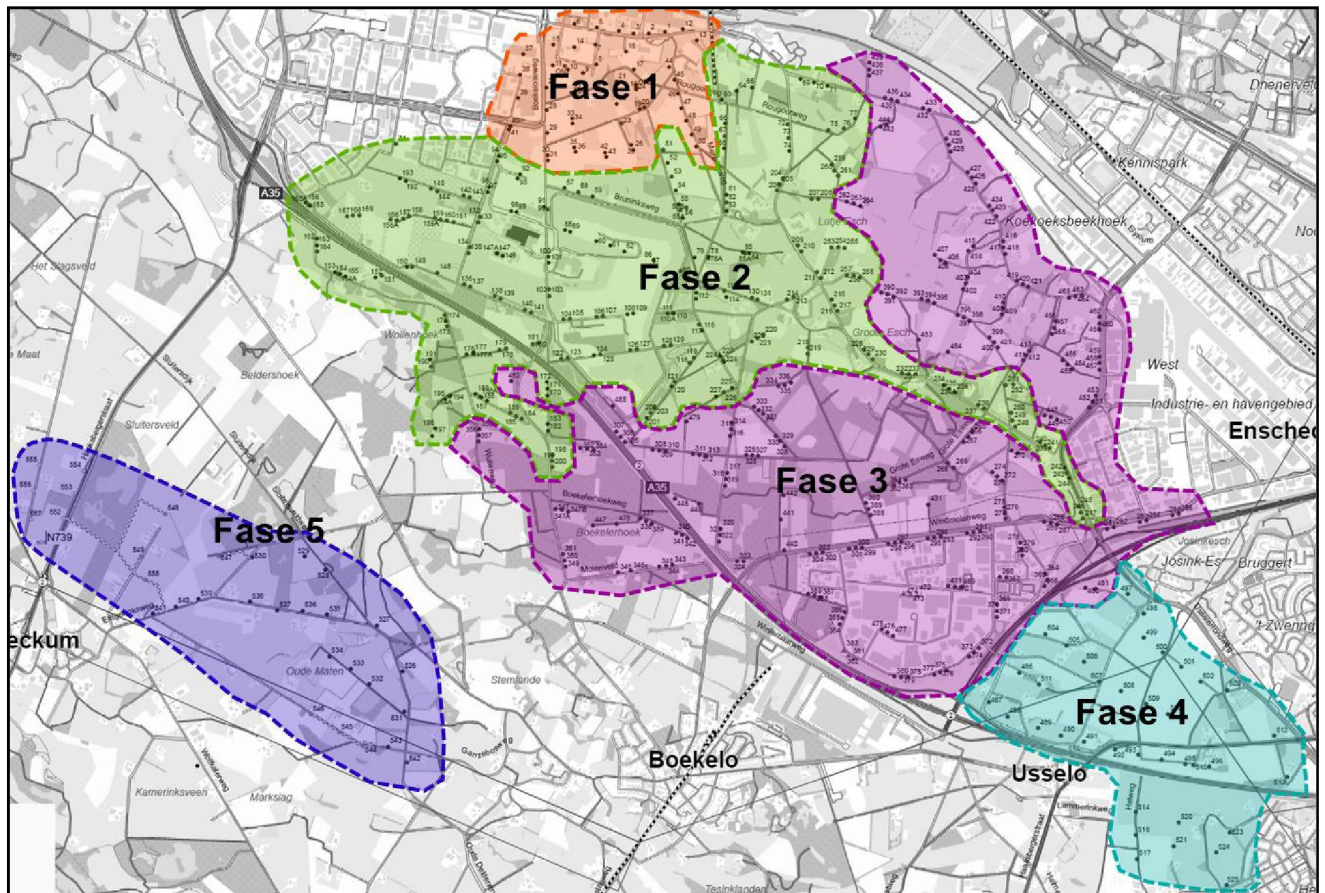
Aanbeveling

Men zou het tweedimensionale 'plane strain' rekenmodel opnieuw kunnen toepassen om voor een gemiddelde cavernediepte van 500 m nieuwe tabellen van de vereiste pijlerbreedte op te stellen als functie van de overspanning van het cavernedak (met cavernehoogte $H = 25$ m en 40 m, en benuttingsgraad $\eta = 25\%$, 30% en 35%). Deze breedte-normen zijn met name generiek nuttig voor het Ganzebos terrein, waar de cavernes gemiddeld 50 m dieper liggen dan in het gebied van de Twenthe-Rijn fasen 3 en 4 zoutwinning.

5 Referenties

1. Sluitingsplan Twenthe Rijn fase 3, Nouryon-Akzo Nobel Salt, 28 november 2018.
2. Addendum I bij Sluitingsplan Twenthe-Rijn fase 3 – Beoordeling pijlerstabiliteit maatwerkconfiguraties, v.2.def, Nouryon, 29 mei 2019.
3. Concept Verwijderingsplan Zout Twenthe-Rijn fase 3, Nobian, 1 september 2022.
4. Geomechanische Modellberechnungen zu Geländeoberflächensenkungen im Kavernenfeld Hengelo, Abschlussbericht BGR, Hannover, November 2003.
5. Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern im Kavernenfeld Hengelo, Abschlussbericht BGR, Hannover, März 2004.
6. Geomechanische Berechnungen zur Standfestigkeit und Integrität von Inline-Pfeilern in parallelen Kavernenreihen, Abschlussbericht BGR, Hannover, November 2004.
7. Bewertung früherer Standsicherheitsuntersuchungen unter Einbeziehung aktueller Laborversuche an Kernmaterial der Bohrung 480, Abschlussbericht BGR, Hannover, Juni 2007.
8. Standsicherheitsberechnungen zu den Kavernen-Clustern 209-211-215-253-256 und 245-281-287, Abschlussbericht BGR, Hannover, November 2004.
9. Cluster analysis of active caverns: Akzo Nobel – Hengelo brine field, L. Van Sambeek, Topical Report RSI-1774, RESPEC, April 2004.
10. Cavern cluster update: Hengelo brine field, L. Van Sambeek, Topical Report RSI-1866, RESPEC, February 2006.
11. Hengelo Uitloogtechniek, 11^e actualisering, Nobian, oktober 2022.
12. Long-term subsidence investigation of the Hengelo brinefield, RESPEC External Memorandum, 19 July 2022.
13. Meetregister bij het meetplan Akzo-Nobel Twenthe-Rijn – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Twenthe-Rijn Najaar 2004, Oranjewoud, 18 november 2004.

Bijlage 1: Ontwikkelingsfasen zoutwinning in vergunningsgebied Twente-Rijn



Ligging van de mijnbouwwerken in vergunningsgebied Twente Rijn, ingedeeld naar de respectievelijke ontwikkelingsfasen (refs.1,3).

Bijlage 2: Pijlerstabiliteitstabel uit Verwijderingsplan Twenthe-Rijn fase 3

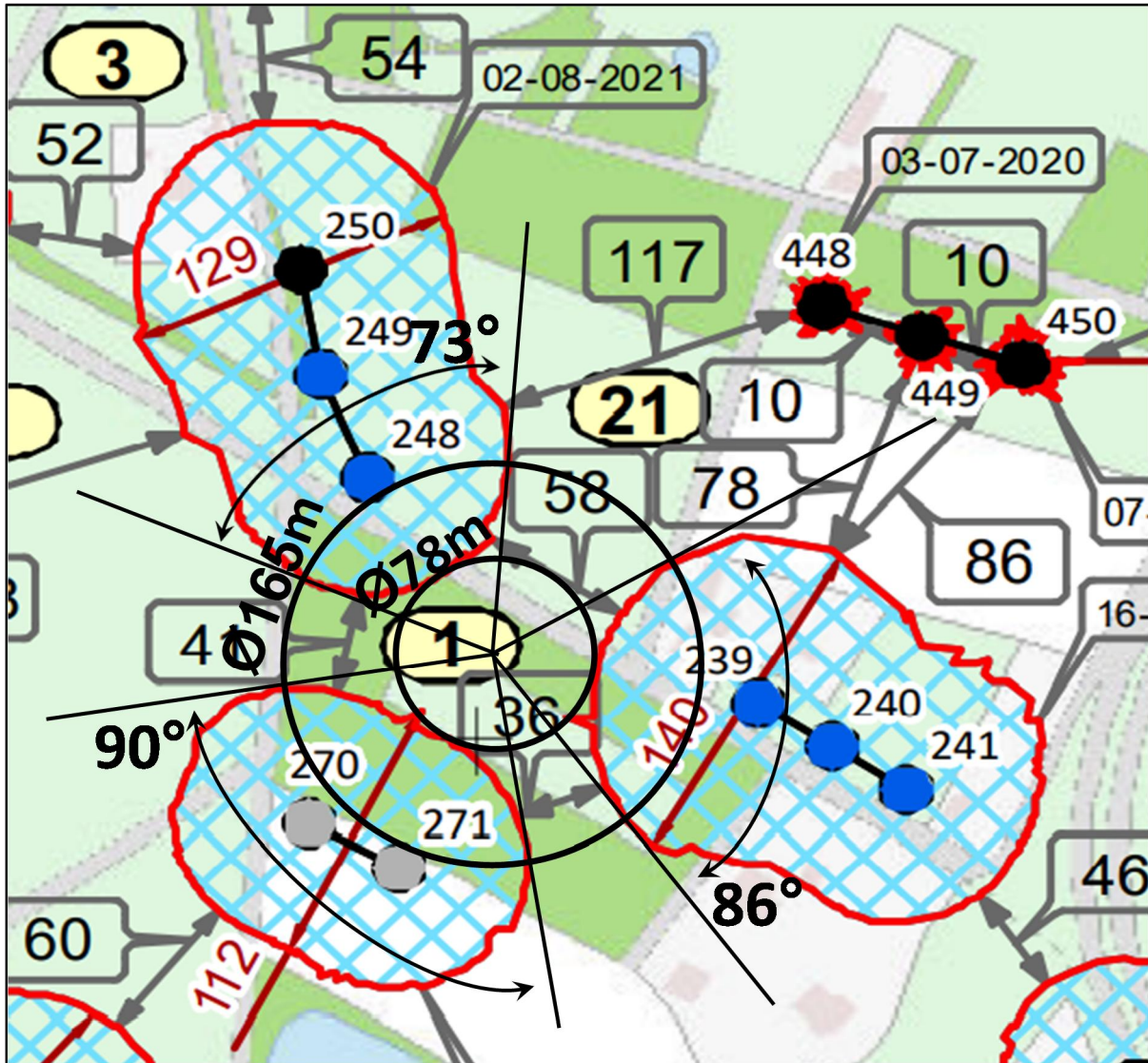
Put	Caverneserie	Hoogte caverne [m]	Hoogte caverne ≤ 40 m? [ja/nee]	Omliggende cavernes	Pijlerbreedte [m]	Pijlerbreedte ≥ 68 m? [ja/nee]	Pijler onderdeel van cluster? [ja, nr. cluster/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij? [ja/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij ≥ 20 m [ja/nee]	Stabiliteit aantonen [BGR / Respec / maatwerk]
TWR-262	262	12,8	ja	207	74	ja	ja, 10	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 31,9 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-263		11	ja	259	83	ja	ja, 10	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 31,9 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-264		7	ja							
TWR-270	270	24	ja	248	41	nee	ja, 1	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 20,3 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
TWR-271		26	ja	239	36	nee	ja, 1	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 20,3 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
				272	60	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-281	281	22	ja	245	53	nee	ja BGR-3D	nee	n.v.t.	BGR, $H_{max} = 43 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-282		24	ja	283	55	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-283		21,1	ja	281	55	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-284	283	27,3	ja	285	56	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-290		22,5	ja	275	53	nee	ja, 8	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 36,3 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-291		22,0	ja	278	127	ja	ja, 8	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 36,3 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-292	290	19,5	ja	293	26	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-293		29,8	ja	431	92	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-294		20,1	ja	290	26	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-295	293	21	ja	296	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-296		25,3	ja	293	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-297		23,3	ja	299	43	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-298	296	30,5	ja	358	83	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-299		25,5	ja	358	80	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-300		32	ja	296	43	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-301	299	28,5	ja	299	50	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-302		9	ja	299	50	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-303		23,7	ja	387	151	nee	nee	ja	n.v.t.	BGR
TWR-304	302	17	ja	440	37	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-305		13,2	ja	201	83	ja	ja, 2	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 30,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-306		29,5	ja	308	78	ja	ja, 2	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 30,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-307	305	10,5	ja	352	86	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				485	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-314	314	30,2	ja	331	52	nee	ja, 9	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 23,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
TWR-315			ja	325	57	nee	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-316		21,4	ja	317	120	ja	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
				311	80	ja	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
				225	85	ja	ja, 9	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 23,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
TWR-317	317	26,7	ja	314	120	ja	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-318		24	ja	325	66	nee	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-319		18,5	ja	445	74	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				311	52	nee	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-320		27,9	ja	323	71	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-321	320	32,2	ja	340	79	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-322		29,7	ja	445	96	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-323		29,5	ja	320	71	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-324	323	23	ja							
TWR-325		20	ja	328	50	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-326		28,5	ja	317	66	nee	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
TWR-327	325	29,5	ja	314	57	nee	ja, 5	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 27,0 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$ → maatwerk
TWR-328		23,5	ja	325	50	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-329		13,5	ja	331	34	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-330	328	21,8	ja							
TWR-331		13,1	ja	334	66	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-332		10,3	ja	328	34	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-333	331	16,5	ja	314	52	nee	ja, 9	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 23,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-334	334	19,2	ja	225	52	nee	ja, 9	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 23,5 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-335		25,5	ja	218	75	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-336		22	ja	331	66	ja	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-337	337	14	ja	446	66	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-338		16,8	ja	340	22	nee	ja	ja	n.v.t.	BGR
TWR-339		12	ja	478	39	nee	nee	ja	n.v.t.	BGR
TWR-340	340	28,1	ja	445	99	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-341		16,2	ja	320	79	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-342		21,1	ja	343	68	nee	ja	ja	n.v.t.	BGR
				337	22	nee	nee	ja	n.v.t.	BGR
				446	83	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-355	355	33	ja	187	63	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-356		12,8	ja	184	100	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-357		35	ja	196	127	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-364	364	32	ja	480	122	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-365		29,9	ja	367	130	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-366		22,9	ja	278	79	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-375	375	19,2	ja	372	76	ja	nee	ja	ja	BGR
TWR-376		21,1	ja	378	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-377		20	ja							
TWR-378	378	7,5	ja	375	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-379		12,7	ja	381	144	ja	nee	ja	ja	BGR
TWR-380		17,5	ja	475	125	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-384	384	21,2	ja	475	143	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-385		16,1	ja	381	72	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-386		27,5	ja	387	54	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-387	387	26,2	ja	384	54	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-388		18	ja	302	151	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-389		20,9	ja							
TWR-390	390	17,6	ja	393	67	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-391		16,7	ja	256	52	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-392		14	ja							
TWR-393	393	15	ja	402	114	ja	ja, 11	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 33,2 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-394		14	ja	396	41	ja	ja, 11	nee	n.v.t.	Respec, $H_{max} = 33,2 \text{ m}$, $H_{cav} < H_{max}$
TWR-395		19,2	ja	483	106	nee	nee	ja	n.v.t.	BGR
				390	67	nee	nee	ja	n.v.t.	BGR
TWR-408		18,5	ja	419	47	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-409	408	9	ja	399	77	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-410			ja	396	116	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				402	166	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-416	416	16,3	ja	419	79	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-417		14,5	ja	414	73	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-418		13,7	ja	422	50	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-419	419	15	ja	463	179	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-420		21,95	ja	408	47	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-421		16,5	ja	416	79	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-422	422	15,4	ja	416	50	nee	ja	ja	ja	BGR
TWR-423		15,2	ja	425	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-424		18,5	ja							
TWR-425	425	12,9	ja	422	44	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-426		8,5	ja	428	57	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-427		11,8	ja							

Put	Caverneserie	Hoogte caverne [m]	Hoogte caverne ≤ 40 m? [ja/nee]	Omliggende cavernes	Pijlerbreedte [m]	Pijlerbreedte ≥ 68 m ? [ja/nee]	Pijler onderdeel van cluster? [ja, nr. cluster/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij? [ja/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij ≥ 20 m [ja/nee]	Stabiliteit aantonen [BGR / Respec / maatwerk]
TWR-428	428	13,1		425	57	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-429		15,5		432	96	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-430		16,5								
TWR-432	432	14,2	ja	428	96	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-433		15	ja	434	90	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-434		7,8	ja	432	90	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-435	434	8,9	ja	443	65	nee	nee	nee	n.v.t.	Maatwerk
TWR-436		3,1	ja	77	150	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				437	91	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-437		12	ja	434	91	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-438	437	12,8	ja	69	163	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-439		13,8	ja							
TWR-440	440	22,7		302	37	nee	nee	ja	ja	BGR
				441	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-441	441	19,6		440	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				442	24	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-442	442	20		441	24	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-443	443	14,3	ja	434	65	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-444		13,3	ja	77	66	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-445	445	27,2		317	74	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				320	96	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				340	99	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				446	25	nee	nee	ja	ja	BGR
TWR-446	446	28,8		445	25	nee	nee	ja	ja	BGR
				340	83	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				337	66	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-451		13,1		457	82	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-452	451	10,2		450	134	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-453		9,8								
TWR-454		16,9	ja	457	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-455	454	14,3	ja	411	114	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-456		11,7	ja							
TWR-457		14,4		451	82	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-458	457	12,4		454	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-459		13,4		460	83	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-460		12,5		457	83	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-461	460	12,4		466	140	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-462		16,5		463	49	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-466		14,5		463	69	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-467	466	13		460	140	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-468		12,8		411	58	nee	nee	nee	n.v.t.	maatwerk
TWR-475		20,6		472	145	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-476		19,5		378	125	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-477		20,2		381	141	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				384	143	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-480	480	27,3		497	87	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-481		25,7		364	122	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-482	482	20,8		170	80	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				184	87	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				187	80	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				178	76	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-483	483	18,5		393	106	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				484	76	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
Put	Caverneserie	Hoogte caverne [m]	Hoogte caverne ≤ 40 m? [ja/nee]	Omliggende cavernes	Pijlerbreedte [m]	Pijlerbreedte ≥ 68 m ? [ja/nee]	Pijler onderdeel van cluster? [ja, nr. cluster/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij? [ja/nee]	Pijler tussen cavernes in een rij ≥ 20 m [ja/nee]	Stabiliteit aantonen [BGR / Respec / maatwerk]
TWR-484	484	17,9		231	109	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				396	98	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				234	84	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				483	76	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
TWR-485	485	24,5		201	101	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR
				305	70	ja	nee	nee	n.v.t.	BGR

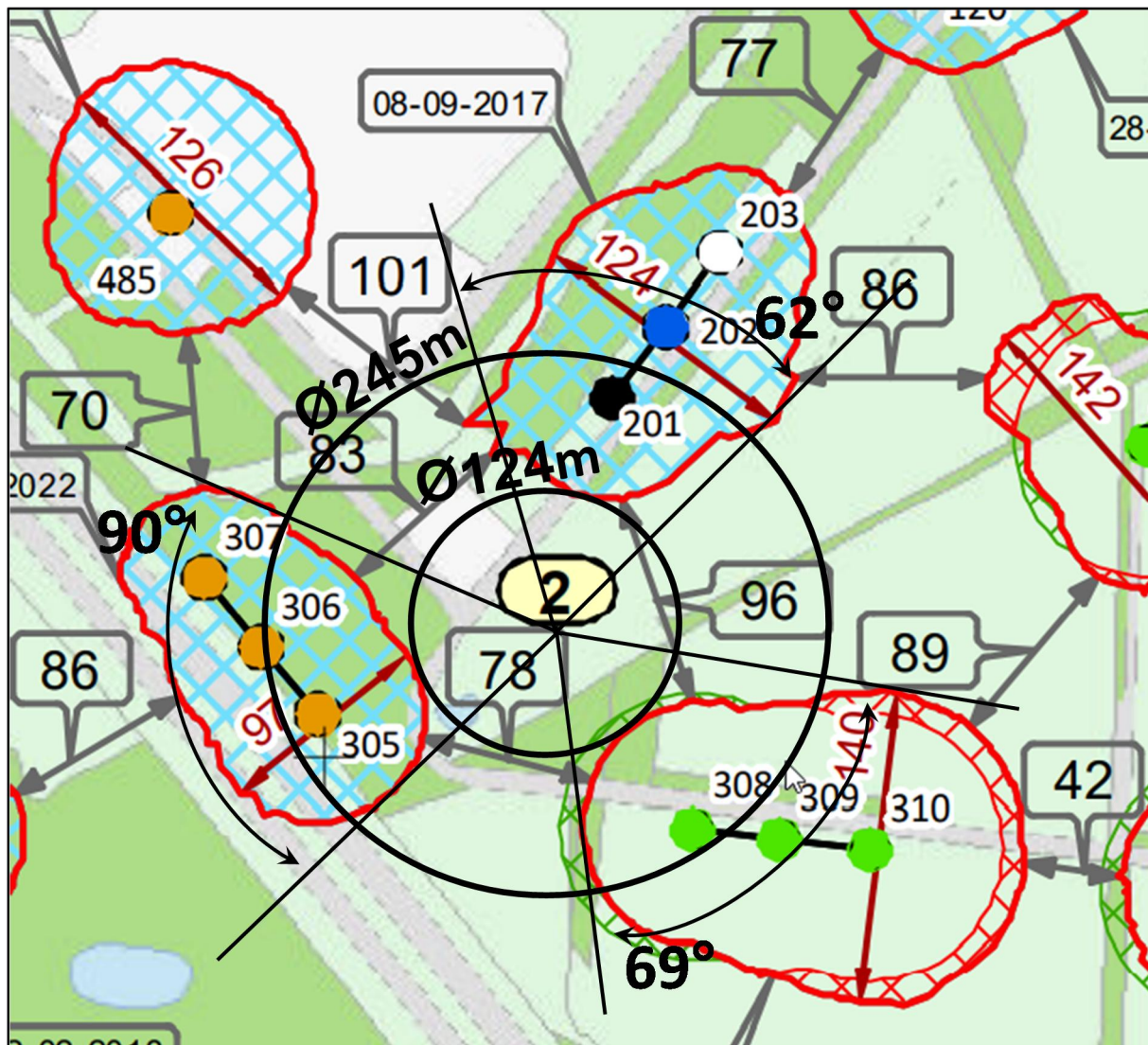
Bijlage 3: Herberekening pijlerstabiliteit caverneclusters

Tributary loading area procedure for pillar stability analysis of Nobian cavern clusters assigned in 'Verwijderingsplan Zout Twenthe-Rijn fase 3'																								
GeoDetect-reanalysis of pillar height for 30% utilisation rate and calculation of actual utilisation rate // Cavern data from Stability Table Nobian BPB 2022-11-16																								
Input parameters																								
Reference depth caverns	D	m-GL																						
Vertical stress gradient	dp/dh	MPa/m																						
Brine pressure gradient	dp/dh	MPa/m																						
Average cavern height	H	m																						
Cavern brine pressure	P	MPa																						
Premining vertical stress	σ0	MPa																						
Inscribed pillar diameter	W	m																						
Overscribed pillar diameter	Wo	m																						
Cumulative cavern angle	β	Degree																						
Stability criterion (η=30%)	ξ=1/2/1/=	0.85/(3/1+0.08)																						
Calculations																								
σv = (σ0- PB/360 (1-(W/Wo)²))/ (1-β/360 (1-(W/Wo)²))																								
σr = β/360 (P + 0.1σv(W/H)) + (1-β/360)σ0																								
σθ = 0.1 σv(W/H)																								
It = σvσrσθ																								
W2 = √[It/6] (σvσr)² + (σrσθ)² + (σvσθ)²																								
ξ=0.2/1																								
Minimize function via Data-Solver for η=30%: f(H) = 2.55*Q.068*H¹¹·W2																								
η-function (11=0): η(H)= 10*W/2-11.765*η(H)9%																								
Cluster number	Ref. depth (m below GL)	Vertical stress grad. (MPa/m)	Brine pres. grad. (MPa/m)	Premining vertical stress (MPa)	Brine pressure (MPa)	Inscribed pillar diam. (m)	Over-scribed pillar diam. (m)	Cumul. cav. angle (deg)	After-mining vert. stress (MPa)	Minimize f(H) for η=30% (-)	Allowable Hmaxpillar for η=30% (m)	Safe max. cavern height for b=1.11 (m)	Cavern1 series	Average Hcav1 (m)	Cavern2 series	Average Hcav2 (m)	Cavern3 series	Average Hcav3 (m)	Cavern4 series	Average Hcav4 (m)	Average Hcav4 (m)	f(η)-value for Hcav4	n-value for Hcav4 (%)	
1	410	0.02350	0.01180	9.64	4.84	78	165	249	15.20	0.00	20.3	29.6	239	27.2	248	25.4	270	25.0	25.0	25.9	25.9	3.32	39	
2	500	0.02350	0.01180	11.75	5.90	124	245	203	15.98	0.00	31.6	33.8	201	29.3	305	17.7	308	24.5	25.1	25.3	23.8	23.8	1.33	16
3	400	0.02350	0.01180	9.40	4.72	98	216	222	13.89	0.00	27.6	28.2	237	27.0	248	25.4	251	25.3	25.3	25.9	25.9	2.35	28	
4	515	0.02350	0.01180	12.10	6.08	105	206	208	16.61	0.00	26.1	36.7	182	18.0	198	20.7	352	13.7	13.7	17.5	17.5	0.58	7	
5	450	0.02350	0.01180	10.58	5.31	150	244	213	13.64	0.00	43.2	31.2	311	28.5	314	25.8	317	23.1	23.1	325	26.0	25.9	0.68	8
7	450	0.02350	0.01180	10.58	5.31	119	218	202	14.00	0.00	33.5	33.1	275	23.4	278	27.9	287	17.6	17.6	287	17.6	23.0	1.19	14
8	450	0.02350	0.01180	10.58	5.31	125	235	192	13.84	0.00	35.6	32.4	275	23.4	278	27.9	290	21.4	21.4	287	17.6	24.2	1.19	14
9	440	0.02350	0.01180	10.34	5.19	102	209	238	15.56	0.00	26.3	29.8	225	26.8	314	25.8	331	13.3	13.3	325	26.0	24.2	1.19	14
10	360	0.02350	0.01180	8.46	4.25	112	216	186	11.02	0.00	41.1	20.5	207	19.4	259	24.6	262	10.3	10.3	325	26.0	22.0	1.83	21
11	380	0.02350	0.01180	8.93	4.48	127	200	185	10.90	0.00	47.2	24.1	393	16.1	396	20.7	402	7.0	7.0	325	26.0	18.1	0.28	3
12	370	0.02350	0.01180	8.70	4.37	123	241	148	10.59	0.00	47.5	23.0	402	7.0	405	18.1	414	13.3	13.3	325	26.0	14.6	-1.12	0
M22	445	0.02350	0.01180	10.46	5.25	161	259	281	15.24	0.00	42.3	30.2	314	25.8	325	26.0	328	19.6	19.6	331	13.3	21.2	-0.71	0
M23-A	500	0.02350	0.01180	11.75	5.90	92	169	219	16.13	0.00	23.3	36.0	337	14.3	340	21.8	446	28.8	28.8	331	13.3	21.6	2.26	27
M23-B	495	0.02350	0.01180	11.63	5.84	109	217	213	16.23	0.00	27.5	35.2	340	21.8	445	27.2	446	28.8	28.8	331	13.3	21.6	2.26	27
M24	515	0.02350	0.01180	12.10	6.08	110	196	188	15.46	0.00	28.6	37.0	184	54.5	187	37.3	355	26.9	26.9	331	13.3	39.6	3.53	41
1-actual	410	0.02350	0.01180	9.64	4.84	78	165	249	15.20	0.00	20.3	---	239	21.3	248	18.2	270	27.0	27.0	---	---	22.2	2.85	34
M24-actual	515	0.02350	0.01180	12.10	6.08	110	196	188	15.46	0.00	28.6	---	184	36.0	187	22.8	355	11.5	11.5	---	---	23.4	1.77	21
Actual refers to realistic cavern height exclusively within domain of overscribed cluster pillar																								

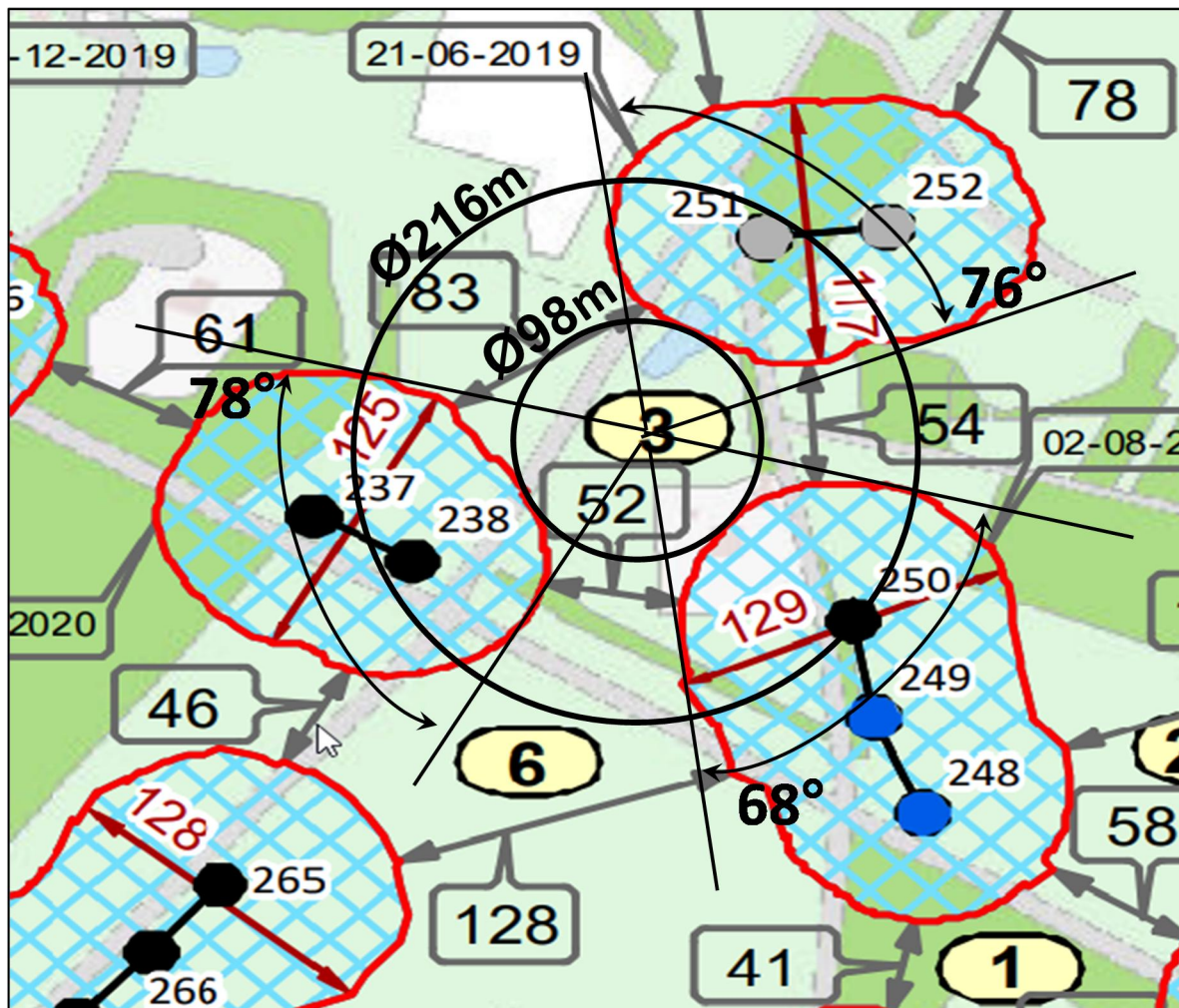
Bijlage 4: Geometrie van de onderzochte cavernecusters



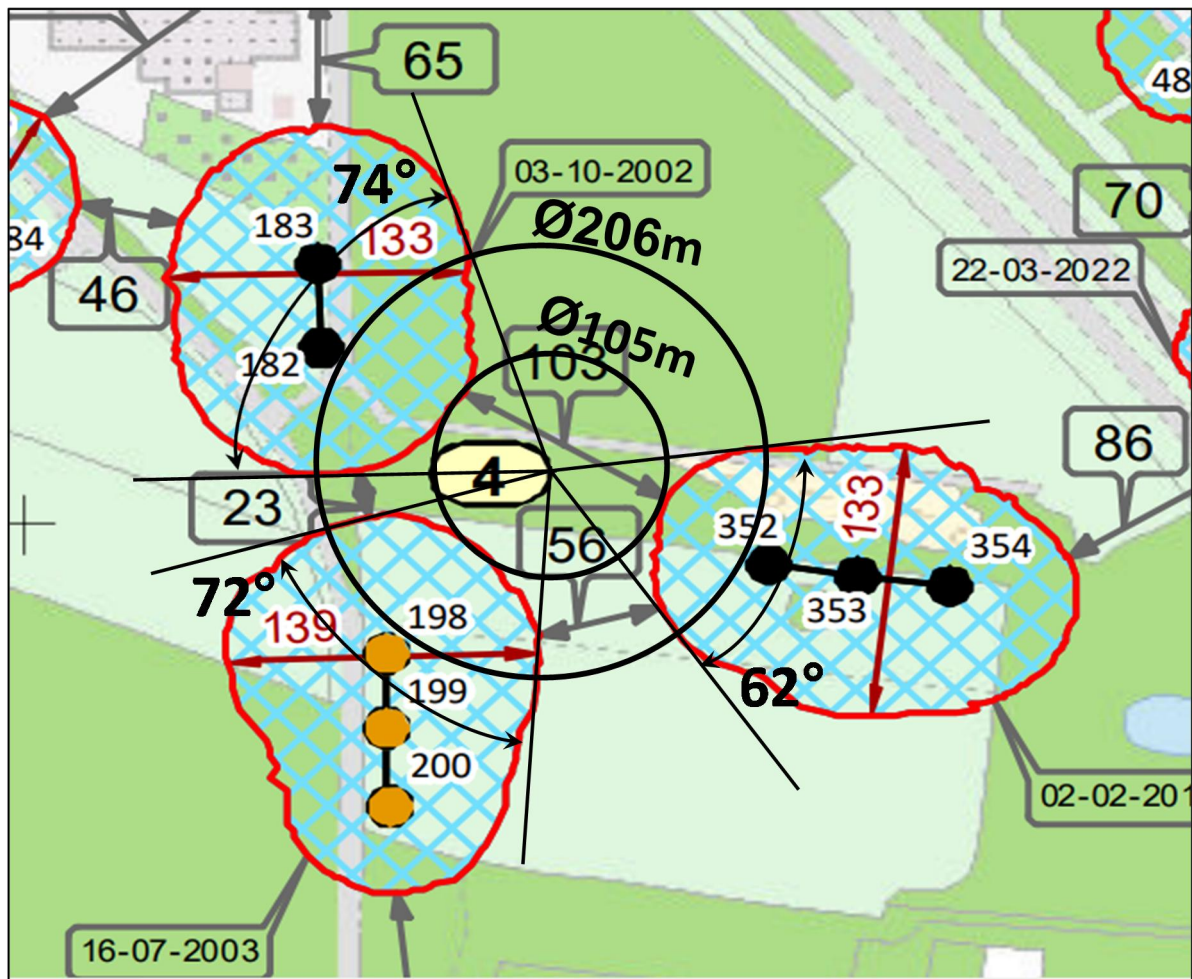
Cluster 1: gemiddelde diepte 410 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 25,9 m (toelaatbaar 20,3 m), zoutbenuttingsgraad 39%.



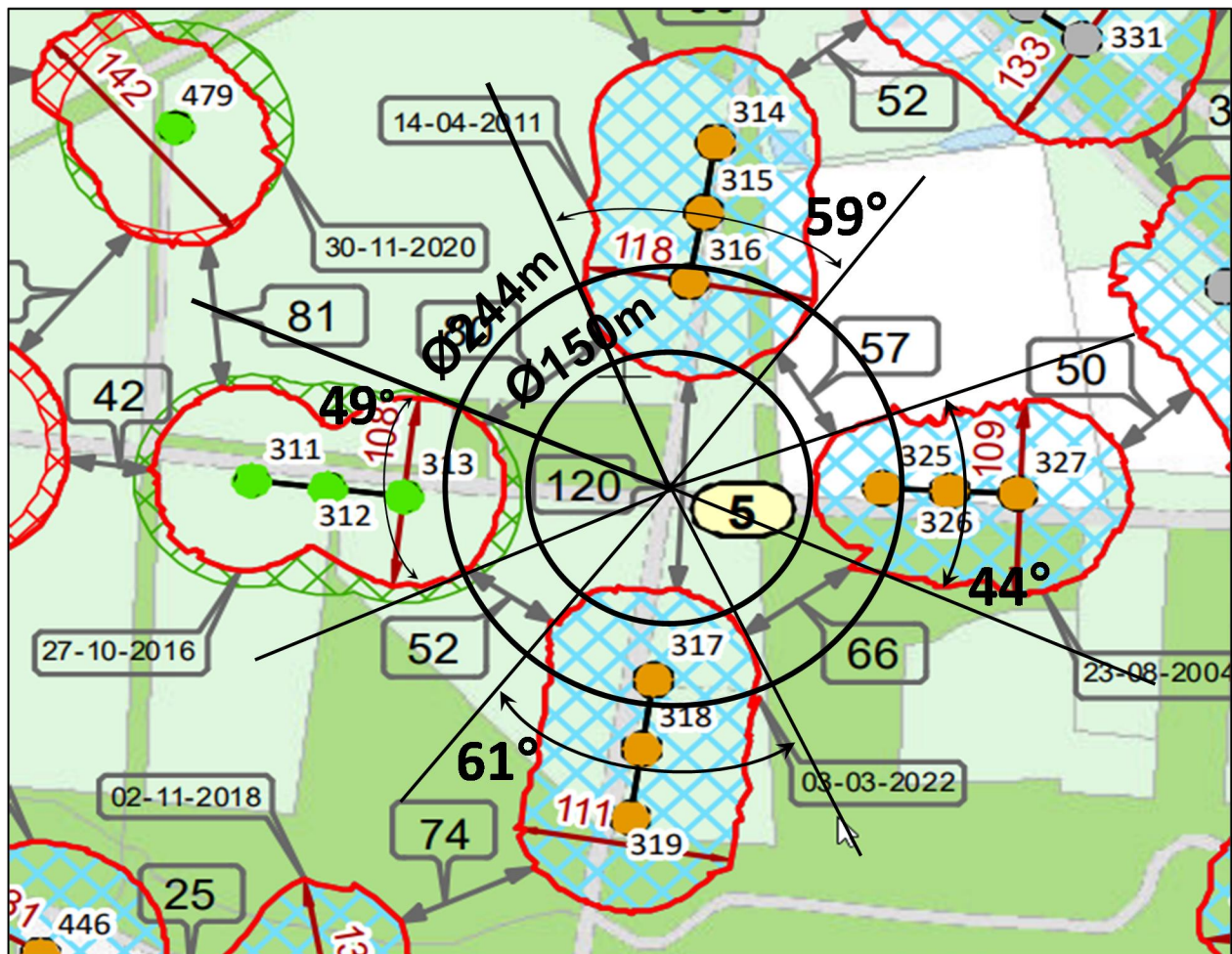
Cluster 2: gemiddelde diepte 500 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 23,8 m (toelaatbaar 31,6 m), zoutbenuttingsgraad 16%.



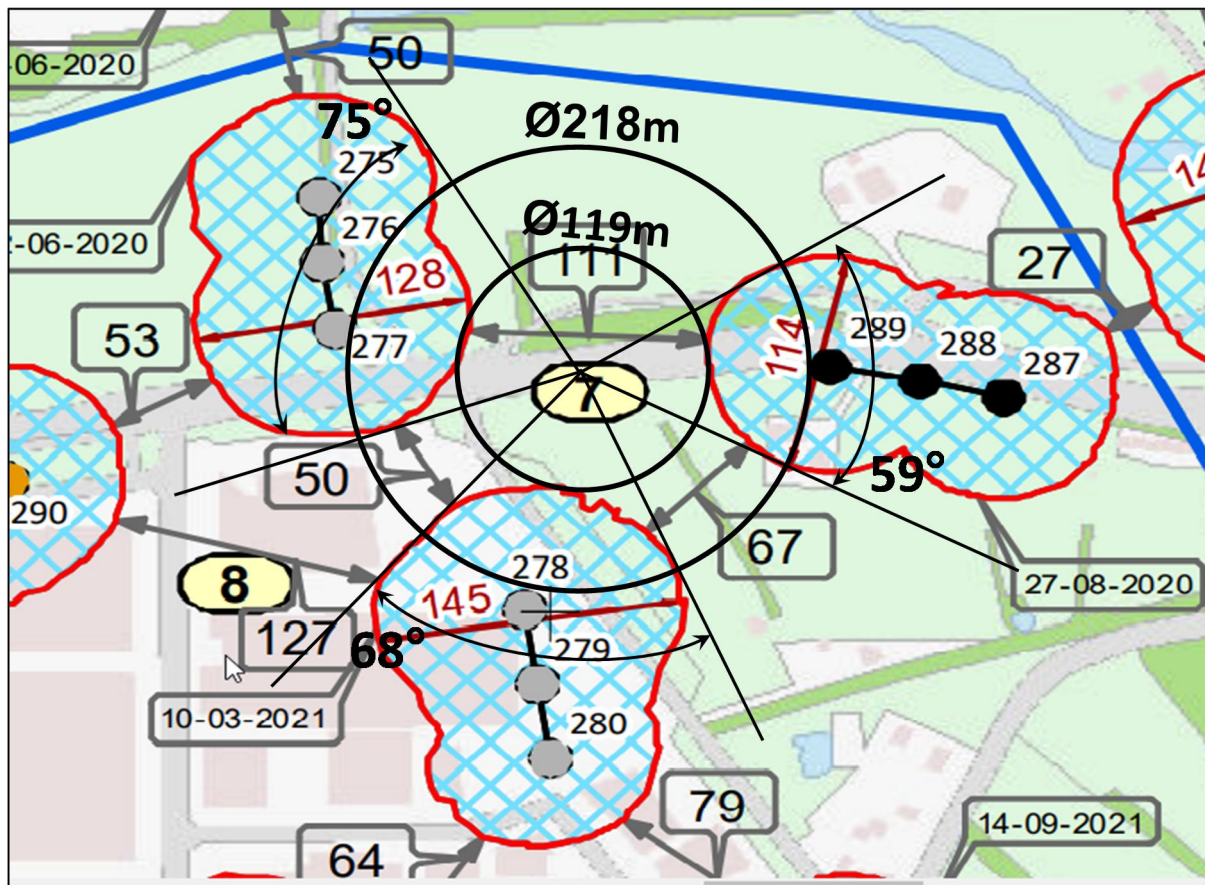
Cluster 3: gemiddelde diepte 400 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 25,9 m (toelaatbaar 27,6 m), zoutbenuttingsgraad 28%.



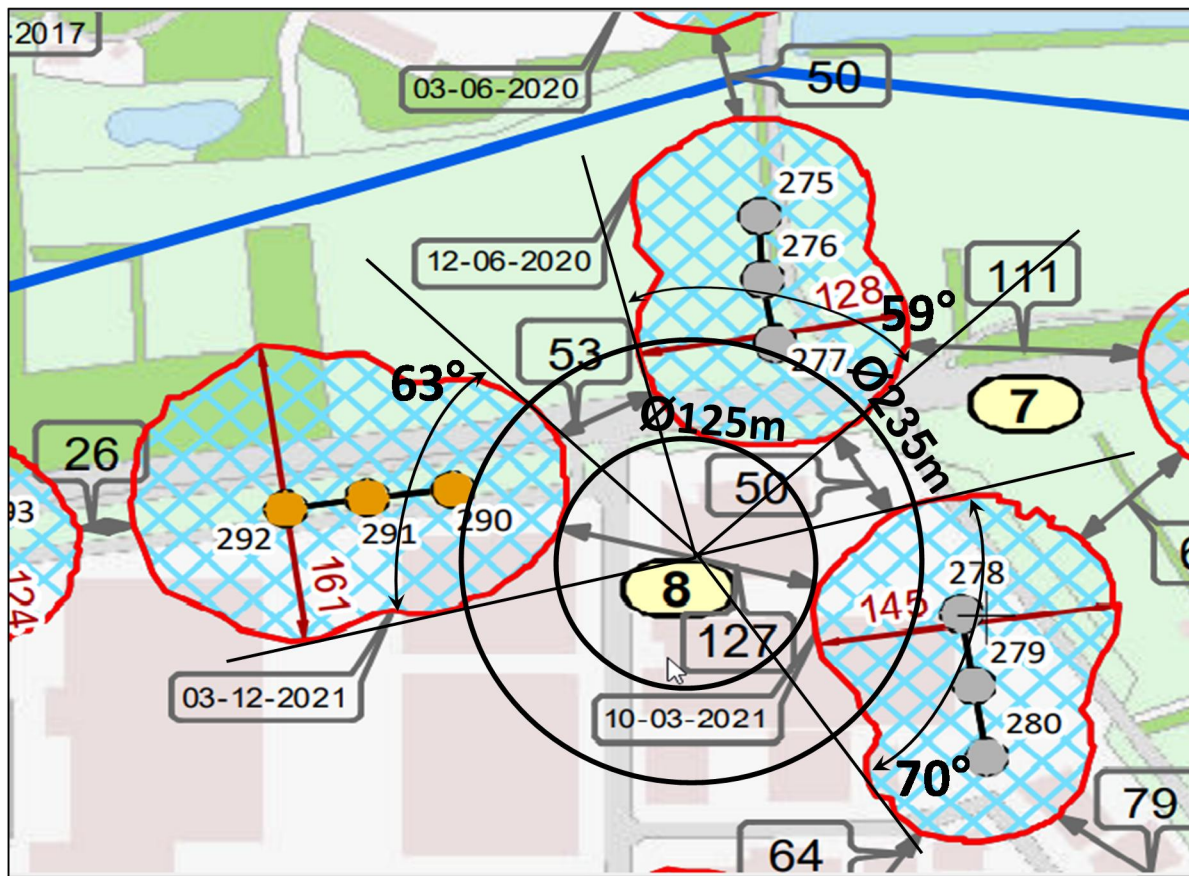
Cluster 4: gemiddelde diepte 515 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 17,5 m (toelaatbaar 26,1 m), zoutbenuttingsgraad 7%.



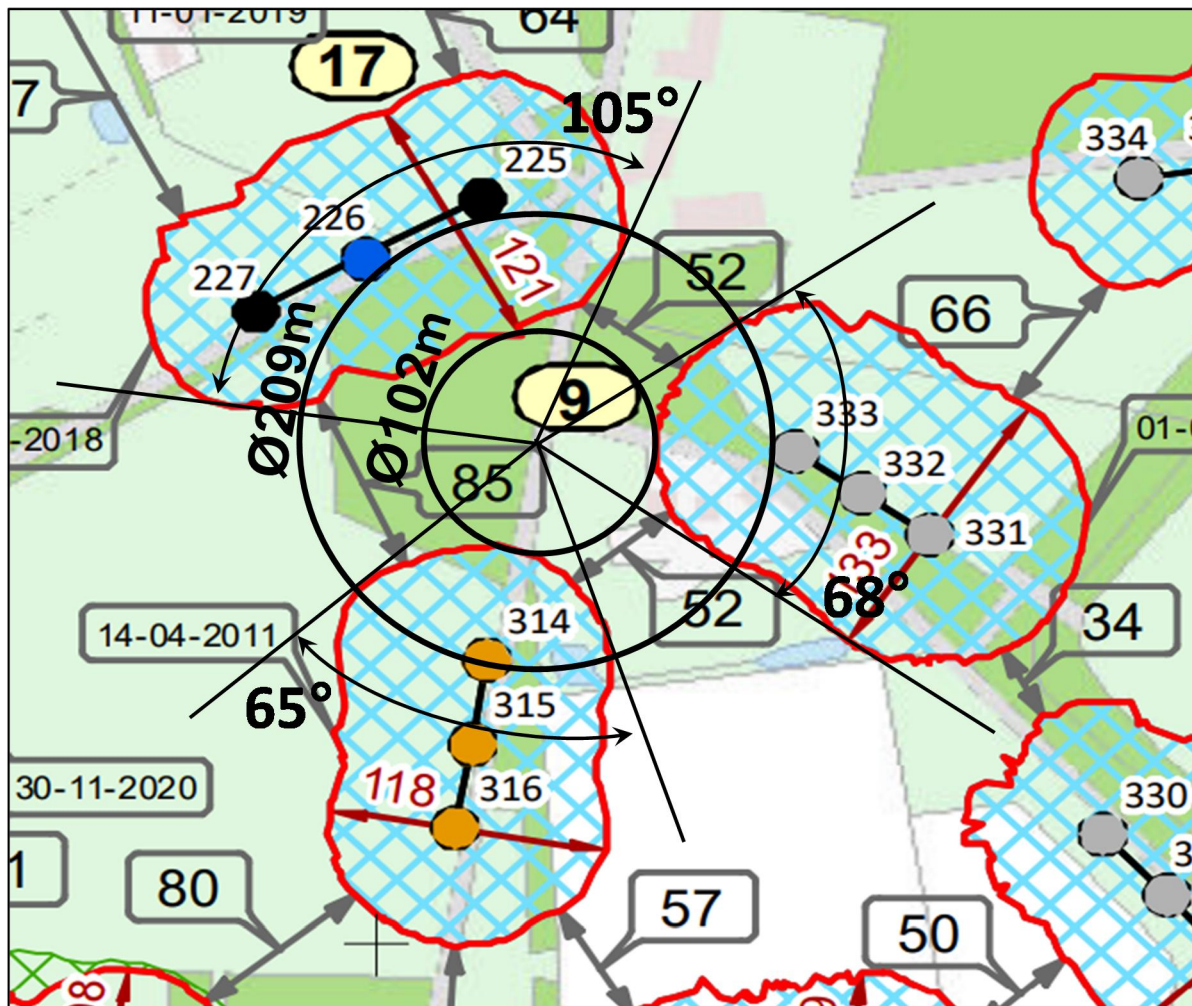
Cluster 5: het cluster is uitgebreid met de vierde caveerne 325, gemiddelde clusterdiepte 450 m beneden maaiveld, gemiddelde caveernehoopte 25,9 m (toelaatbaar 43,2 m), zoutbenuttingsgraad 8%. De binnen-cirkel is optimaal gedimensioneerd om het draagvlak van de centrale pijler te benaderen.



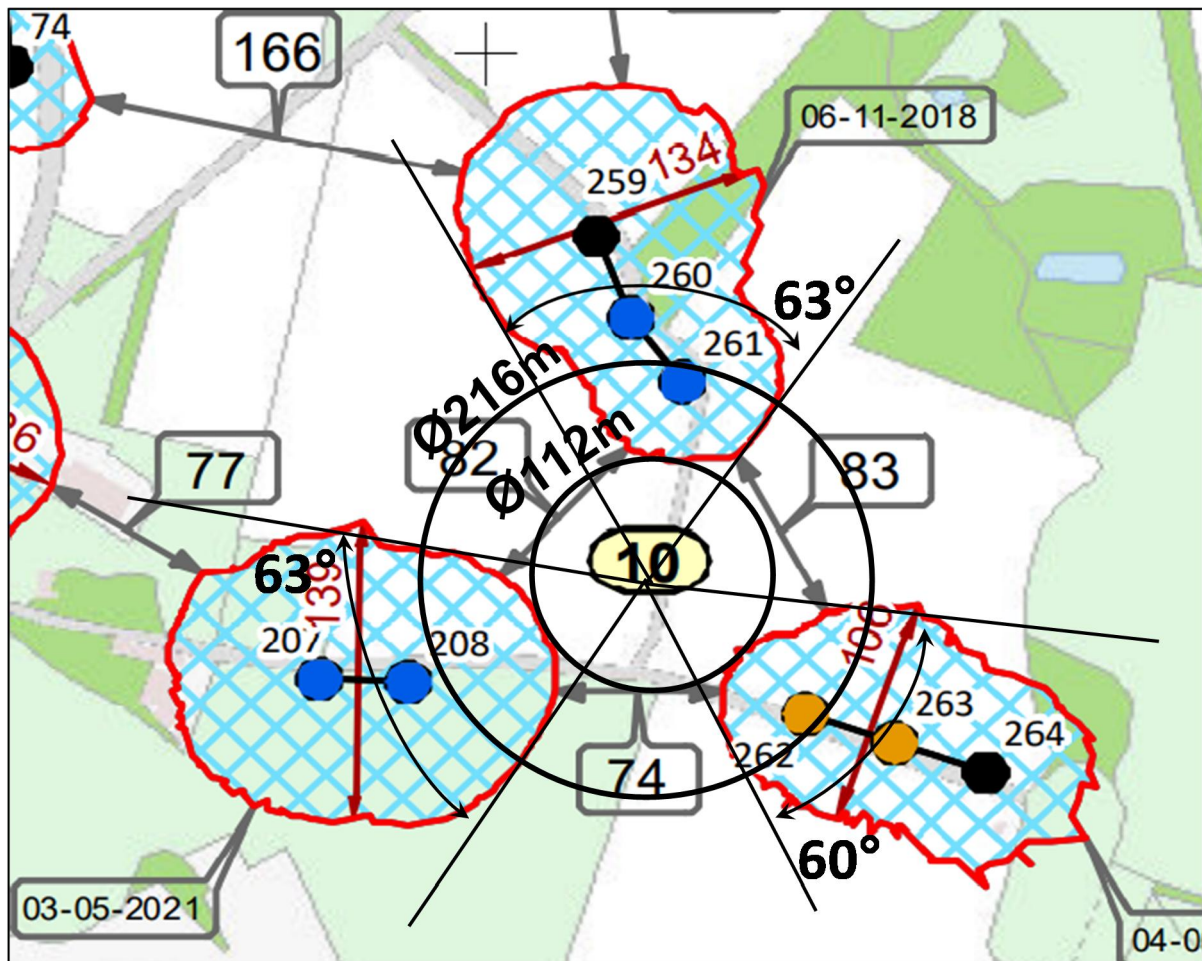
Cluster 7: gemiddelde diepte 450 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 23,0 m (toelaatbaar 33,5 m), zoutbenuttingsgraad 14%.



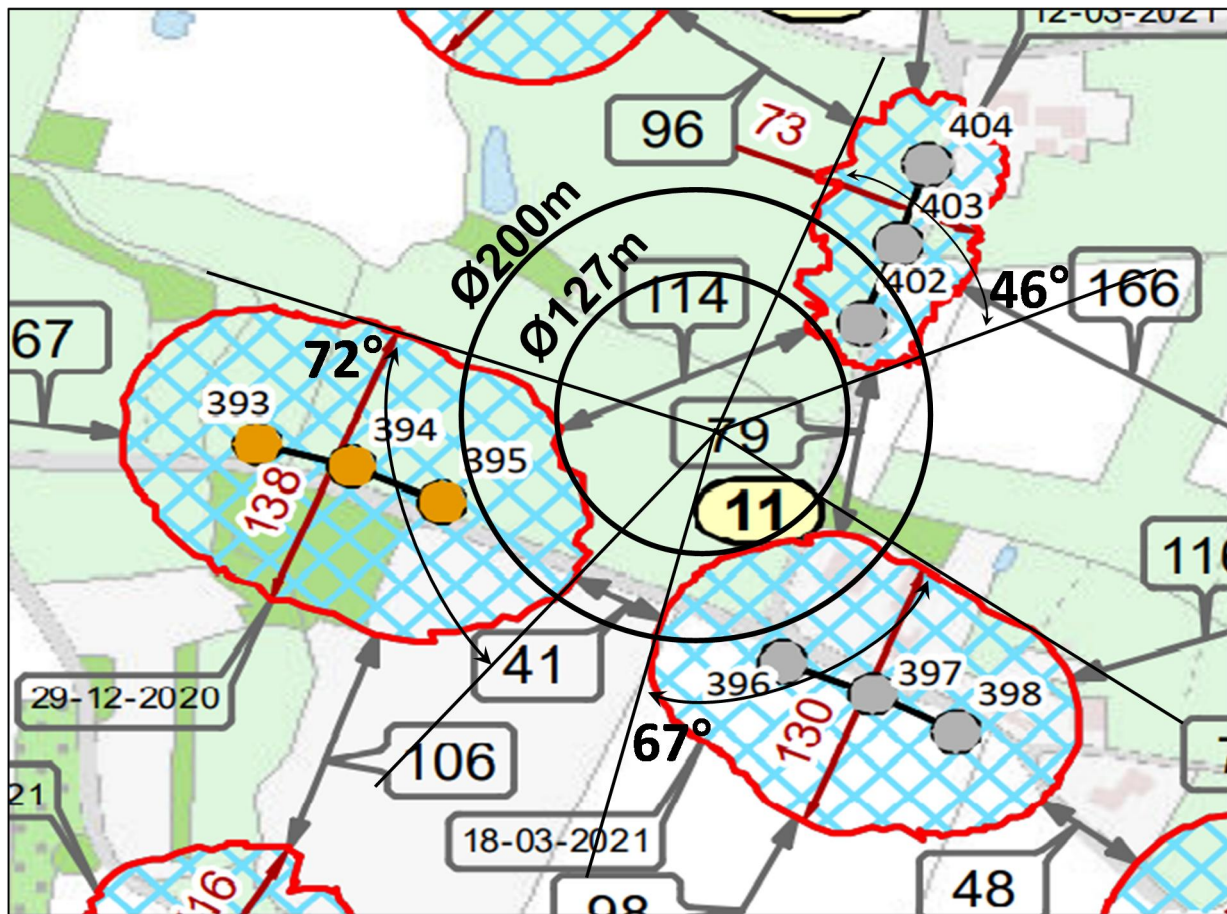
Cluster 8: gemiddelde diepte 450 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 24,2 m (toelaatbaar 35,6 m), zoutbenuttingsgraad 14%.



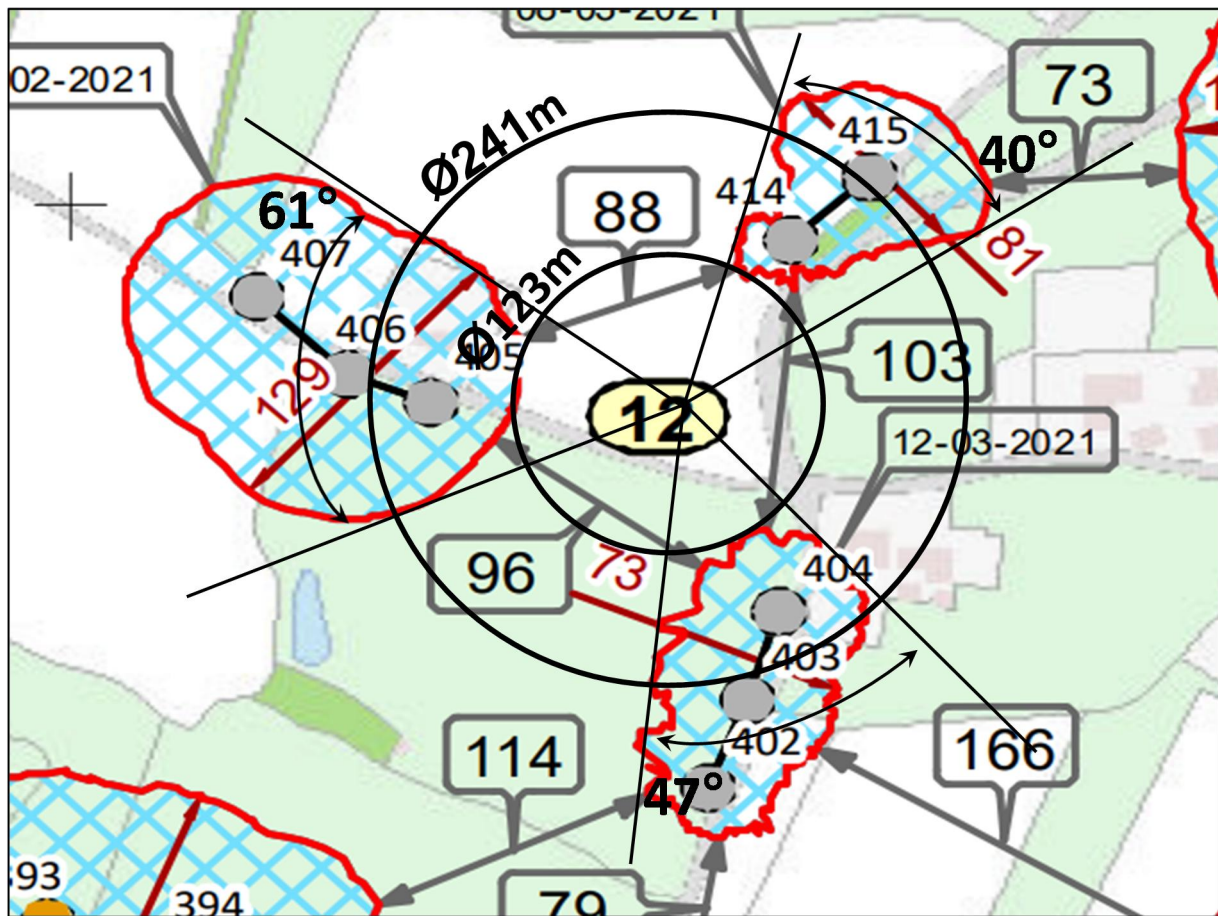
Cluster 9: gemiddelde diepte 440 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 22,0 m (toelaatbaar 26,3 m), zoutbenuttingsgraad 21%.



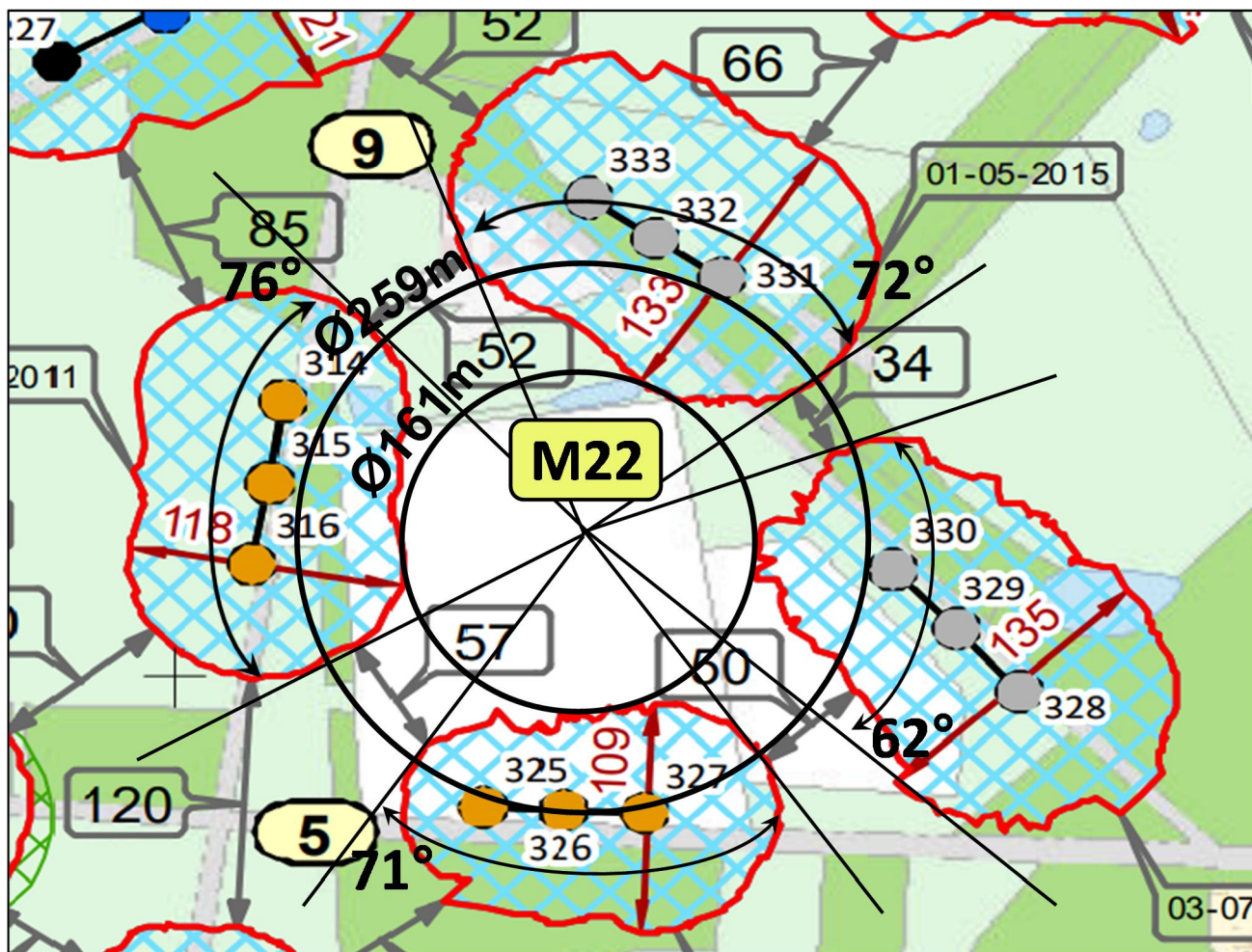
Cluster 10: gemiddelde diepte 360 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 18,1 m (toelaatbaar 41,1 m), zoutbenuttingsgraad 3%. Caverne 259 voldoet met een gemiddelde hoogte van 24,6 m niet aan de GSMP-richtlijnen voor inherent veilige hoogte ($H_{\text{max.safe}} = 20,5 \text{ m}$).



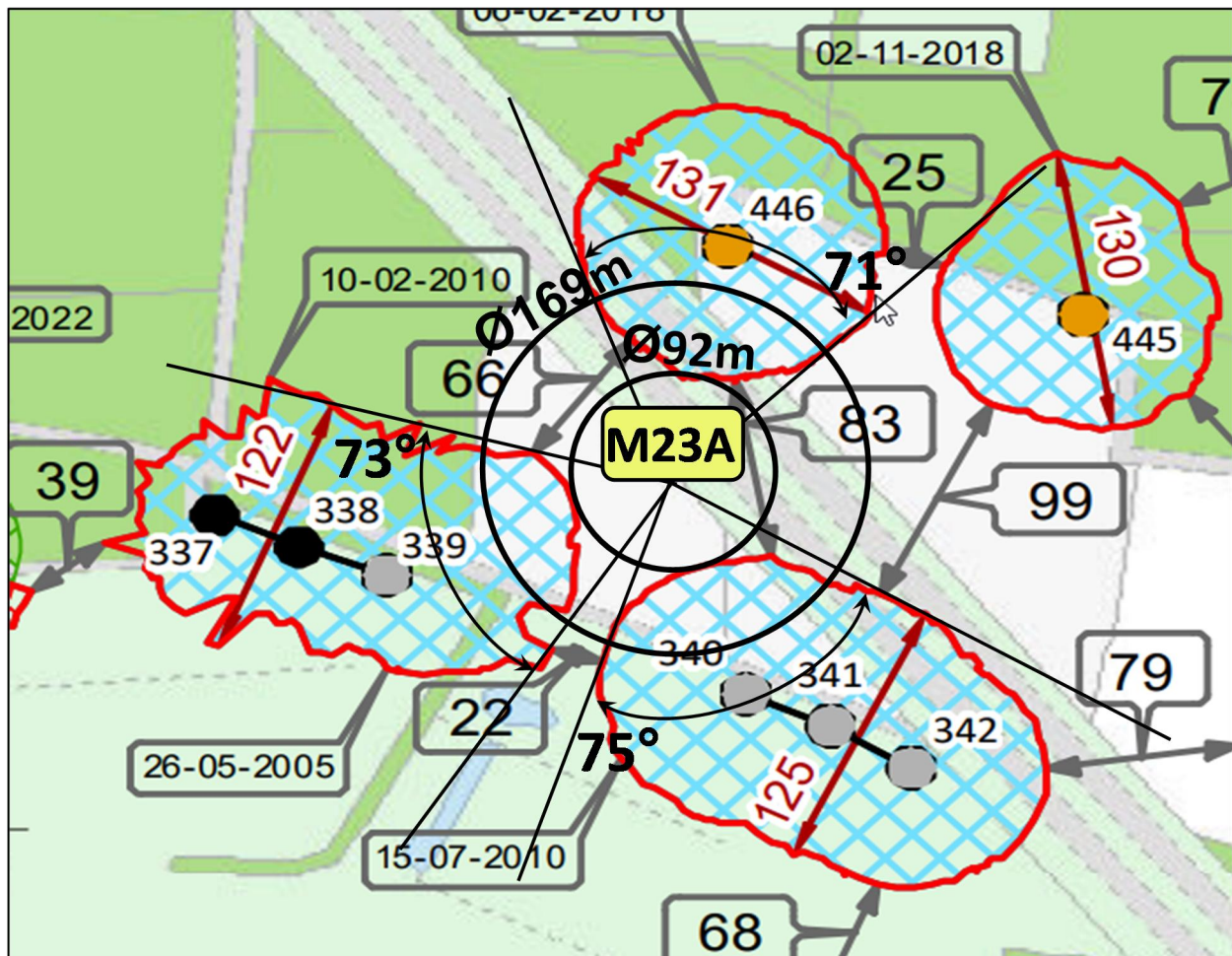
Cluster 11: gemiddelde diepte 380 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 14,6 m (toelaatbaar 47,2 m), zoutbenuttingsgraad 0%. De benuttingsgraad is fysisch onrealistisch, maar berust op een niet geheel perfecte linearisatie van de minimaliseringsfunctie $f(H)$ uit bijlage 3.



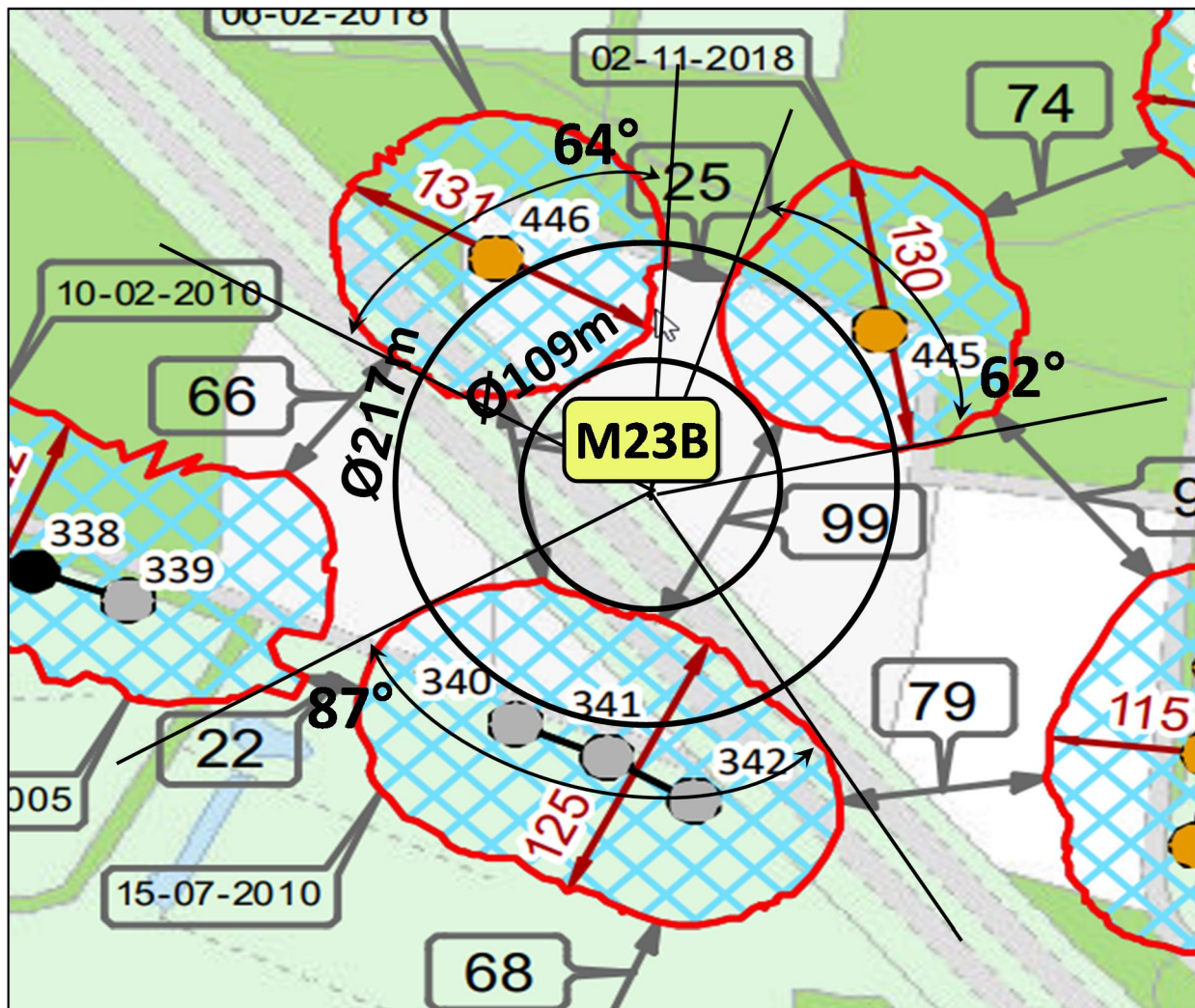
Cluster 12: gemiddelde diepte 370 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 12,8 m (toelaatbaar 47,5 m), zoutbenuttingsgraad 0% (zie opmerking bij cluster11).



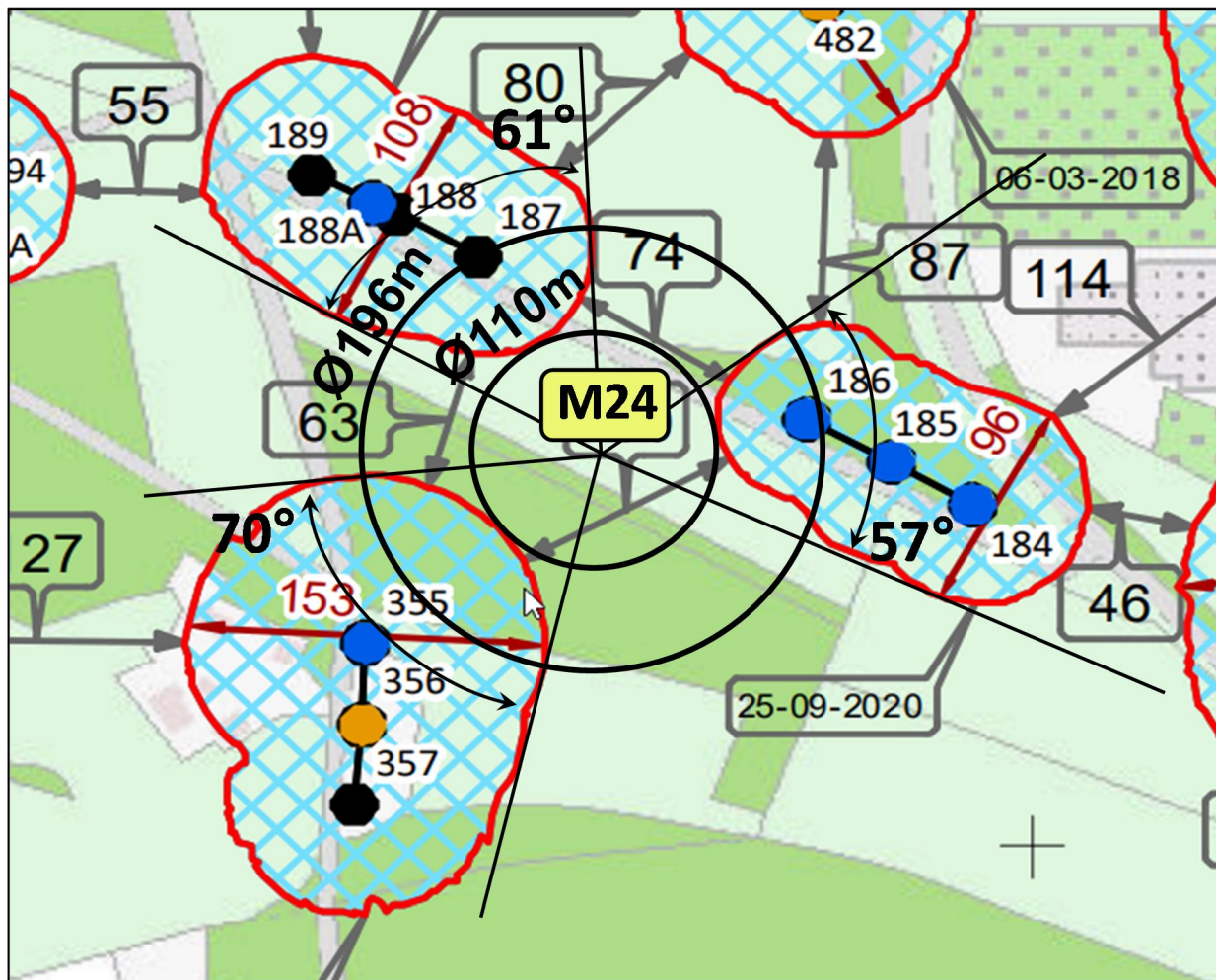
Cluster M22: gemiddelde diepte 445 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 21,2 m (toelaatbaar 42,3 m), zoutbenuttingsgraad 0% (zie opmerking bij cluster 11). De binnen-cirkel met een doorsnede van 160 m is zo groot en de gemiddelde cavernehoogte zo klein, dat feitelijk geen sprake meer is van een cavernecluster, waarbij de 'tributary loading area'-procedure nuttig is.



Cluster M23A: gemiddelde diepte 500 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 21,6 m (toelaatbaar 23,3 m), zoutbenuttingsgraad 27%.

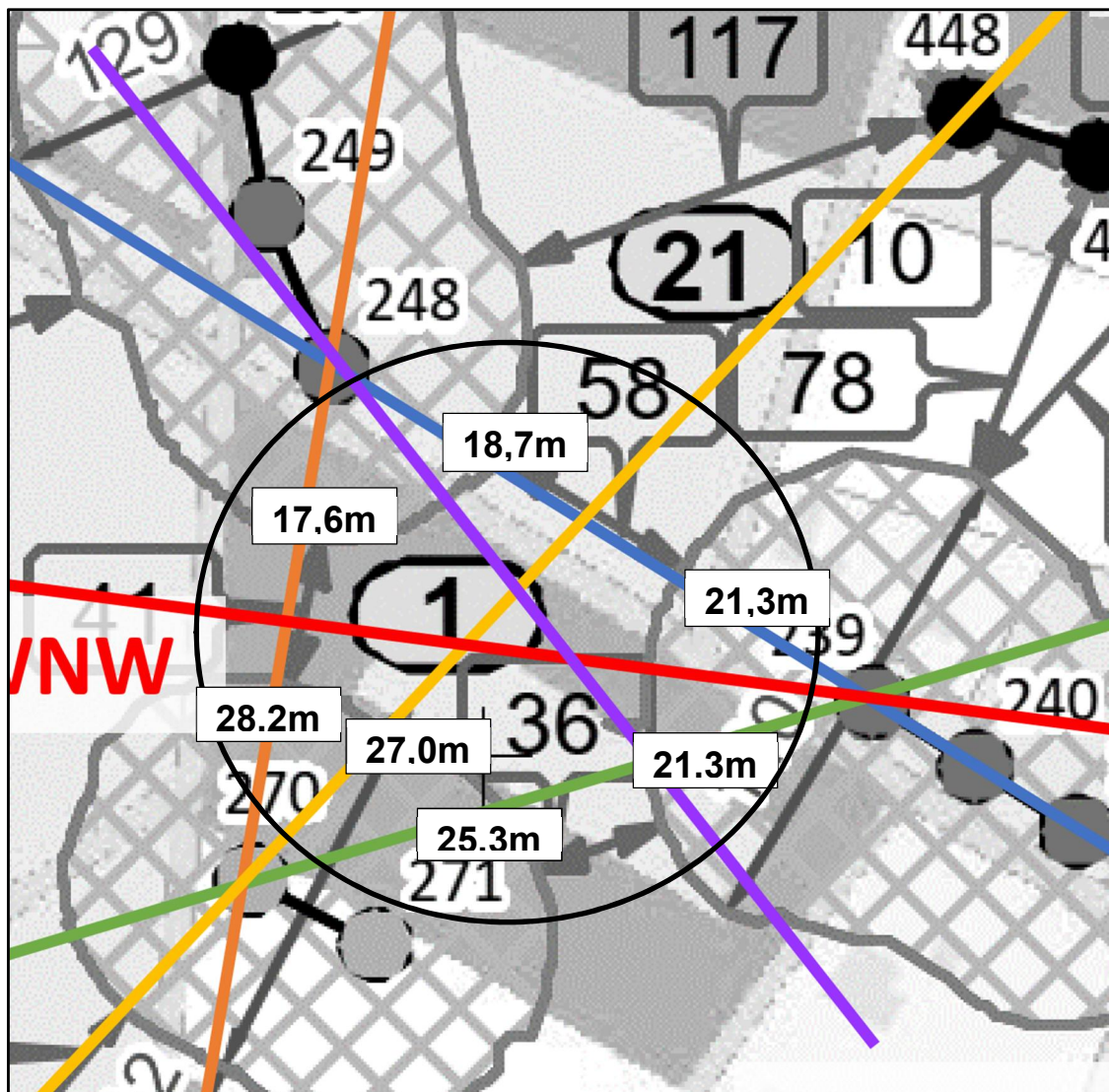


Cluster M23B: gemiddelde diepte 495 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 25,9 m (toelaatbaar 27,5 m), zoutbenuttingsgraad 27%.



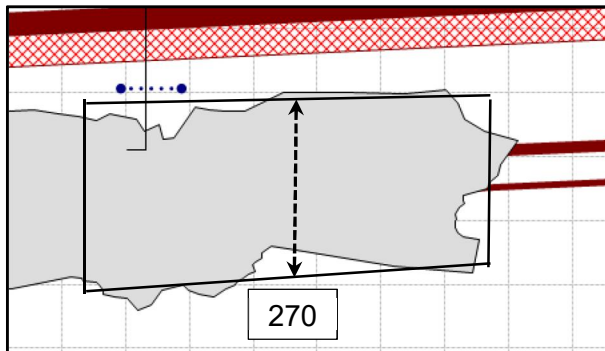
Cluster M24: gemiddelde diepte 515 m beneden maaiveld, gemiddelde cavernehoogte 39,6 m (toelaatbaar 28,6 m), zoutbenuttingsgraad 41%. De gemiddelde hoogtes van de cavernes 184 (54,5 m) en 187 (37,3 m) overstijgen de inherent veilige GSMP hoogte $H_{\text{max.safe}} = 37,0$ m.

Bijlage 5: Maatwerk cavernehoogten in buiten-cirkel van centrale pijler van cluster 1

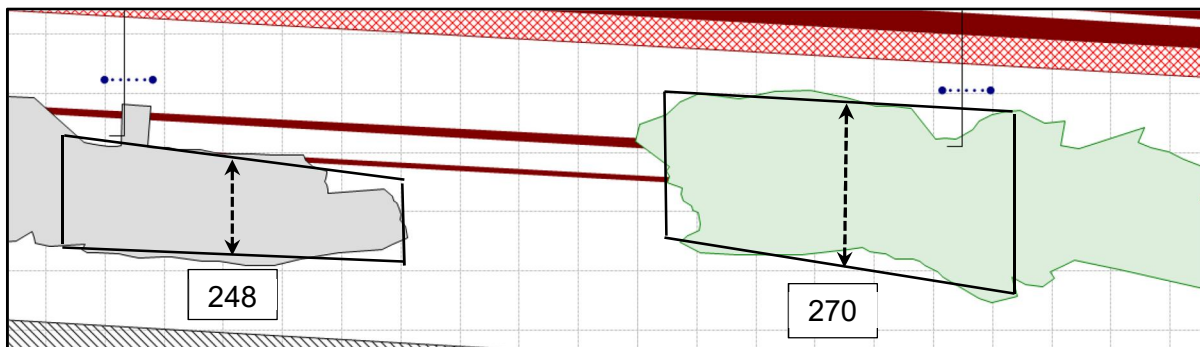


De lokale gemiddelde hoogtes van de cavernes in het domein van de buiten-cirkel (zwarte cirkel) van de centrale clusterpijler staan vermeld in de witte vakjes op de verbindingslijnen (geel, bruin, groen, blauw) tussen de afzonderlijke putten van de cavernes.

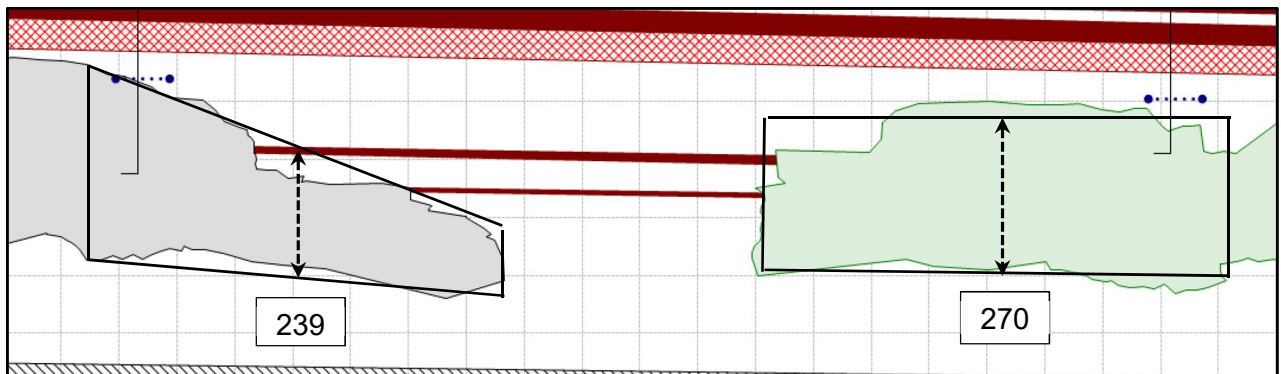
De precieze trajectlengtes en hoogteprofielen, waarover de gemiddelde hoogtes in de witte vakjes zijn berekend, staan aangegeven in de volgende vier dwarsdoorsneden van de cavernes. Om toevalligheden in de hoogtebepaling zo veel mogelijk te vermijden is als uitgangspunt genomen de bepaling te starten op de dwarsdoorsnede 10 m voorbij iedere put op de lijn, gezien vanuit de centrale pijler.



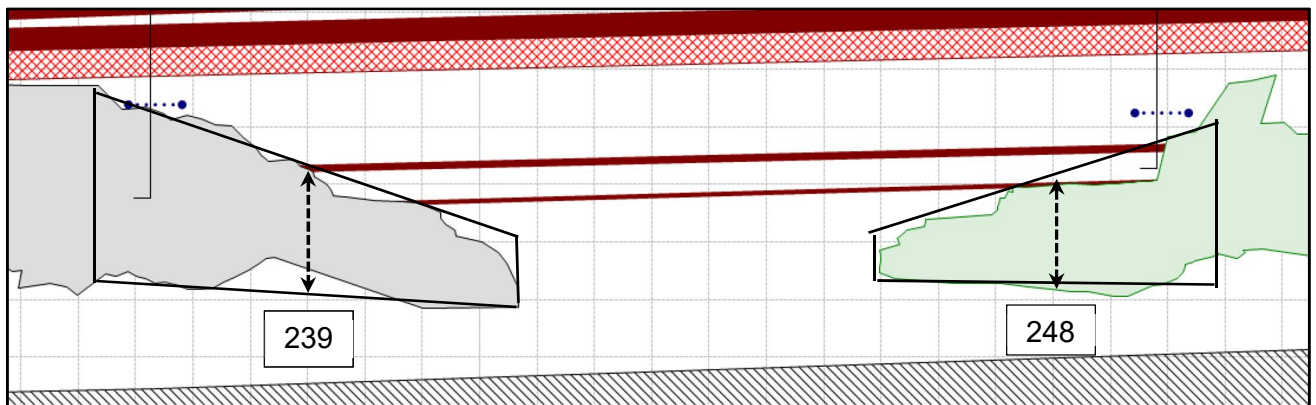
Dwarsdoorsnede (put) 270 ZW-NO. Ieder blokje is 10 bij 10 m. De hoogte van de gestippelde pijl is **27,0** m. De centrale pijler bevindt zich aan de rechterkant van het plaatje.



Doorsnede (putten) 248-270. Pijlhoogte 248 is **17,6** m. Pijlhoogte 270 is **28,2** m.

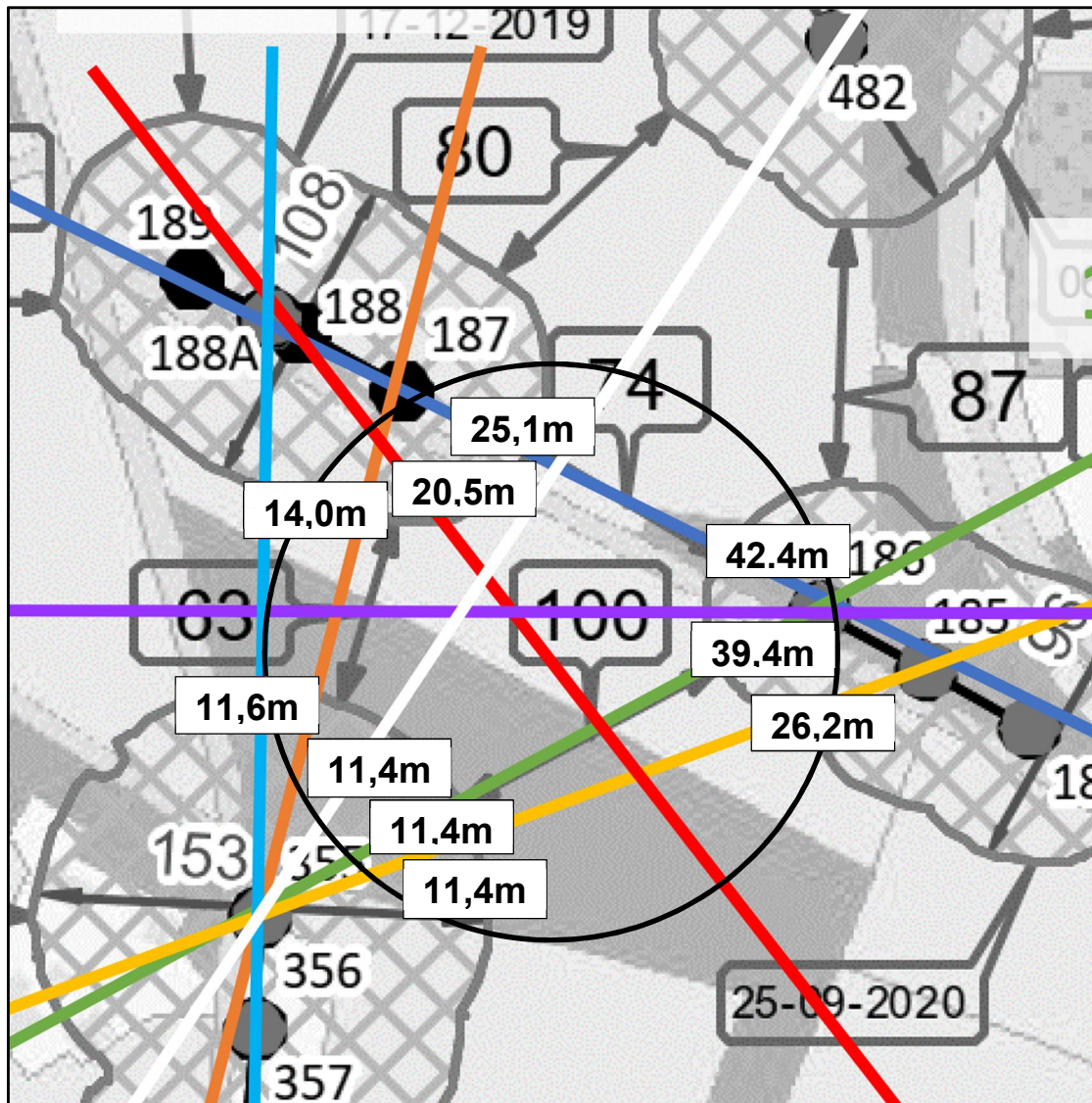


Doorsnede (putten) 239-270. Pijlhoogte 239 is **21,3** m. Pijlhoogte 270 is **25,3** m.



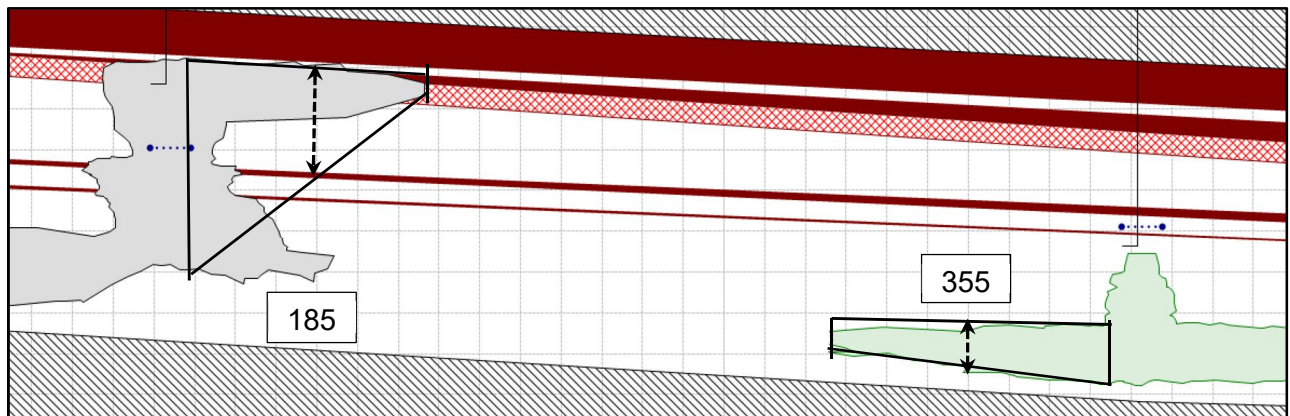
Doorsnede (putten) 239-248. Pijlhoogte 239 is **21,3** m. Pijlhoogte 248 is **18,7** m.

Bijlage 6: Maatwerk cavernehoogten in buiten-cirkel van centrale pijler van cluster M24

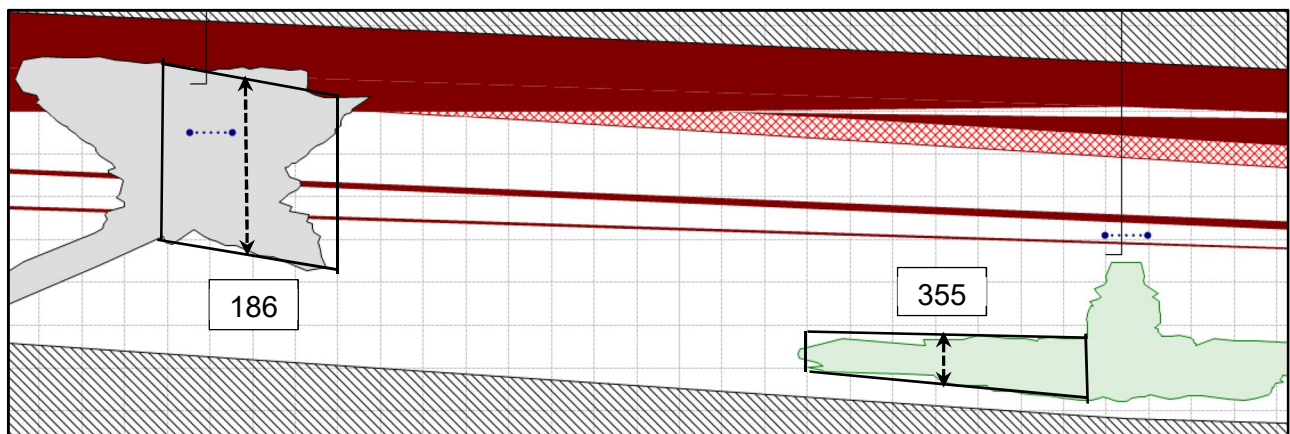


De lokale gemiddelde hoogtes van de cavernes in het domein van de buiten-cirkel (zwarte cirkel) van de centrale clusterpijler staan vermeld in de witte vakjes op de verbindingslijnen (geel, bruin, groen, donkerblauw, lichtblauw) tussen de afzonderlijke putten van de cavernes.

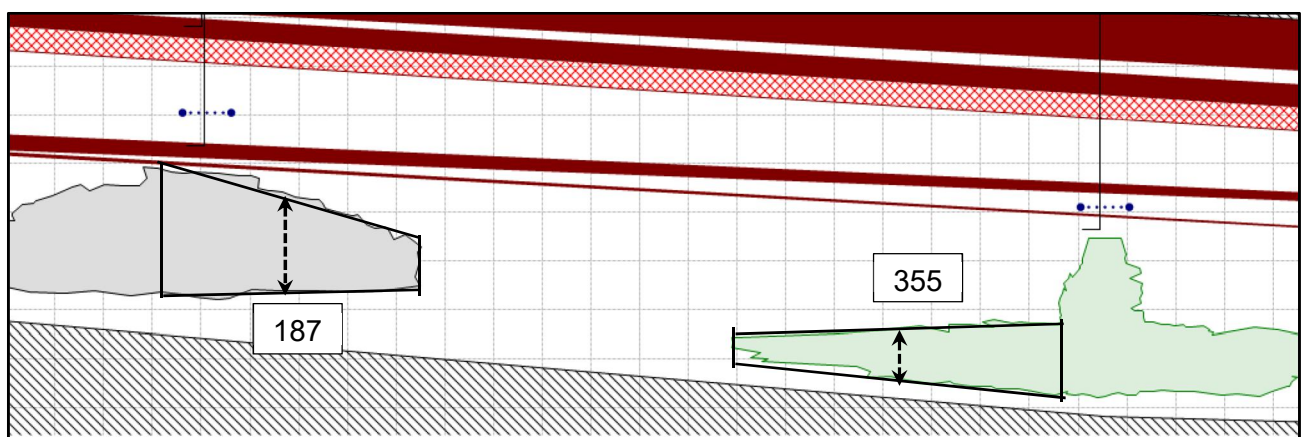
De precieze trajectlengtes en hoogteprofielen, waarover de gemiddelde hoogtes in de witte vakjes zijn berekend, staan aangegeven in de volgende vijf dwarsdoorsneden van de cavernes. Om toevalligheden in de hoogtebepaling zo veel mogelijk te vermijden is als uitgangspunt genomen de bepaling te starten op de dwarsdoorsnede 10 m voorbij iedere put op de lijn, gezien vanuit de centrale pijler.



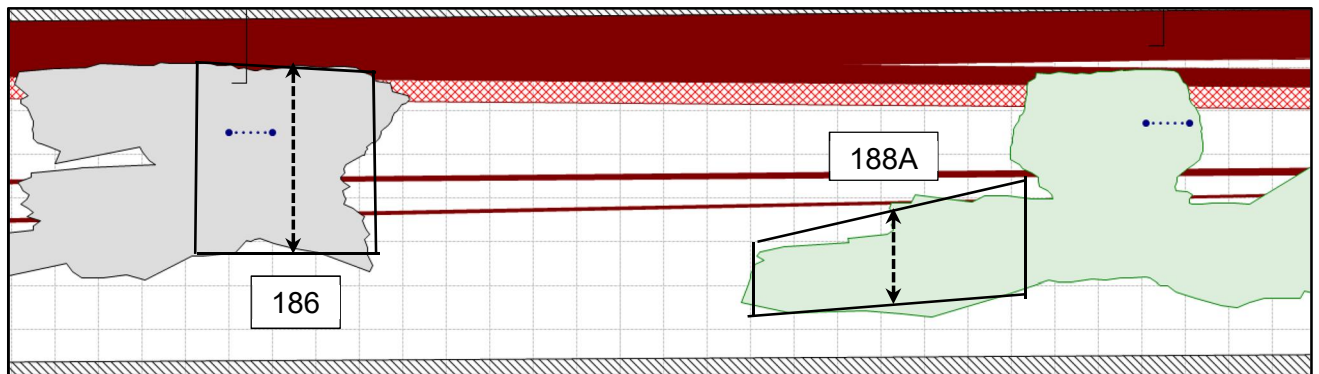
Doorsnede (putten) 185-355. Pijlhoogte 185 is **26,2** m. Pijlhoogte 355 is **11,4** m.



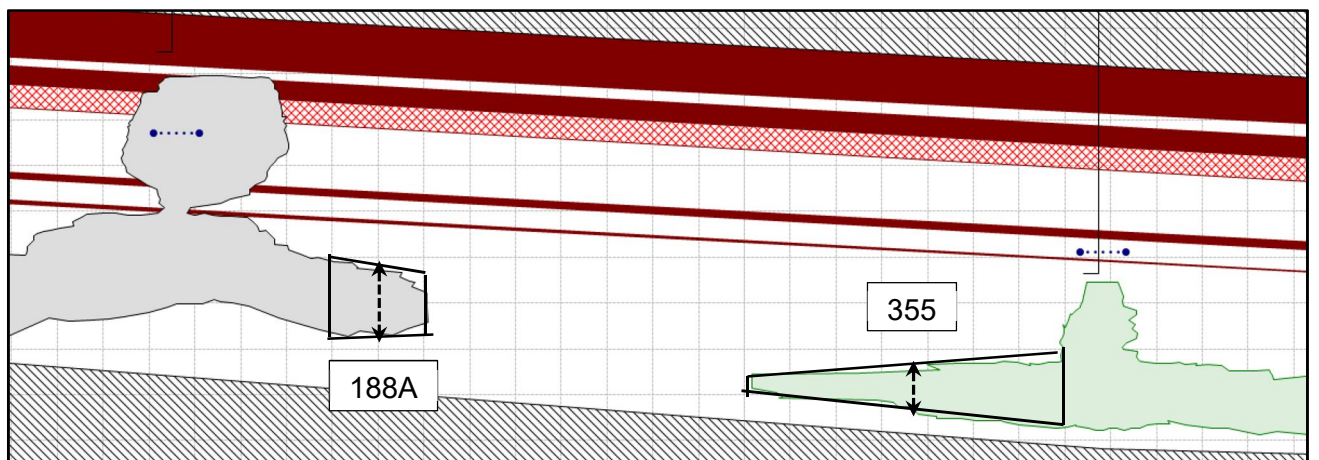
Doorsnede (putten) 186-355. Pijlhoogte 186 is **39,4** m. Pijlhoogte 355 is **11,4** m.



Doorsnede (putten) 187-355. Pijlhoogte 187 is **20,5** m. Pijlhoogte 355 is **11,4** m.

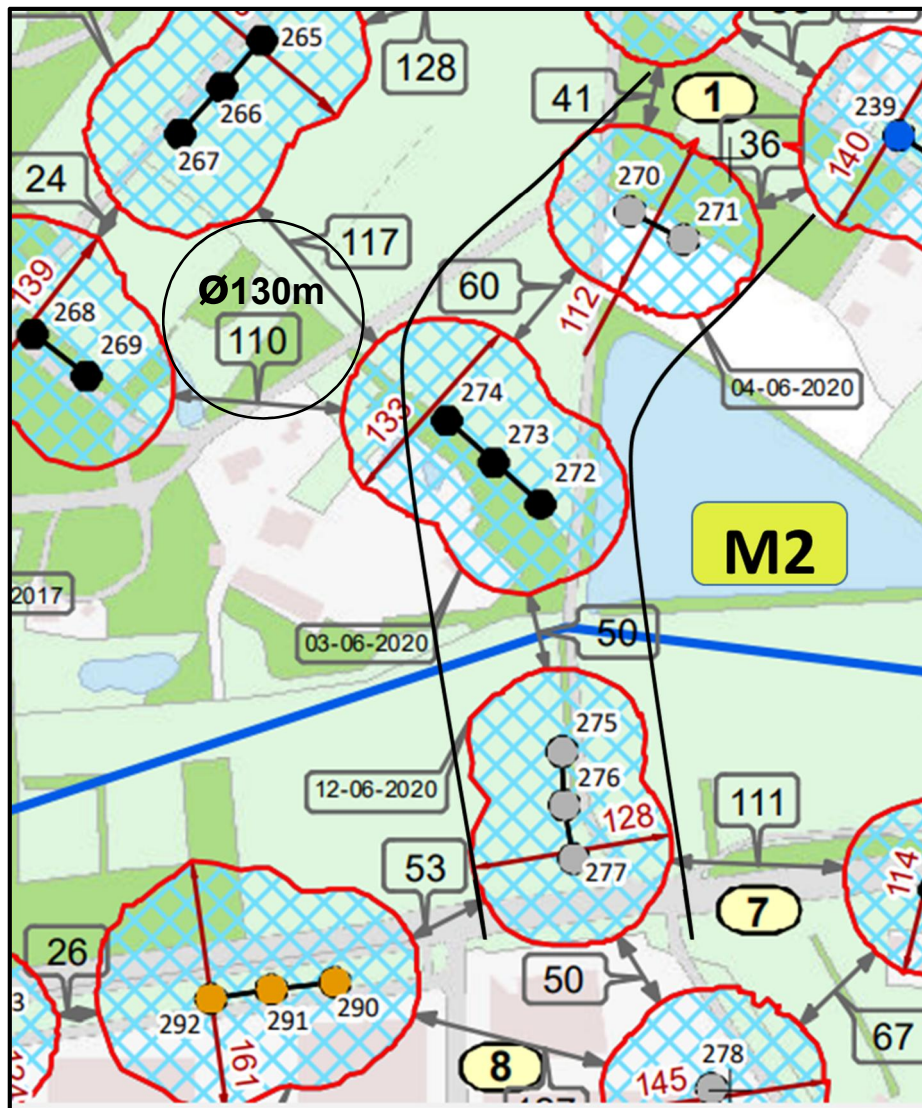


Doorsnede (putten) 186-188A. Pijlhoogte 186 is **42,4** m. Pijlhoogte 188A is **25,1** m.



Doorsnede (putten) 188A-355. Pijlhoogte 188A is **14,0** m. Pijlhoogte 355 is **11,6** m.

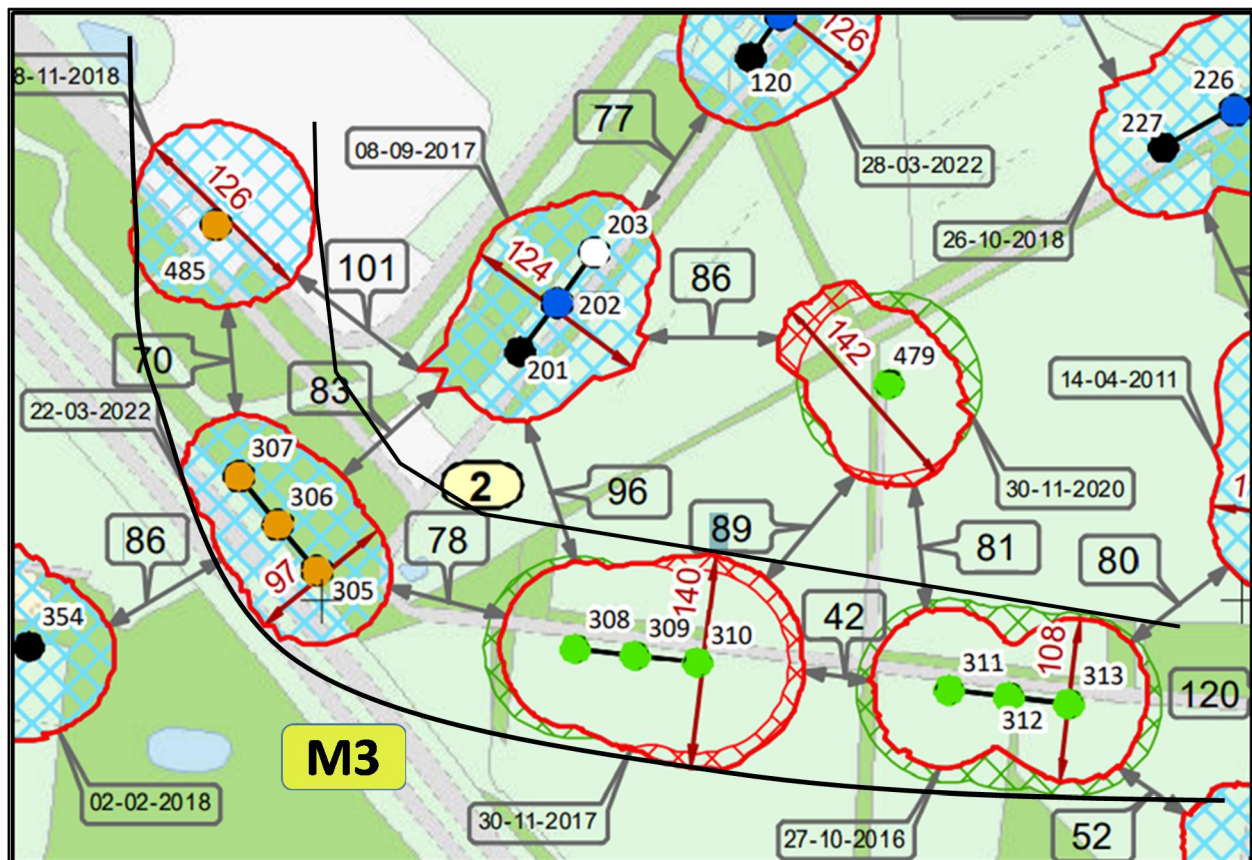
Bijlage 7: Geometrie van de onderzochte cavernerijen



Rij M2: Rij M2 start in cavernecuster 1 ($\eta = 40\%$), wordt geflankeerd door een configuratie van de cavernes 265 en 268, die echter geen cluster vormen met rij M2 vanwege een grote 'binnen-cirkel' van 130 m, en eindigt in de stabiele clusters 7 ($\eta = 14\%$) en 8 ($\eta = 14\%$). De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele flankerende pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m - maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
270	415	25,5	144
272	421	25,5	151
275	444	23,5	128
Rij-gemiddelde	427	24,8	141

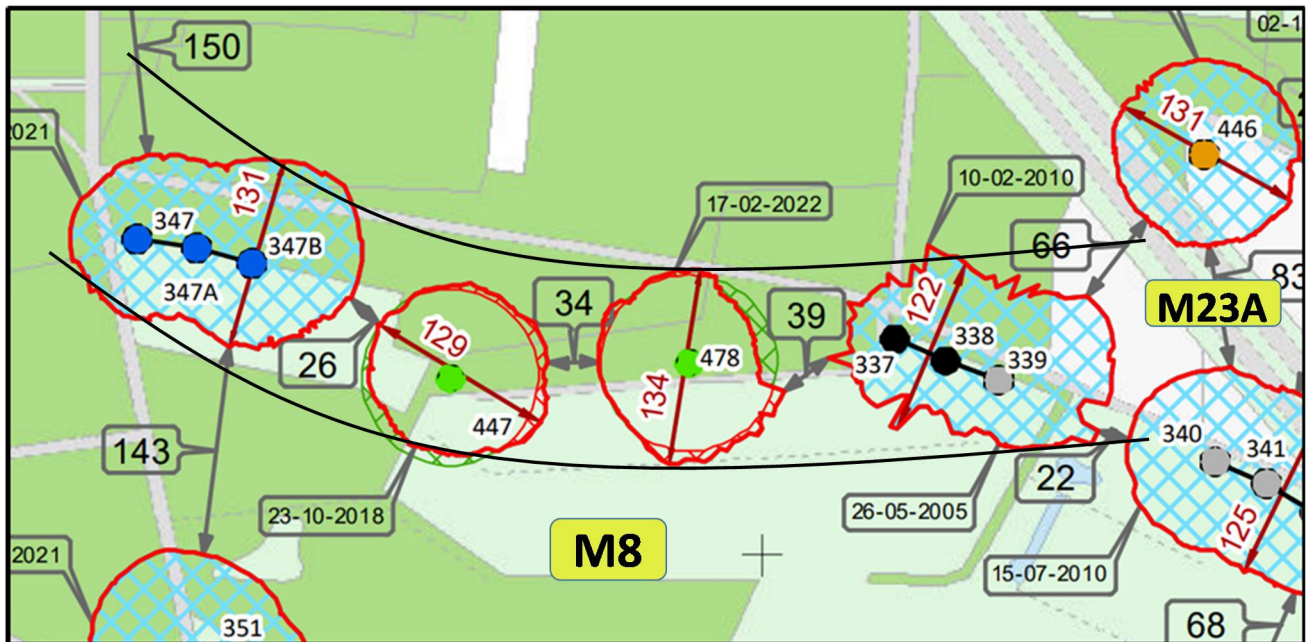
De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 141 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **67,4** m. Vanwege de gemiddelde diepte van 427 m beneden maaiveld is de toetsing met een pijlerbreedte van 67,4 m conservatief. De flankerende pijlers voldoen ruimschoots aan de 30%-stabiliteitsnorm.



Rij M3: Rij M3 wordt geflankeerd door stabiel cavernecluster 2 ($\eta = 16\%$) en een configuratie van de cavernes 201, 305 en 485 (met hoogte 24,5 m), die een met cluster 2 vergelijkbaar cluster vormen met een binnen-cirkel van 126 m. De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m - maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
311	472	27,0	108
308	499	23,7	140
305	507	19,0	97
485	486	24,5	126
Rij-gemiddelde	491	23,6	118

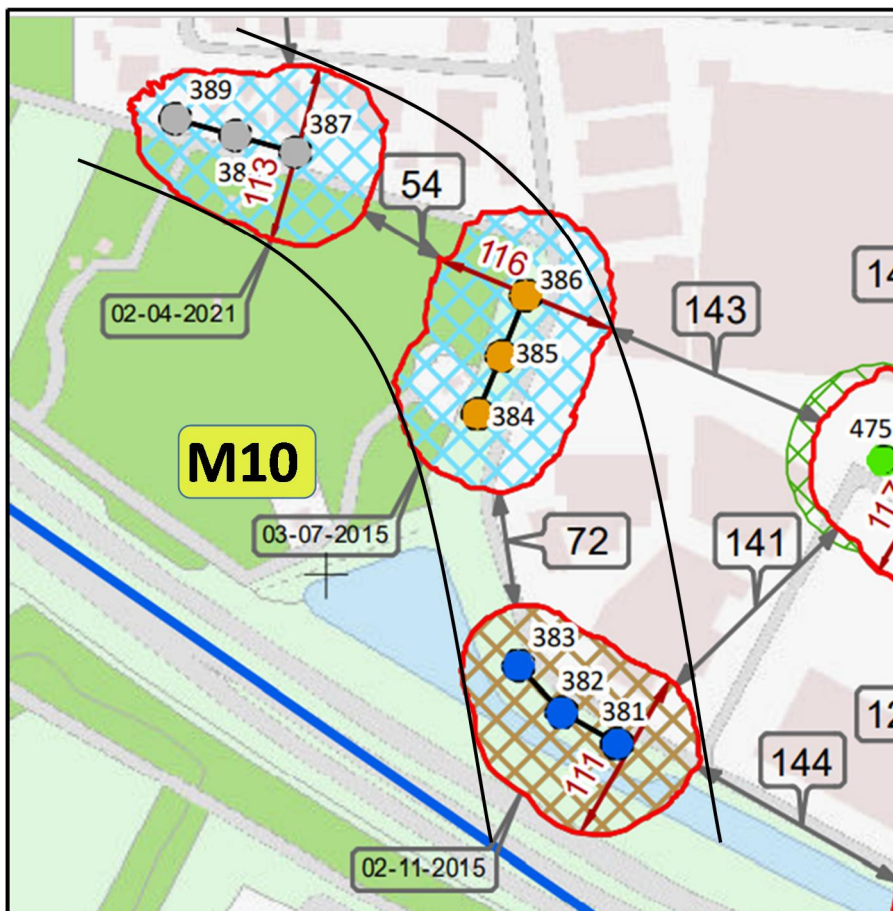
De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 118 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **58,9** m. De gemiddelde diepte van 491 m beneden maaiveld is bijna 10% meer dan de 450 m referentiediepte. De toetsing met een BGR-pijlerbreedte van 58,9 m is daarom niet conservatief. Voor $\eta=25\%$ is de minimum vereiste pijlerbreedte **72,4** m. De flankerende pijlers hebben een breedte van 81 tot 89 m, zodat vrijwel aan de 30%-norm voldaan zal worden.



Rij M8: Rij M8 start in cavernecluster M23A ($\eta = 27\%$). De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m - maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
347	548	29,2	131
447	542	8,5	129
478	533	18,9	134
337	522	14,3	122
Rij-gemiddelde	536	17,7	129

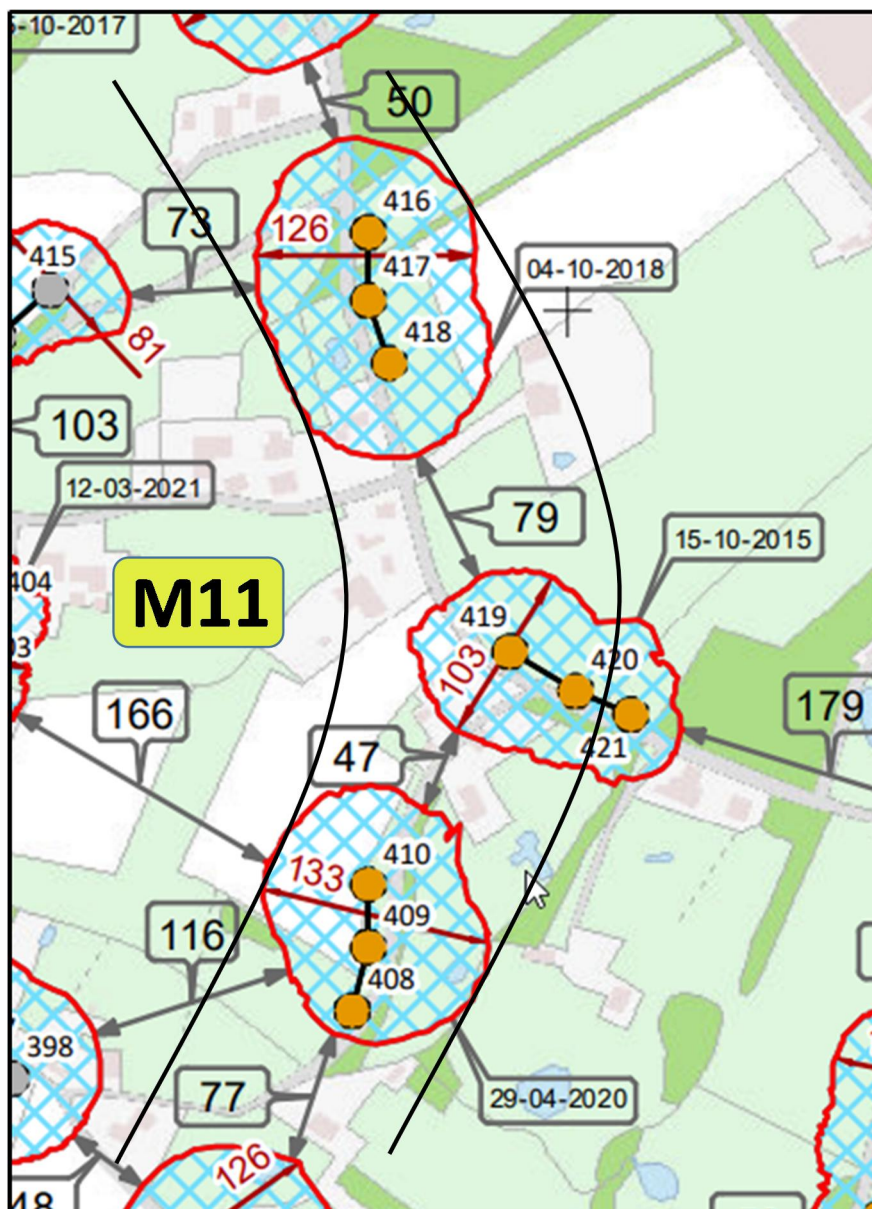
De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 129 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **63,1** m. Vanwege de gemiddelde diepte van 536 m beneden maaiveld (86 m meer dan de referentie) geeft de toetsing met een pijlerbreedte van 63,1 m geen uitsluitel over pijlerstabiliteit. Voor $\eta=25\%$ is de minimum vereiste pijlerbreedte **77,5** m. De flankerende pijler heeft een breedte van meer dan 140 m naar de enige naburige caverne. Een dergelijk overschot kan slechts betekenen dat de 30%-stabiliteitsnorm gehaald zal worden.



Rij M10: De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m - maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
381	469	15,3	142
384	457	22,7	162
387	471	22,3	130
Rij-gemiddelde	466	20,1	145

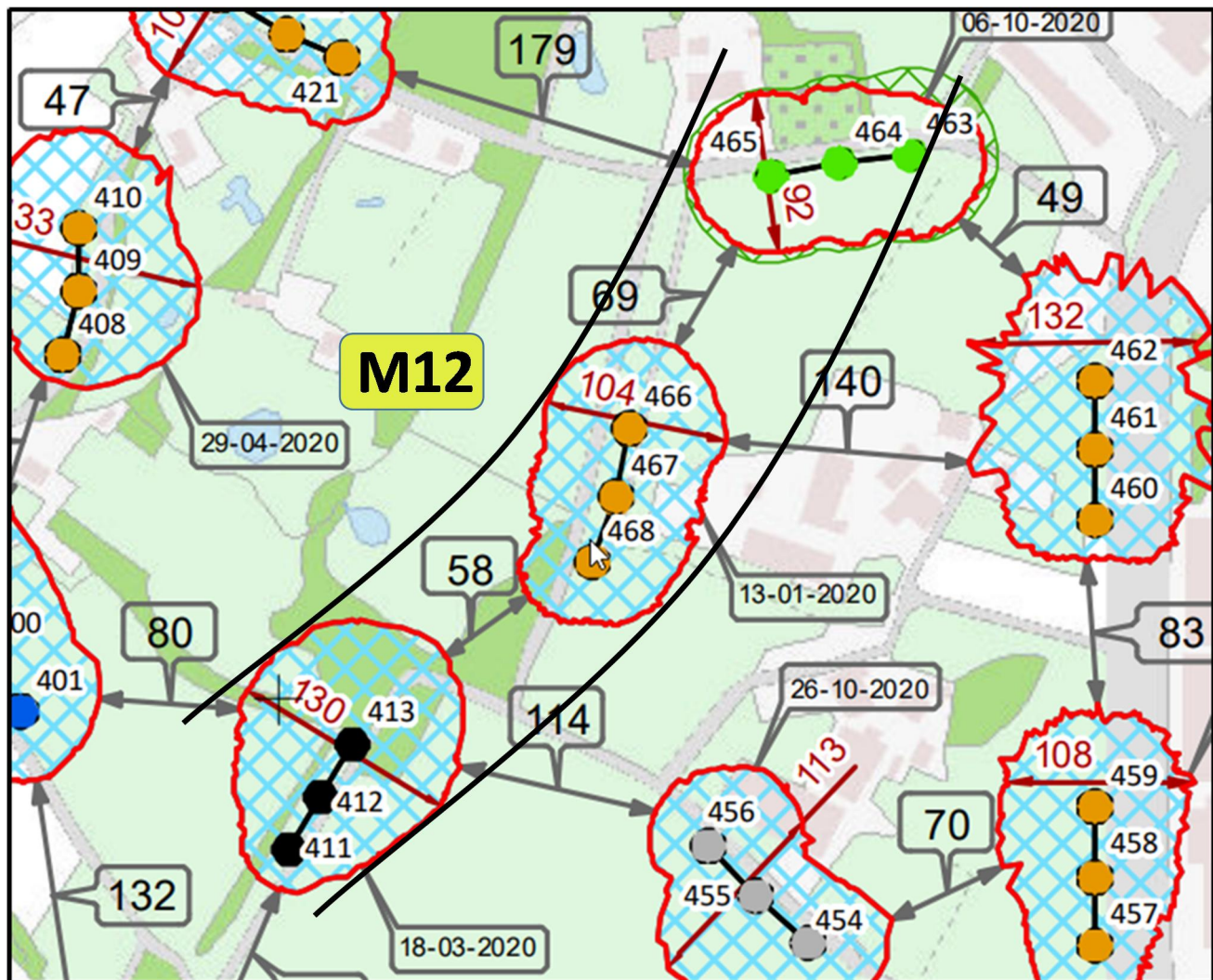
De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 145 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **68,8** m. Vanwege de gemiddelde diepte van 466 m beneden maaiveld is de toetsing met een pijlerbreedte van 68,8 m correct. De flankerende pijlers met een minimumbreedte van 140 m voldoen ruimschoots aan de 30%-norm.



Rij M11: De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m - maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
408	385	13,8	143
419	371	17,8	152
416	360	14,8	135
Rij-gemiddelde	372	15,5	143

De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 143 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **68,1** m. Vanwege de gemiddelde diepte van 372 m beneden maaiveld (78 m ondieper dan de referentie) is de toetsing met een pijlerbreedte van 68,1 m conservatief. De flankerende pijler met een minimale breedte van 73 m voldoet ruimschoots aan de 30%-stabiliteitsnorm.

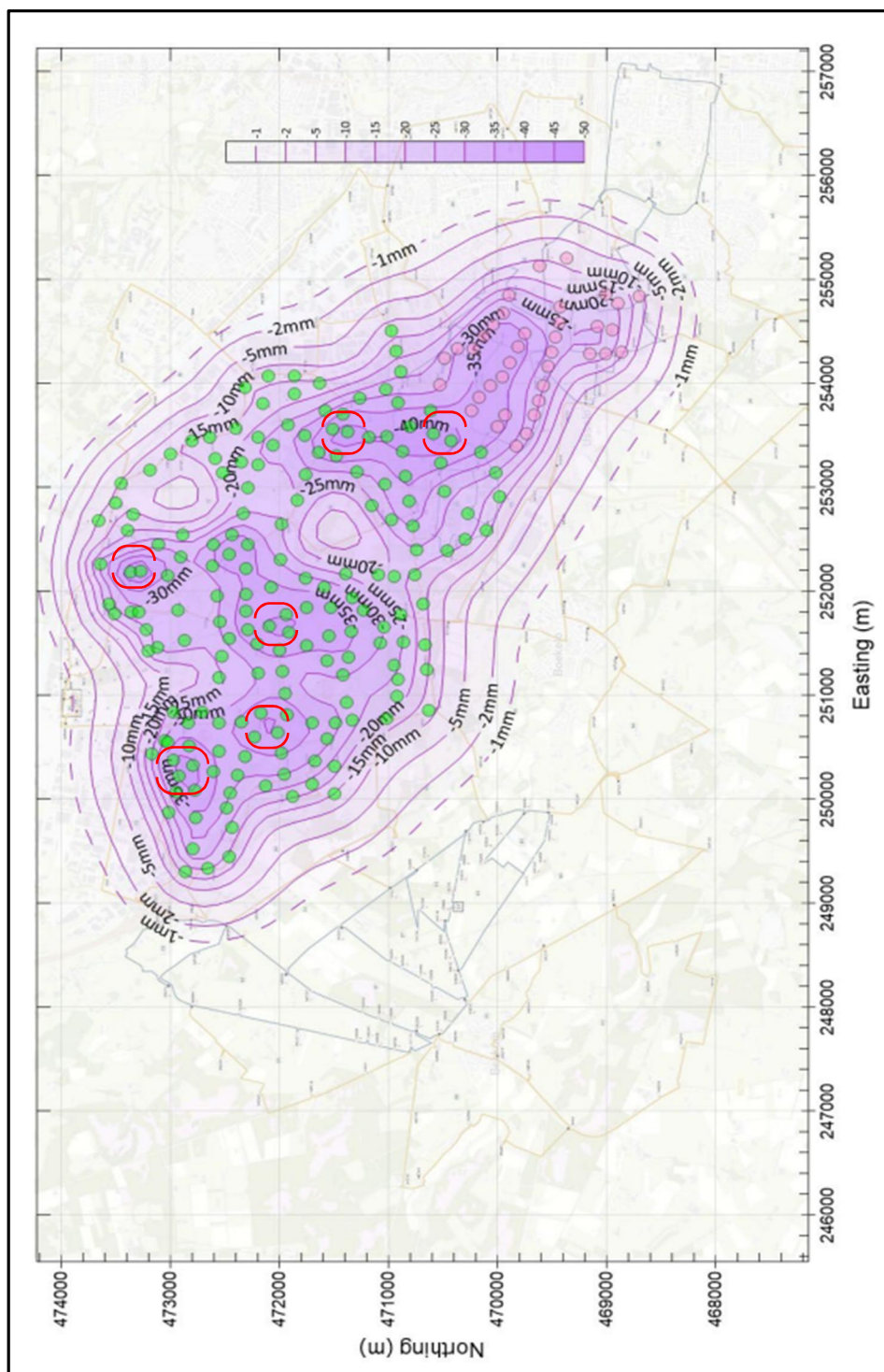


Rij M12: De volgende getallen zijn toegepast ter bepaling van de stabiele pijlerbreedte:

Caverne serie	Gem. diepte (m -maaiveld)	Gem. hoogte (m)	Doorsnede cav. in rij (m)
411	390	18,9	132
466	381	6,4	124
463	370	13,7	144
Rij-gemiddelde	380	13,0	133

De minimum flankerende BGR pijlerbreedte bij een rij-doorsnede van 133 m ($\eta=30\%$, $H=25$ m) bedraagt **64,5** m. Vanwege de gemiddelde diepte van 380 m beneden maaiveld is de toetsing met een pijlerbreedte van 64,5 m conservatief. De flankerende pijler tussen caverne 463 en 460 bedraagt zeer plaatselijk slechts 49 m, waardoor de benuttingsgraad daar meer dan 35% bedraagt. Globaal genomen voldoet de flankerende pijler echter ruimschoots aan de 30%-norm.

Bijlage 8: Bodemdaling in 2100 door caveconvergentie in Twenthe-Rijn fase 2, 3 en 4



Verwachte bodemdaling in het jaar 2100 in het Twente-Rijn gebied, fasen 2, 3 en 4 (ref.12). De cavernes uit fasen 2 en 3 (nrs. 51-485) zijn groen gekleurd, de cavernes uit fase 4 (Usseleres, nrs.486-525) zijn roze gekleurd. De meeste bodemdaling (40-45 mm) treedt op boven vijf caveconvergentiecluster, namelijk de clusters 19 A,B,C op (X,Y) = (250200, 472900); 14 A,B,C op (250800, 472000); 15,16 op (251600, 472000); 1,3,6 op (253500, 471400; en 7,8 op (253500, 470700). Ook op positie (252200, 473300) van de cavernes 72 en 73 bedraagt de daling meer dan 40 mm. De (X,Y)-posities staan op de kaart tussen rode haakjes.