

Samenvatting en integratie onderzoeken kalkslurry 2019-2023 en raakvlakken met migratiestudie 2023-2024

September 2024

Kenmerk: NH20240911

1. Inleiding

Van 2019 tot en met 2023 zijn er verschillende onderzoeken gedaan om het gedrag van kalkslurry als vulstof voor de cavernes beter te kunnen kwantificeren. Dit kwantificeren is nodig om enerzijds beter te kunnen onderbouwen dat het vullen van cavernes een effectieve maatregel is om bodemdaling te beperken. Anderzijds moeten eventuele alternatieve toe te passen stoffen ten minste even effectief zijn als de kalkslurry. Om dit te kunnen vergelijken moeten eigenschappen zoals de sterkte en het vervormingsgedrag bekend zijn.

De onderzoeken hebben deels plaatsgevonden in het laboratorium en deels in het veld. Bij de laboratoriumonderzoeken is slurry, afgetapt uit de slurrytank op de fabriekslocatie, in cilinders geplaatst om te bezinken en consolideren. Vervolgens zijn er monsters genomen om geotechnische labtesten op uit te voeren. Bij de veldtesten is gepoogd een monster te nemen uit de slurryberg in een slurry-gevulde cave. Het bleek in de praktijk niet mogelijk om een monster boven te krijgen. Er is echter uit het gewicht van de buizenstreng en de indringing in het materiaal wel e.e.a. bekend geworden over het gedrag van de kalkslurry.

Daarnaast loopt sinds begin 2023 een studie waarbij het migratiemodel van cavernes verbeterd is op basis van reconstructies van in het verleden gemigreerde cavernes. Een deel van deze cavernes was voorafgaand aan migratie met slurry gevuld en dit heeft het verloop van het migratieproces beïnvloed. Het gedrag van slurry als vulmateriaal is opgenomen in het verbeterde migratiemodel.

In deze samenvatting wordt eerst een overzicht gegeven van de uitgevoerde onderzoeken, onderverdeeld in lab-onderzoeken, testen bij slurry gevulde cavernes en overig onderzoekswerk. Vervolgens worden de bevindingen uit al het onderzoekswerk geïntegreerd. Hieruit volgt een set van geotechnische parameters en een indicatieve 1D zettingsberekening. Op de punten waar er raakvlakken zijn met de migratiestudie zijn deze benoemd.

2. Samenvatting onderzoekswerk

2.1. Overzicht lab-onderzoeken

In deze paragraaf worden de verschillende fasen van proefopstellingen en testen samengevat in Tabel 1 tot en met Tabel 3. Een uitgebreidere omschrijving van de uitgevoerde stappen en waarnemingen staat in bijlage 1.

1. Start maart 2019

Start datum	06-03-2019
Aantal gevulde cilinders	3
Latere aanvulling na eerste bezinking	Nee
Toepassing voorbelasting	Nee
Aantal dagen consolidatie	78
Hoogte kolom vaste stof	Ca. 30 cm
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	3x Handsondering
	1x Oedometertest
	1x volumiek gewicht
	1x watergehalte
Algemene bevindingen	Materiaal simuleert de bovenste 30 cm van een slurryberg en is te weinig cohesief om goede samples uit te halen voor geotechnische testen. Samendrukkingsparameters en volumiek gewicht komen het meest overeen met het gedrag van slappe tot matig consistente klei
Documenten	Labrapport: 17919-0029-001.M01 (memo d.d. 24-10-2019)

Tabel 1: Samenvatting lab-onderzoeken gestart in maart 2019

2. Start juni 2020

Start datum	03-06-2020
Aantal gevulde cilinders	2 voor geotechnische testen, 1 voor praktische testen monsternamen
Latere aanvulling na eerste bezinking	Ja
Toepassing voorbelasting	Ja, 30 kg
Aantal dagen consolidatie	97 voor testen monsternametechnieken, ca 175 voor geotechnische testen.
Hoogte kolom vaste stof	39 en 36 cm
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	2x handsondering
	4x Triaxiaaltest
	4x Oedometertest
	4x volumiek gewicht
	4x watergehalte
	waterdoorlatendheid
Algemene bevindingen	Succesvolle monsternamen mogelijk met behulp van 'core catcher' Sterkte parameters van zeer vast gepakt zand, Vervormingsparameters van slappe tot matige klei.
Documenten	Labrapport: 1719-0029-001-17-R01-v1.0-20210226

Tabel 2: Samenvatting lab-onderzoeken gestart in juni 2020

3. Start januari 2022

Start datum	12-01-2022
Aantal gevulde cilinders	3
Latere aanvulling na eerste bezinking	Ja
Toepassing voorbelasting	Ja, 30 kg
Aantal dagen consolidatie	188 voor eerste testen, ca. 475 voor tweede fase
Hoogte kolom vaste stof	Rond de 20 cm
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	2x Triaxiaaltest single stage
	3x Oedometer test
	2x CRS test
	1x DSS test
Algemene bevindingen	Laag vaste stof gehalte en daarom beperkte hoogte vaste stof om monsters uit te steken. Sterkte parameters van vast gepakt zand, vervormingsparameters van slappe tot matige klei.
Documenten	Labrapport 1 ^e fase: 2421-203935-17-R01.v1.0-20220922 Analyses na 1 ^e fase: 2421-203935.M01 Labrapport 2 ^e fase: 2421-203935-17-R02.v1.0-20230725 Analyses na 2 ^e fase: 2421-203935.M01-versie 3

Tabel 3: Samenvatting lab-onderzoeken gestart in januari 2022

2.2. Overzicht onderzoeken bij slurry-gevulde cavernes

Er zijn in 2020 en 2021 diverse pogingen gedaan om met speciaal gemaakte tools een 'kern' uit een slurryberg in een caveerne te halen. Om verschillende redenen is geen van de pogingen hiertoe geslaagd. Uit de activiteiten en waarnemingen is wel informatie af te leiden uit de indringbaarheid in een slurryberg. De relevante bevindingen worden hieronder per operatie benoemd.

1. Caverne 149 – maart 2020

In maart 2020 is geprobeerd een monster te nemen van slurry uit de slurry-gevulde caveerne 149. Er is tussen 2012 en 2016 slurry in deze caveerne gebracht. De top van de slurryberg bevindt zich ca. 10 m onder de schoen van de casing. Er is een monsterbuis gemaakt, voorzien van een kop met een gekarteld uiteinde. Aan de binnenkant van de buis zit ring als vanger en er zijn gaten bovenin de buis gemaakt zodat pekels boven het monster kan uitstromen in het boorgat. Er zijn twee pogingen gedaan om een monster boven te krijgen. Bij de eerste poging was er wel toenemende weerstand bij het inbouwen tot enkele meters in de kalkberg. Echter is de buis leeg en nagenoeg schoon boven gekomen. Bij de tweede poging is geprobeerd dieper te komen. Dat is, na enig draaien ook gelukt, met bijna een volledige buislengte in de berg. De buis is echter opnieuw schoon boven gekomen. Met het gebruikte equipment was het maar zeer beperkt mogelijk om het strenggewicht en de indringing te monitoren. Vanwege de relatief grote afstand tussen de casingschoen en de kalkberg is het ook mogelijk dat de monsterbuis langs de slurryberg heeft bewogen. Daarom worden aan deze poging geen conclusies ontleend.

Er is besloten om te werken aan een kop met een beter vangmechanisme en te kijken naar een caveerne waar de afstand tussen het einde van de casing/boorgat en de bovenkant van de kalkberg kleiner is, zodat er meer zijdelingse steun op de buizenstreng is.

2. Caverne 165 (put TWR-165A) – januari 2021

In januari 2021 is geprobeerd een monster te nemen van slurry uit caveerne 165 via put 165A. Er is slurry in deze caveerne gegaan vanaf de zomer van 2008 tot begin 2012. De slurry heeft dus 9 jaar kunnen consolideren in de caveerne. De top van de kalkberg bevindt zich ongeveer 6 m onder het dak van de caveerne. Het diepste deel van put 165A is een open hole traject dat gediend heeft voor pekelaafvoer tijdens de slurryvulling. Het kan zijn dat dit traject is uitgesleten. De diameter van dit open hole gedeelte is daarom onbekend. Onderaan de 4½" buizenstreng is een speciaal gefabriceerde 'kernbit' gemonteerd. Deze heeft tandjes aan de onderkant en aan de binnenkant een klep die open gaat wanneer de bit in vast materiaal geduwd wordt. Bij het optrekken van de buizenstreng moet de klep sluiten door middel van een veer.

Bij de eerste poging zakte de streng ca. 2 meter in de kalkberg zonder weerstand (2 ton Weight on Bit, WOB). Door de WOB te verhogen naar 5 ton, is het geheel nog ongeveer 0,5 m gezakt. Bij het uithalen bleek de kunststof klep afgebroken te zijn. Er is besloten een metalen klep te laten maken en het nogmaals te proberen.

Bij de tweede poging kwam de kernbit zonder weerstand tot dezelfde diepte als de vorige dag (ca. 2,5 m in de kalkberg). Daarna door handmatig te draaien nog enkele centimeters verder gekomen. Met het maximale gewicht op de bit (6 ton) niet dieper gekomen. Bij het uitbouwen zat de onderste buis vol vloeistof, de klep is dus dichtgegaan. Maar er zat alleen sterk verstoorde slurry in suspensie in. Er zijn stukken van de kunststof klep mee naar boven gekomen.

Er is geconcludeerd dat het materiaal in de kalkberg op enkele meters onder de bovenkant sterk genoeg is om het gewicht van een buizenstreng van 6 ton te kunnen dragen.

3. Caverne 55 (via put TWR-055B) – juni 2021

In juni 2021 is geprobeerd een monster te nemen van slurry uit caverne 55 via put 55B. Er is slurry in deze caverne gegaan vanaf het voorjaar van 2018 tot het najaar van 2020. De slurry heeft dus maar kort kunnen consolideren in de caverne. De top van de kalkberg bevindt zich ongeveer 5 m onder het dak van de caverne. Omdat put 55B een 9 5/8" gecementeerde casing heeft, is het mogelijk om de 4½" in te bouwen binnen een 7" buis die 1 meter boven de top van de kalkberg is gehangen om zijdelingse steun te geven aan de 4½" buizenstreng met de kernbit.

Bij de eerste poging zakte de streng ongeveer 1 m in de kalkberg waarbij de WOB toenam van 0 naar 0,8 ton. Vervolgens is het gewicht in stappen van 0,5t verhoogd tot 5 ton. Hierbij was de uiteindelijk bereikte indringing 1,24 meter. Na een half uur wachten was de streng nog 2 cm gezakt tot 1,26 meter. Hoewel de klep gesloten was, zat er geen slurry in of aan de buis of kernbit.

Bij de volgende poging zakte de streng in eerste instantie niet weg tot dezelfde diepte als bij de eerste poging (ondanks hoger WOB). Vermoedelijk is de kernbit gestuit op een steen (anhydriet) die in het gat van de eerste poging is geschoven. Pas bij 3,5 ton WOB zakte de streng in een keer naar dezelfde diepte als die bij de eerste poging bereikt werd. Nu is er handmatig gedraaid om dieper te komen. Met moeite is de bit 35 cm dieper gekomen tot een diepte van 1,62 m in de kalkberg. Met 5 ton WOB zakte de streng niet verder gedurende een half uur. Na het uitbouwen is de eerder genoemde steen aangetroffen. Deze zat vast tussen de klep. De klep was daardoor niet volledig gesloten en er stroomde heldere pekkel uit. Aan de tanden van de kernbit zaten stukken verkitten slurry en stukken grijs gesteente (vermoedelijk de anhydriet van de steen die in de weg zat).

Als laatst is een gewichtstest gedaan met zwaarstangen. Hiermee kon een totaal gewicht van 10 ton op het uitende van de streng gezet worden. Er is een diepte van 1,35 m in de kalkberg bereikt. Dit is iets dieper dan de streng met de kernbit zonder draaien. Het kapje onderaan de streng van de gewichtstest was duidelijk ingedeukt, wat aangeeft dat het op een hard oppervlak heeft gestaan. Het smalle gedeelte van het kapje toonde duidelijke krassen in de verf van de wrijving in de kalkberg.

Geconcludeerd is dat er bij caverne 55 vrij eenvoudig ca. 1,2 m in de kalkberg ingedrongen kan worden met het gewicht van de buizenstreng. Om vervolgens dieper te komen, moet een zeer hoge wrijving overwonnen worden. Dit kan (beperkt) door te draaien.

2.3. Overige onderzoeken/analyses

Fugro heeft in 2021, na het onderzoek bij caverne 55B geprobeerd de resultaten van lab- en veldtesten met elkaar te integreren. Het indringen van een buizenstreng in kalkberg vormt een analogie met een paalfundering waarbij de indringing van een paal in de grond afhankelijk is van de weerstand die de paalpunt ondervindt en de wrijving langs de wand. Dit hangt samen met de eigenschappen van de grond. Uit deze analyse bleek dat de observaties in de veldtesten benaderd kunnen worden met de zogenaamde β -methode voor lange termijn weerstand op basis van gedraineerde grondparameters. Uit de vergelijking komt een materiaal met een zeer hoge wrijvingshoek van ca. 50°. Dit komt redelijk overeen met de hoge wrijvingshoeken die in de individuele triaxiaalproeven gevonden zijn.

Daarnaast heeft Fugro verkend wat de mogelijkheden zijn om het gedrag van slurry in een caverne te modelleren met de Material Point Method (MPM). Met een dergelijk model kunnen situaties waarin er 2 verschillende fasen zijn, zoals bij grondkorrels en water, gemodelleerd worden. Het modelleren van een twee-fasen systeem is echter nog in de academische fase en alleen gevalideerd met eenvoudige constitutieve modellen. Er zijn nog geen complexe constitutieve modellen in MPM software geïmplementeerd. In dit stadium is het dus nog niet mogelijk om processen met slurry in een caverne te modelleren met de Material Point Method.

In het rapport 'Slurryvulling cavernes – geotechnische analyse en literatuurstudie' (kenmerk 1719-0029-002. R01, v1.0 d.d. 30 maart 2022) is gerapporteerd over zowel de vergelijking tussen de veldtesten en de paalfundering als de Material Point Method.

In 2023 heeft Fugro de uitgevoerde labtesten geanalyseerd en deels gesimuleerd met behulp van de meer geavanceerde grondmodellen in de software Plaxis. Dit is gedaan om te kijken of het gedrag van de kalkslurry goed te modelleren is met een van de meer geavanceerde maar wel breed toegepaste modellen in Plaxis (Soft Soil Creep, Hardening Soil small strain en Modified Cam-Clay). Het gedrag van kalkslurry bleek echter niet goed te simuleren met deze modellen.

Wel is er een verdere uitwerking gedaan van de triaxiaalproeven om zo uit de individuele labtesten combinaties van cohesie en wrijvingshoek te verkrijgen bij verschillende rekpercentages.

- Bij 2% rek: effectieve cohesie $c' = 5$ kPa en wrijvingshoek $\phi' = 36,3^\circ$, gebaseerd op 10 testresultaten
- Bij 5% rek: effectieve cohesie $c' = 10$ kPa en wrijvingshoek $\phi' = 37,0^\circ$, gebaseerd op 6 testresultaten

Uit de samendrukkingsproeven is geconcludeerd dat er veel vervorming optreedt in vergelijking met reguliere Nederlandse kleien. Uit proeven waar een ontlasttrap in zat is afgeleid dat het materiaal zeer stijf reageert (dus weinig vervormt) bij een herbelasting ten opzichte van de hoeveelheid vervorming bij maagdelijk belasten.

De analyses zijn gerapporteerd in 'Simulaties laboratoriumproeven Nobian' (kenmerk 2421-203935.M01 – versie 3, d.d. 6 oktober 2023)

3. Integratie resultaten

3.1. Algemene bevindingen gedrag slurry

Het is niet mogelijk gebleken om het 'grondmechanische' gedrag van de slurry in een caveerne te classificeren als vergelijkbaar met één bepaalde grondsoort zoals klei of zand. Dit is ook terug te zien in de labresultaten. In sterktesten (triaxiaalproeven) wordt een grote hoek van interne wrijving (ϕ) gevonden in combinatie met een lage cohesie (c). Dit is typisch voor een zandlaag. Uit de samendrukkingsproeven volgen waarden die passen bij slappe tot matig geconsolideerde kleilagen. Wanneer nagebootst wordt dat de slurry belast wordt met een puinkolom is er een relatief hoge mate van deformatie te verwachten.

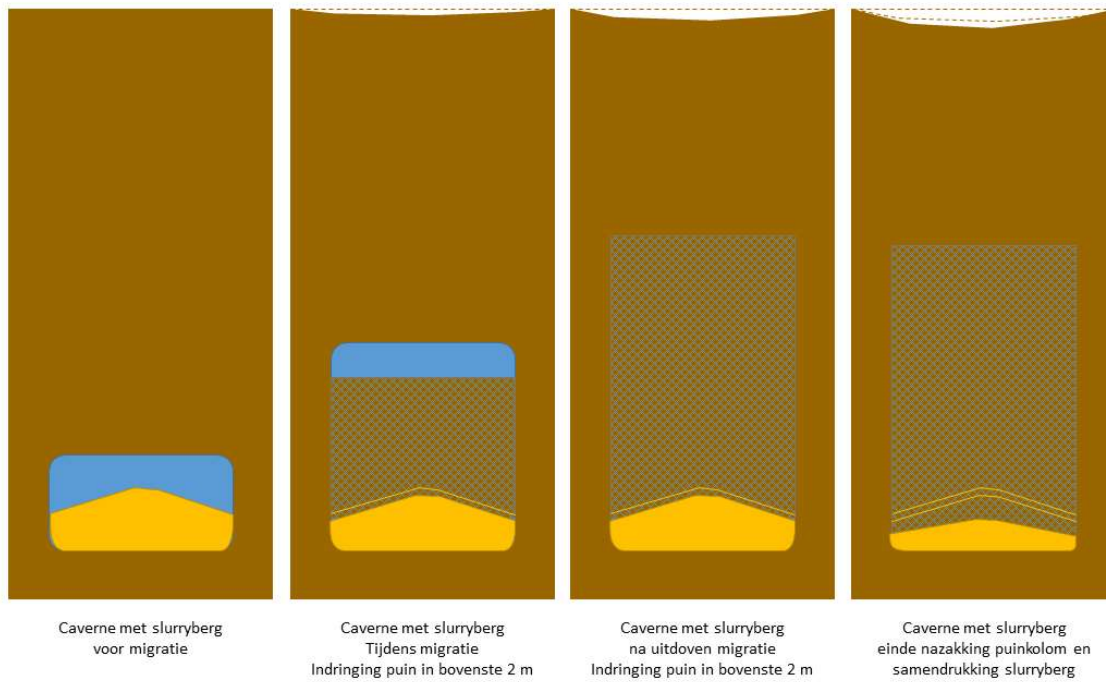
Uit de veldtesten blijkt dat indringing in de bovenste 1 à 2 meter slurry relatief eenvoudig is, maar dat het daarna veel moeite kost om dieper te komen. Dit sluit aan bij de hoge wrijvingshoek die gevonden wordt in de labtesten van voorbelaste slurry. Wat betreft de eenvoudige indringing in de bovenste meters moet nog wel opgemerkt worden dat er getest is met een verticale puntbelasting, de eenvoudigste manier om in een vaste stof in te dringen. Indringing van plaatvormige stukken gesteente die uit het dak vallen, zal waarschijnlijk moeizamer gaan.

Om het gedrag van slurry in een caveerne te kunnen kwantificeren en dit mee te nemen in de modellering van het proces van cavernemigratie, wordt voorgesteld om twee zaken mee te nemen in de berekeningen:

1. De bovenste laag slurry is slecht geconsolideerd en biedt weinig weerstand tegen indringing van vallend gesteente. Daarom wordt voorgesteld om de bovenste 2 m van een slurryberg te bestempelen als 'niet effectief'. Dat betekent dat deze laag niet wordt meegeteld in de dikte van de slurryberg en wel wordt beschouwd als caverneruimte waar gebroken gesteente uit het cavernedak terecht kan komen.
2. Per gevulde caveerne kan met een simpele 1D berekening een inschatting worden gemaakt van hoeveel de slurryberg wordt samengedrukt als gevolg van de belasting door de puinkolom die ontstaat bij volledige migratie. Deze samendrukking, plus de inklinking van de puinkolom zelf zijn verantwoordelijk voor de nazakking na het uitdoven van migratie.

Figuur 1 illustreert de aspecten van een niet-effectieve toplaag van de slurry en de samendrukking en nazakking. De samendrukkingsparameters die nodig zijn voor de inschatting van de samendrukking van de

slurryberg zijn te bepalen uit de uitgevoerde proeven. In de volgende paragraaf wordt de parameterset gegeven.



Figuur 1: Gedrag slurryberg tijdens en na migratie - Let op: afbeelding niet op schaal!

3.2. Parameterset

Door de resultaten van alle labonderzoeken samen te voegen komen we tot de volgende set van gemiddelde geotechnische parameters.

Eigenschap	Symbool	Waarde	Eenheid	Aantal testen	Past bij grondsoort	Bron
Volumiek gewicht	γ	15,6	kN/m ³	14	Klei slap-matig	Eurocode Geotechniek
Volumiek gewicht droge stof	γ_{dr}	7,7	kN/m ³	14	-	-
Poriëngehalte	n	70,2	%	4	-	-
Effectieve cohesie	c'	5	kPa	6	Zandige klei	Eurocode Geotechniek
Effectieve hoek van inwendige wrijving	ϕ'	36,3	°	6	> zand met vaste pakking	Eurocode Geotechniek
Compression ratio (NEN-Bjerrum)	CR	0,21	-	8	Klei slap tot matig	Eurocode Geotechniek
Recompression ratio (NEN-Bjerrum)	RR	0,0029	-	4	Zand met losse tot matige pakking	Eurocode Geotechniek
Kruipparameter (NEN-Bjerrum)	C_{α}	0,038	-	8	-	-
Primaire samendrukkingscoëfficiënt onder de grensspanning (Koppejan)	c_p	33,0*	-	7	-	-
Secundaire samendrukkingscoëfficiënt onder de grensspanning (Koppejan)	c_s	83,5*	-	7	-	-
Primaire samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning (Koppejan)	c'_p	13,5	-	7	Klei slap tot matig	Eurocode Geotechniek
Secundaire samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning (Koppejan)	c'_s	33,5	-	7	Organische klei en veen	Eurocode Geotechniek
Consolidatiecoëfficiënt (op basis van simulaties bij de hoogste belasting)	c_v	$1,0 \cdot 10^{-6}$	m ² /s	5	klei	-

Tabel 4: Geotechnische parameters van slurry op basis van de laboratoriumproeven

*) De samendrukkingscoëfficiënten onder de grensspanning hebben een zeer grote spreiding

3.3. Indicatieve zettingsberekening slurry belast met puinkolom

Met de NEN-Bjerrum parameterset (RR, CR en Ca) is een aantal simpele 1D zettingsberekeningen uitgevoerd. Hierin is de situatie berekend waarin een slurrykolom van een bepaalde hoogte wordt belast met de puinkolom die is ontstaan uit de migratie van de caverne met een bepaalde resterende hoogte op het moment dat migratie begint.

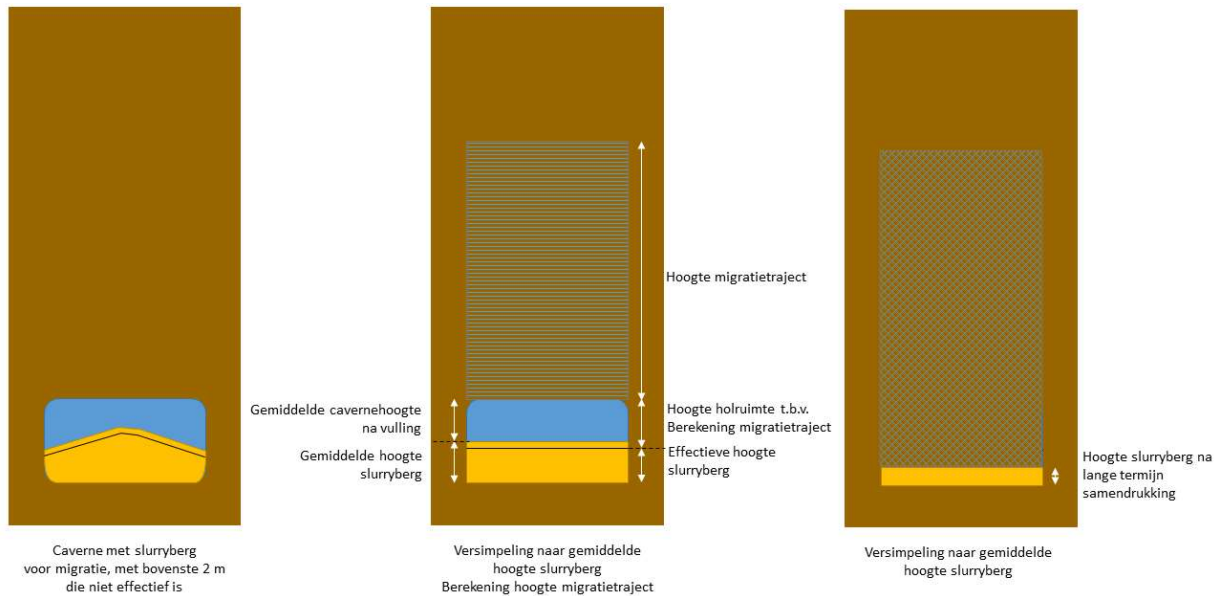
Aan de hand van een aantal praktijkvoorbeelden (de cavernes 55, 149 en 165) blijkt dat de dikte van de kalkslurry op de lange termijn met ca. 44% afneemt. De initiële porositeit van de slurry is ca. 70%, zie Tabel 4. Dit betekent dat een kubieke meter slurry in de slurryberg uit 0,3 m³ korrels bestaat. Wanneer deze korrels door de samendrukking in 0,56 m³ geperst worden blijft er 0,26 m³ porieruimte over, resulterend in een porositeit van ca. 46%.

De hoogte van de migratiekolom is berekend met de bulking factor 1,2 die blijkt uit de verbeterde reconstructie van cavernemigratie. Aan de hand van de bulking factor wordt de grootte van de bovenbelasting die op de slurrykolom wordt toegepast berekend. De berekeningen van de drie genoemde cavernes zijn weergegeven in onderstaande tabel. De verschillende hoogtes die gebruikt worden zijn toegelicht in Figuur 2.

Parameter [eenheid]	Caverne 55	Caverne 149	Caverne 165
Volumiek gewicht pekkel [kN/m ³]	12	12	12
Volumiek gewicht slurry [kN/m ³]	15,6	15,6	15,6
Grensspanning [kPa]	36	14,4	27
RR	0,0029	0,0029	0,0029
CR	0,21	0,21	0,21
Ca	0,038	0,038	0,038
Volumiek gewicht overburden [kN/m ³]	20	20	20
Gemiddelde hoogte caverne na opvullen [m]	15	15	8
Dikte niet-effectieve toplaag [m]	2	2	2
Hoogte caverne t.b.v. berekening migratietraject [m]	17	17	10
Bulking factor	1,2	1,2	1,2
Hoogte migratietraject [m]*	85	85	91
Bovenbelasting puinkolom [kPa]	680	680	727
Effectieve spanning in middelpunt slurryberg [kPa]	32,4	10,8	32,4
Rek	0,42	0,51	0,43
Gemiddelde hoogte slurryberg [m]	20	8	20
Effectieve hoogte slurryberg [m]	18	6	18
Hoogte slurryberg na langere termijn samendrukking [m]	10,4	2,97	10,26
Afname hoogte slurryberg [%]	42,4 (1- (10,36/18))	50,5	37,9

Tabel 5: Indicatieve (1D) zettingsberekeningen bij de cavernes 55, 149 en 165

* Hierbij blijft de slurryvulling intact en de toplaag van 2 m wordt niet meegerekend



Figuur 2: Vereenvoudiging cavernegeometrie en hoogtes in zettingsberekening

Tijdsaspect in berekening

Zowel in het migratieproces als in het samendrukkingsproces speelt de factor tijd een rol. Uit de 1D zettingsberekening komt een getal als eindzetting en er wordt niet nader geduid hoe de zetting zich in de tijd ontwikkelt. In de berekende zetting zit een deel primaire samendrukking en een deel kruip waarbij een periode van 10.000 dagen is aangehouden. Dit komt overeen met ca. 30 jaar en is gebruikelijk bij geotechnische zettingsberekeningen. Het migratieproces vordert met ca. 10 m per jaar. De belasting op de slurryberg neemt in de loop van de jaren toe door het steeds hoger worden van de puinkolom. Wanneer dit tijdsaspect meegenomen zou worden, dan zou met elke toename van de belasting op de slurryberg het deel primaire samendrukking instantaan toenemen. In werkelijkheid verloopt de samendrukking geleidelijk. Ook het migratieproces (en daarmee het verhogen van de bovenbelasting) verloopt meer geleidelijk dan eens per jaar een migratie van 10 meter. Uit de 1D zettingsberekeningen volgt dat de hoogte van de slurryberg op de lange termijn met ongeveer de helft gereduceerd wordt door de samendrukking. Van een slurryberg met een effectieve hoogte van 10 m zou dan 5 m hoogte overblijven. Dit wil niet zeggen dat er na volledige migratie opnieuw een holruimte van 5 m hoogte overblijft waar opnieuw migratie kan plaatsvinden, omdat dit proces dan (theoretisch) nooit zou eindigen. De berekeningen zijn bedoeld om een indicatie te geven van hoeveel samendrukking er plaats kan vinden onder de belasting van een puinkolom. Dit kan nu berekend worden omdat de samendrukkingsparameters afgeleid zijn uit samendrukkingsproeven waarbij de bovenbelasting gelijkwaardig is aan de belasting door een puinkolom.

4. Raakvlak met migratiestudie 2023-2024

In de migratiestudie is in de reconstructie van het migratieproces van reeds gemigreerde cavernes uitgebreid onderzocht hoe de slurryberg, die in een aantal cavernes aanwezig was toen de migratie plaatsvond, het migratieproces heeft beïnvloed. Aan de hand van productiegegevens, simulaties en sonarmetingen is afgeleid dat:

1. Er tijdens en na het vullen 15% consolidatie onder het eigen gewicht van de slurryberg plaatsvindt. Dit vindt dus plaats tijdens en relatief kort na de slurryvulling en voorafgaand aan de belasting op de slurryberg van een puinkolom.
2. De toplaag van de bovenste 2 m geen weerstand biedt tegen het indringen van vallend puin. Dit is een conservatieve aanname op basis van de testen op slurrygevulde cavernes waarbij met een puntbelasting is gewerkt.
3. De samendrukking onder het gewicht van de puinkolom ca. 30% bedraagt, wanneer de hoogte van de puinkolom is berekend met een bulking factor van 1,2. Deze samendrukking vindt plaats waar de puinkolom op de slurry rust. Dit kan dus ook op een deel van de slurryberg zijn, wanneer slechts een deel van het cavernedak migreert. In de zettingsberekeningen in paragraaf 3.3 is een grotere samendrukking van 44% berekend. Het verschil wordt veroorzaakt door de sterke versimpeling naar 1D en doordat in de berekening de belasting van de volledige puinkolom instantaan wordt toegepast, terwijl dit in werkelijkheid meer geleidelijk verloopt. Een verschil van deze ordegrootte tussen een sterk versimpelde berekening en een reconstructie aan de hand van praktijkgegevens is te verwachten.

Een nadere toelichting op het bovenstaande is te vinden in de presentatie 'Subsidence prognosis: "TWR fase 2" caverns – Validation of prognosis algorithm input parameters' d.d. 25-06-2024

5. Conclusies

Uit alle onderzoeken en observaties zijn de volgende conclusies getrokken over het gedrag van slurry in een caveerne:

1. Het gedrag van slurry is niet vergelijkbaar met een specifieke grondsoort. Qua sterkte gedraagt het zich als vast zand en qua vervorming als slappe klei. De geotechnische parameters zijn opgenomen in Tabel 4.
2. Aan de bovenste 2 meter van een slurryberg in een caveerne is geen weerstand tegen indringing van vallend puin te ontlenen. Dit is gebaseerd op testen met een puntbelasting en is daarom conservatief.
3. In geval van migratie zal de hoogte van de slurryberg ter plaatse van de migratie op de lange termijn met ca. 40% afnemen ten opzichte van de situatie direct na afloop van het vullen. Dit is een combinatie van de consolidatie onder eigen gewicht (ca 15%) en vervolgens de samendrukking als gevolg van belasting door een puinkolom bij migratie (ca. 30%).

6. Overzicht brondocumenten

Fugro Labrapport 2019: 17919-0029-001.M01 (memo d.d. 24-10-2019)

Fugro Labrapport 2021: 1719-0029-001-17-R01-v1.0-20210226

Fugro Labrapport 2022: 2421-203935-17-R01.v1.0-20220922

Fugro Labrapport 2023: 2421-203935-17-R02.v1.0-20230725

Fugro rapport 'Slurryvulling cavernes – geotechnische analyse en literatuurstudie' (kenmerk 1719-0029-002.R01, v1.0 d.d. 30 maart 2022)

Fugro rapport 'Simulaties laboratoriumproeven Nobian' (kenmerk 2421-203935.M01 – versie 3, d.d. 6 oktober 2023)

Reinvent presentatie: 'Subsidence prognosis: "TWR fase 2" caverns – Validation of prognosis algorithm input parameters' d.d. 25-06-2024

Bijlage 1: Omschrijving werkzaamheden en waarnemingen in het laboratorium

1. Start maart 2019

Op 6 maart 2019 zijn er voor het eerst 3 perspex cilinders met een diameter van 15 cm gevuld tot een vloeistofkolom van 1 m bereikt werd. Al vrij snel is er in de slurry een scheiding zichtbaar tussen vloeistof met veel vaste stof onderin en steeds helder wordende vloeistof bovenin. Het vullen van de cilinders is ook een praktische uitdaging omdat de vaste stof al vrij snel bezinkt op de bodem van de jerrycans. Er moet erg stevig geschud worden om alle vaste stof weer in suspensie te krijgen. Al binnen een uur tijd is het bovenste deel van de vloeistofkolom helder van kleur (pekkel).

Na 78 dagen wordt de pekkel afgetapt op 23 mei 2019. Uit de 1 m hoge kolommen zijn kolommen vaste stof van ca. 30 cm ontstaan. Dit duidt op een volumepercentage vaste stof van ca. 30%. Bij het nemen van een monster wordt met behulp van een verlengstuk een monsterbuis in de vaste stof gestoken. Vervolgens wordt de monsterbuis uit de cilinder gehaald. Bij het uithalen van de buizen bleek de vaste stof dusdanig zacht te zijn dat deze niet in de buis blijft zitten bij het uithalen. Het gat waar een monsterbuis uit de vaste stof gehaald is, vloeide ook vrijwel meteen weer dicht.

Er is slechts een klein stukje buis gevuld met vaste stof uit de cilinders gekomen. Op dit materiaal is uiteindelijk een samendrukkingsproef uitgevoerd en is het volumiek gewicht en watergehalte bepaald.

In elke cilinder is een handsondering uitgevoerd. Het handsondeerapparaat geeft pas een uitslag bij een conusweerstand die groter is dan 20 N/cm². Dit niveau is slechts bij 1 van de 3 cilinder bereikt op een diepte van 0,25 m in de vaste stof.

Start datum	06-03-2019	
Aantal gevulde cilinders	3	
Latere aanvulling na eerste bezinking	Nee	
Toepassing voorbelasting	Nee	
Aantal dagen consolidatie	78	
Hoogte kolom vaste stof	Ca. 30 cm	
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	3x Handsondering	Conusweerstand < 20 N/cm
	1x Oedometer test	Monster HB01_M1 $C_p = 17.8$, $C_s = 68.8$, $C'_p = 15.3$, $C'_s = 53.9$ $\sigma'_p = 86$ kPa
	1x volumiek gewicht	Nat: 16.0 kN/m ³ , droog: 6.0 kN/m ³
	1x watergehalte	86 % (m/m) 167.9% (bij samendrukkingsproef)
Algemene bevindingen	Materiaal simuleert de bovenste 30 cm van een slurryberg en is te weinig cohesief om goede samples uit te halen voor geotechnische testen. Samendrukkingsparameters en volumiek gewicht komen het meest overeen met het gedrag van slappe tot matig consistente klei	
Documenten	Labrapport: 17919-0029-001.M01 (memo d.d. 24-10-2019)	

De uitgevoerde methode leidt feitelijk tot een weergave van het gedrag van de bovenste decimeters slurry vulling in een caverne en is niet representatief voor het gedrag van de slurry in een caverne die zo ver als mogelijk gevuld is. De slurryberg is dan vaak wel 10 m hoog. Om het gedrag van wat dieper gelegen slurry te kunnen nabootsen is besloten om nogmaals slurry te laten consolideren en deze vervolgens te voorzien van een voorbelasting.

1. Start juni 2020

Op 3 juni 2020 zijn er opnieuw twee cilinders gevuld met slurry. Nadat er een duidelijke scheiding tussen heldere pekkel en vaste stof was ontstaan is er pekkel afgetapt en opnieuw slurry toegevoegd. Dit is een aantal keren herhaald om zo een dikker pakket slurry te krijgen. Daarna is een voorbelasting van 30 kg toegepast. Dit komt overeen met de druk die slurry ervaart op een diepte van 3 à 5 m in de slurryberg. De gewichten

werden op een plateau op een buis gelegd. Aan de onderkant van de buis zat een geperforeerde schijf die omwikkeld was met een geweven doek. Dit doek en de schijf zouden pekkel moeten doorlaten, maar de vaste stof zou onder de schijf moeten blijven. In de voorbelastingsfase is gebleken dat bij de één van de 2 cilinders de schijf inderdaad bovenop de vaste stof bleef. Bij de andere cilinder is de schijf een stuk in de slurry gezakt. Dit is een opmerkelijk verschil aangezien de belasting en de gebruikte materialen hetzelfde waren. De enige verklaring hiervoor is dat de geperforeerde schijf met de doek door vaste stof heen is gezakt die aanzienlijk fijnerkorreliger was dan de rest van het materiaal waardoor het door de doek heen kon. Het kan zijn dat één of meerdere jerrycans slurry die bij de tweede en/of volgende vulstap gebruikt zijn, fijnerkorreliger materiaal bevatte. Er is ook een derde cilinder met slurry gevuld en voorzien van een voorbelasting. De slurry in deze kolom is gebruikt om verschillende monsternamen technieken uit te proberen. Na 97 dagen, op 8 september 2020 is bij het nemen van monsters uit de 'testcilinder' gebleken dat de slurry aanzienlijk sterker was dan de vorige keer. De wanden van het gat waar de monsterbuis in gestoken was bleven lange tijd verticaal staan. Wel bleek bij de test dat het voor de monsternamen en de geotechnische proeven daarna, beter zou zijn om een vangmechanisme onderaan de buis te hebben dat voor wat ondersteuning zorgt bij het uithalen van de monsterbuis. Een dergelijk vangmechanisme was niet direct voorhanden. In oktober 2020 is met succes een monster uit de testcilinder genomen met behulp van een 'core catcher'. Op 26 november (na 176 dagen consolidatie) zijn vervolgens de monsters gestoken uit de 2 cilinders die voor de geotechnische proeven bedoeld waren. Het lukte niet om met de hand de monsters te steken, daarom is er extra gewicht op de monsterbuizen toegepast, te weten 90 kg bij de cilinder waar de geperforeerde schijf in de vaste stof gezakt was (kolom1) en 50 kg bij de andere cilinder (kolom 2). De geotechnische testen zijn in december 2020 en januari 2021 uitgevoerd.

Start datum	03-06-2020	
Aantal gevulde cilinders	2 voor geotechnische testen, 1 voor praktische testen monsternamen	
Latere aanvulling na eerste bezinking	Ja	
Toepassing voorbelasting	Ja, 30 kg	
Aantal dagen consolidatie	97 voor testen monsternametechnieken, ca 175 voor geotechnische testen.	
Hoogte kolom vaste stof	39 en 36 cm	
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	2x handsondering	Geen meetbare conusweerstand met 5 cm ² conus, Gemiddeld 33 N/cm ² conusweerstand met 10 N/cm ² conus
	4x Triaxiaaltest	Cohesie 0 tot 4 kPa, wrijvingshoek 35 tot 43 graden, gemiddeld 40 graden
	4x Oedometer test	Consolidatiecoëfficiënten onder de grensspanning lopen zeer uiteen, boven de grensspanning gemiddeld $c'_p = 13$ en $c'_s = 32$
	4x volumiek gewicht	Nat: 15 kN/m ³ , droog: 7.8 kN/m ³
	4x watergehalte	Gemiddeld 94 %
	waterdoorlatendheid	4E-07 m ² /s
Algemene bevindingen	Succesvolle monsternamen mogelijk met behulp van 'core catcher' Sterkte parameters van zeer vast gepakt zand, Vervormingsparameters van slappe tot matige klei.	
Documenten	Labrapport: 1719-0029-001-17-R01-v1.0-20210226	

2. Start januari 2022

Vervolgens is in de zomer van 2021 besloten om het proces nog 1 x te herhalen om aan de hand van meer testen een beter beeld te krijgen bij de spreiding van de testresultaten. Op dat moment stond het uitfasen van de brakwaterstroom op het punt van uitvoeren. Voor de slurriestroom betekende dit dat enkele pekkelstromen uit het fabrieksproces met een hoge zoutconcentratie, bij de slurriestroom gevoegd zouden

worden. Er is besloten te wachten totdat dit voltooid zou zijn om de 'nieuwe omstandigheden' mee te kunnen nemen in het te testen materiaal.

Op 12 januari 2022 zijn 3 cilinders gevuld met slurry. Ook nu zijn de kolommen opnieuw aangevuld na het bezinken van de vaste stof en daarna voorzien van een voorbelasting. De scheiding van vaste stof en vloeistof lag bij de cilinders rond de 20 cm. Het volumepercentage bezinksel lag dus lager dan bij eerdere proeven. Op 19 juli 2022 (na 188 dagen) zijn uit de eerste cilinder succesvol monsters gestoken met behulp van de core catchers. Vanwege de beperkte hoogte van de kolom bezinksel, is de beschikbare lengte van monsters om testsamples uit te halen beperkt. Daarom is besloten om een aantal verschillende testen te proberen op de monsters uit de eerste cilinder en op basis van de resultaten te besluiten hoe het resterende materiaal uit de overige 2 cilinders het best ingezet kan worden. De labtesten op de monsters uit de eerste cilinders hebben plaatsgevonden in augustus/september 2022. Vervolgens is het gedrag van het materiaal nagebootst met behulp van de software Plaxis. Dit is gedaan om te bepalen met welke testen het gedrag het beste verder in kaart gebracht kan worden. De analyses met Plaxis zijn gerapporteerd in maart 2023. Hieruit bleek dat het gedrag van de geconsolideerde slurry zich moeilijk laat beschrijven door de (meer geavanceerde) grondmodellen in Plaxis zoals de Hardening Soil small, Soft Soil Creep en Modified Cam-Clay modellen.

Vervolgens is een laatste reeks testen uitgevoerd in mei 2023 en gerapporteerd in juli 2023.

Start datum	12-01-2022	
Aantal gevulde cilinders	3	
Latere aanvulling na eerste bezinking	Ja	
Toepassing voorbelasting	Ja, 30 kg	
Aantal dagen consolidatie	188 voor eerste testen, ca. 475 voor tweede fase	
Hoogte kolom vaste stof	Rond de 20 cm	
Uitgevoerde testen (type, aantal en resultaat opmerkingen)	2x Triaxiaaltest single stage	Opnieuw hoge wrijvingshoeken (45+ graden) Cohesie = 0 kPa
	3x Oedometer test	Consolidatiecoëfficiënten onder de grensspanning nu wat dichter bij elkaar, gemiddeld $c'_p = 35$ en $c'_s = 85$. Boven de grensspanning gemiddeld $c'_p = 13,4$ en $c'_s = 28,4$
	2x CRS test	CR = 0,21 ordegrootte van gemiddelde klei. $C_\alpha = 0,038$ (kruipparameter) hoort bij veen
	1x DSS test	Resultaten niet goed bruikbaar
Algemene bevindingen	Laag vaste stof gehalte en daarom beperkte hoogte vaste stof om monsters uit te steken. Sterkte parameters van zeer vast gepakt zand, vervormingsparameters van slappe tot matige klei.	
Documenten	Labrapport 1 ^e fase: 2421-203935-17-R01.v1.0-20220922 Analyses na 1 ^e fase: 2421-203935.M01 Labrapport 2 ^e fase: 2421-203935-17-R02.v1.0-20230725 Analyses na 2 ^e fase: 2421-203935.M01-versie 3	