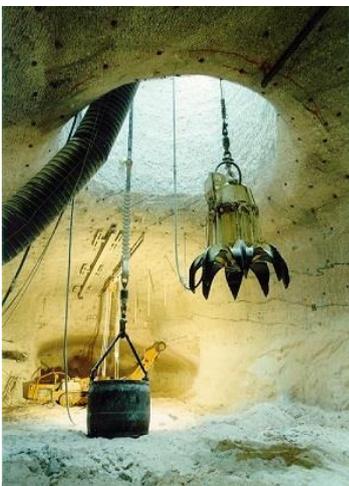


Nom du projet :	Évaluation de la résistance du cuvelage en fonte dans le puits Joseph		
Client :	Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) Avenue Joseph-Else – BP 50 68310 Wittelsheim		
Titre du rapport :	Rapport final		
Doc. ID. (PDM) :	00927629		
Projet n° (PDM) :	20032		
Rev.: 00 06/04/2023	Version originale		
	Élaborée par : H. Zirbes	Contrôlé par :	Approuvé par :



Évaluation de la résistance du cuvelage en fonte dans le puits Joseph

Rapport final

Doc. n° (PDM) : 00927629 Rev.: 00

Client : Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)
Avenue Joseph-Else – BP 50
68310 Wittelsheim

Entreprise travaux : Redpath Deilmann GmbH
Haustenbecke 1
44319 Dortmund

06/04/2023

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION ET MISSION.....	5
1.1	Introduction	5
1.2	Mission.....	5
2	EXAMEN ACTUEL	7
2.1	Mesure de l'épaisseur du cuvelage par ultrasons	7
2.1.1	Puits Joseph :	7
2.1.2	Puits Else :	8
2.2	Mesures manuelles des dimensions des cuvelages	9
2.2.1	Puits Else :	11
2.2.2	Puits Joseph :	12
2.3	Mesure du puits par balayage laser (uniquement Joseph).....	13
3	NOTES DE CALCULS.....	16
3.1	Charges	16
3.2	Composition des panneaux de cuvelage	17
3.3	Section des panneaux de cuvelage	18
3.3.1	Épaisseur	18
3.3.2	Nervures externes	18
3.3.3	Nervures internes	18
4	PREUVE DE LA CAPACITE PORTANTE.....	20
5	EFFETS POSSIBLES SUR LE CUVELAGE.....	22
6	CONCLUSIONS ET PRECONISATIONS	23
6.1	Conclusions	23
6.2	Préconisation	24
6.2.1	Préconisation à court terme.....	24
6.2.2	Préconisations à long terme	24
ANNEXE 1 : Extraits des mesures du puits par balayage laser		

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Redpath Deilmann GmbH: Puits JOSEPH et ELSE – Rapport Audit. 08/06/2022
- [2] DMT GmbH & Co. KG: Inspection of Shaft Joseph. Rev. 0, 28.09.2022
- [3] DEKRA Inspection Matériaux: Mesures d'épaisseurs sur gainage du puit Joseph (B14965291201). Rev. 0, 12/07/2012
- [4] DEKRA Industrial SAS: Mesure d'épaisseur du cuvelage du puits Joseph (E1174800/2201/01). Rev. 0, 09/11/2022
- [5] Hoffmann, D.: 175 Jahre gußeiserner Tübbingausbau. Glückauf 103 (1967), Heft 10
- [6] Bachstroem, R.H.: Zur Werkstofffestigkeit alter und neuer gußeiserner Tübbinge. Bergbau-Archiv 25 (1964), Heft 3, Seiten 1-12
- [7] Gutehoffnungshütte (GHH): Fertigungszeichnungen für drei Passringe. 1911, 1912. (Archivunterlage der MDPa)
- [8] Zapp, Triebel, Kübler: Sanierung der Tübbingsäulen in den Schächten Neuhof und Ellers. Kali und Steinsalz, 2002.
- [9] DEKRA Industrial SAS: Mesure d'épaisseur du cuvelage du puits Else (E1994050/2301/01). Rev. 0, 05/03/2023
- [10] IGECAR SARL: Etat des lieux 2022 du cuvelage du puits Joseph – Site de StocaMine à Wittelsheim (68); 2023.RAP.0004; 13/01/2023
- [11] Hoffmann, D.: Acht Jahrzehnte Gefrierverfahren nach Poetsch. Verlag Glückauf GmbH, Essen. 1962
- [12] Bachstroem, R.H.: Untersuchung und Systematik der Schäden an gußeisernen Tübbingsäulen. Dissertationsschrift. RWTH Aachen, 1960
- [13] Link, Lütgendorf, Stoß: Richtlinien zur Berechnung von Schachtauskleidungen im nicht standfesten Gebirge. Steinkohlenbergbauverein, Essen, 1985 (3. Auflage)
- [14] DIN 21500:2017-05 Schachtausbau im Bergbau – Entwurf und Bemessung
- [15] DIN EN 1561:2012-01 Gießereiwesen – Gusseisen mit Lamellengraphit
- [16] DIN 21501: 1963-08 (zurückgezogen) Schachtausbau aus Gußeisernen Tübbingen

1 Introduction et mission

1.1 Introduction

« Rapport traduit de l'allemand – la version originale fait foi »

Le puits Joseph a été creusé dans les années 1911-1913 jusqu'à une profondeur d'environ 558 mètres. Il sert de puits d'aération aspirant et est équipé d'une installation d'extraction avec cage. L'installation d'extraction se compose d'une cage d'extraction et d'un contrepoids. La cage est mue par une poulie Koepe avec à deux câbles clos de traction. Un câble d'équilibre entre le contrepoids et la cage vient compléter le système mobile. Les mobiles sont guidés dans le puits par des glissières en bois verticales, fixées sur des supports horizontaux appelés moises qui sont également en bois.

Divers câbles d'alimentation électrique ou de communication, sont suspendus au droit des parois du puits, et sont fixés par des supports de câbles.

De 0 à - 4,0 m de profondeur, le puits est revêtu d'une maçonnerie de briques pour un diamètre intérieur d'environ 5,8 m.

De - 4,0 à - 23,35 m de profondeur environ, le puits présente un cuvelage en fonte d'un diamètre intérieur d'environ 5,1 m.

En dessous de - 23,35 m de profondeur, le diamètre intérieur est uniformément de 4,50 m.

Entre - 23,35 et - 196,55 m, le puits est revêtu d'un cuvelage en fonte.

De - 196,55 à - 451,5 m environ, il est revêtu de blocs de béton, et en dessous de - 451,5 m, le soutènement du puits est en béton coulé sur place.

1.2 Mission

Le revêtement du puits Joseph est visiblement en mauvais état. Cela concerne aussi bien le cuvelage que le revêtement en blocs de béton et en béton coulé sur place. L'état des trois types de revêtement est présenté en détail dans [2].

Les surfaces revêtues de cuvelage doivent normalement faire l'objet d'une attention particulière, car il s'agit en général des endroits soumis à la présence d'eaux souterraines, qu'il faut empêcher de pénétrer dans le puits, en particulier dans le cas des puits de potasse et de sel gemme. Ainsi, la présente étude se concentre sur le cuvelage en fonte.

Nous n'avons que très peu de connaissances sur le revêtement mis en place dans les puits Joseph et Else, car seuls quelques documents datant de la phase de fonçage de ces puits ont été conservés. MDPA et RSA ont effectué des recherches bibliographiques intensives sur ce sujet avant l'étude, mais n'ont trouvé que très peu de documents pertinents.

C'est pourquoi les travaux actuels de RSA se concentrent sur la détermination des données existantes concernant le revêtement des puits.

Depuis le deuxième semestre 2022, différentes mesures ont été effectuées sur les cuvelages et sur le revêtement en béton dans les puits Joseph et Else. Celles-ci comprenaient :

- Des mesures d'épaisseur de paroi par ultrasons au niveau du cuvelage des deux puits ;
- Des mesures manuelles des dimensions des cuvelages : Mesures manuelles des dimensions des cuvelages : épaisseurs des matériaux et longueurs des brides et des nervures intérieures sur le cuvelage des deux puits.
- Mesure du puits par balayage laser sur toute la profondeur du puits Joseph.

Les résultats de ces mesures sont présentés et interprétés dans la partie 2.

Sur la base de ces résultats, d'une visite des deux puits par l'auteur et des inventaires documentés dans [1] et [2], la stabilité du cuvelage sera évaluée à l'aide de calculs statiques (parties 1 et 4). Ceci est réalisé en particulier dans le cas où une exploitation du puits devrait se prolonger au-delà de l'année 2027.

Pour finir, MDPA souhaitait une brève description des conséquences possibles d'une rupture plus ou moins importante des cuvelages. Celle-ci se trouve au chapitre 5.

Il convient de préciser qu'aucun paramètre de mécanique des roches n'est disponible sur les sites. Nous n'avons pas non plus d'informations fiables sur la pression et sur la composition chimique des eaux souterraines. Les calculs statiques reposent donc sur quelques hypothèses de charge approximatives, mais tout à fait légitimes, qui sont expliquées plus en détail au chapitre 1 .

Les démonstrations statiques sont effectuées sur la base de la norme DIN 21500:2017-05, reconnue en Allemagne et dans certains autres pays, qui se réfère pour certains aspects à la normalisation européenne actuelle dans le domaine de la construction (Eurocodes).

2 Examen actuel

2.1 Mesure de l'épaisseur du cuvelage par ultrasons

2.1.1 Puits Joseph :

Le 09/11/2022, la société DEKRA Industrial SAS a procédé à une évaluation de l'épaisseur de la paroi du cuvelage dans le puits Joseph au moyen de mesures par ultrasons. Les résultats sont documentés dans [4]. Les mesures ont été réalisées à huit niveaux de profondeurs différents. À chacun de ces niveaux, les mesures ont été prises à quatre emplacements à environ 90° les uns des autres (nord, sud, est, ouest). La figure 1 (à gauche) présente une représentation graphique des résultats. Dans l'ensemble, il y a une variation des valeurs mesurées entre 20 mm (minimum) et 36 mm (maximum). Il n'y a pas de corrélation évidente en fonction de la profondeur. Les valeurs varient également considérablement entre les différents niveaux de mesure. On constate ici des différences d'épaisseur de paroi allant jusqu'à 13 mm. Il n'est pas possible d'identifier une corrélation selon la direction. Le (seul) résultat clair est que les épaisseurs de paroi ne sont jamais inférieures à 20 mm. Cette valeur peut donc être considérée comme l'épaisseur minimale actuelle des parois du cuvelage.

Sur le côté droit de la même figure, les valeurs mesurées en 2022 sont comparées aux valeurs mesurées en 2012 [3], également réalisées par DEKRA. À une exception près, on constate une nette réduction de l'épaisseur des parois. Selon les valeurs mesurées, l'épaisseur de paroi dans la partie inférieure du cuvelage a diminué de moitié au cours des 10 dernières années, passant d'environ 45 mm à environ 23 mm. Cela correspond à un taux de rouille de 0,22 mm/an, ce qui est considéré comme extrêmement élevé et qui est douteux du point de vue de l'auteur. Des sources bibliographiques, notamment [8], indiquent des taux de rouille allant jusqu'à 0,025 mm/an pour les puits de potasse. Il convient de souligner ici que la précision de cette méthode de mesure est limitée, en particulier pour les parois de faible épaisseur.

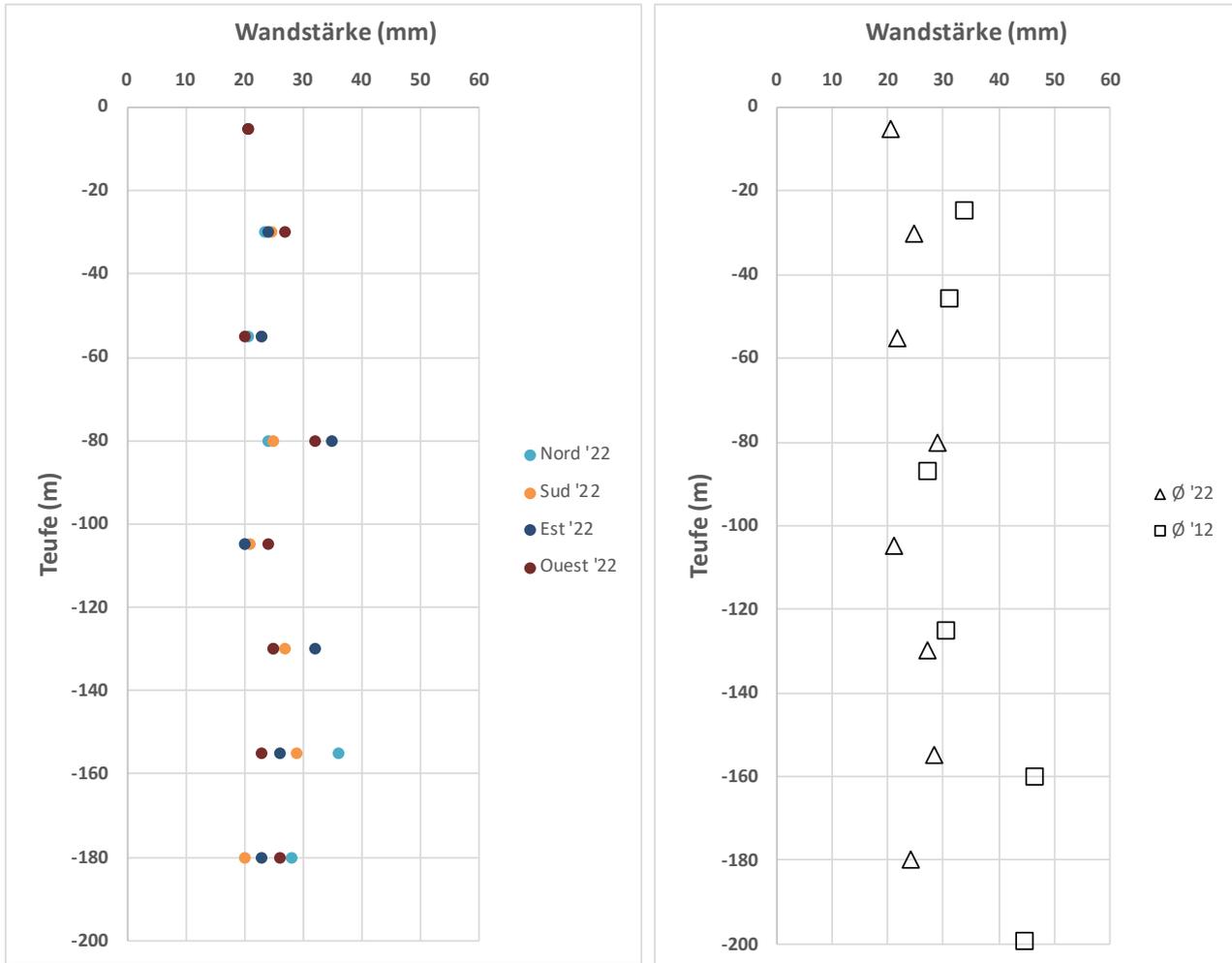


Figure 1 : Mesures d'épaisseur de paroi par ultrasons puits Joseph

2.1.2 Puits Else :

Des mesures par ultrasons ont également été effectuées dans le puits Else pour déterminer l'épaisseur du cuvelages. Les résultats sont documentés dans [9] et représentés selon la profondeur dans la figure 2 (à gauche). On remarque que les valeurs mesurées sont nettement moins variables entre les différents niveaux de mesure que dans le puits Joseph. Sur le côté droit de la même figure, les épaisseurs moyennes des parois de cuvelage des deux puits sont comparées. On remarque ici très clairement que les épaisseurs de paroi du puits Else semblent être encore presque conformes à celles d'origine, alors que dans le puits Joseph, une réduction considérable due à la corrosion a eu lieu.

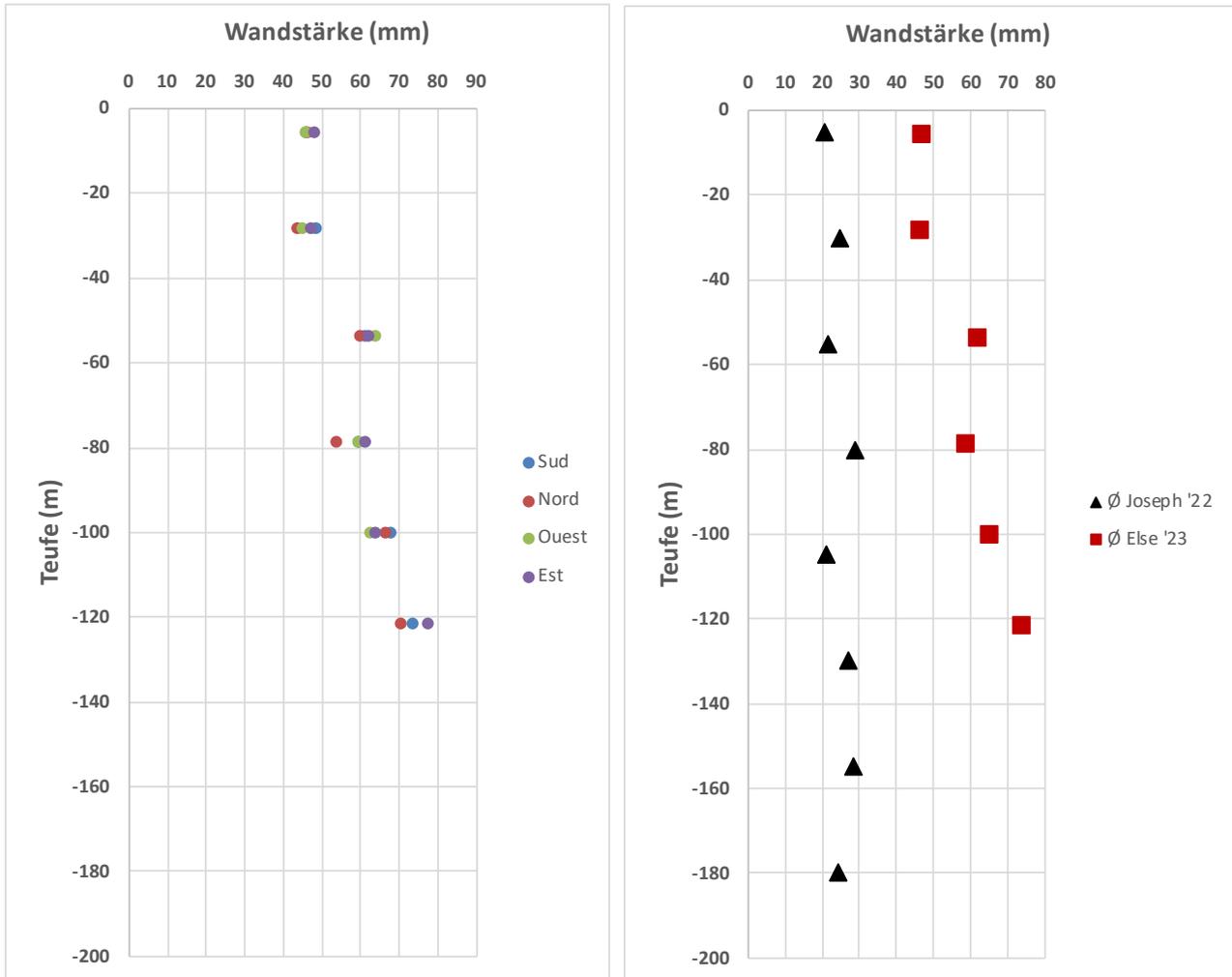


Figure 2 : Mesures de l'épaisseur de paroi par ultrasons puits Else (à gauche) et comparaison avec le puits Joseph (à droite)

2.2 Mesures manuelles des dimensions des cuvelages

Afin de procéder à une étude plus précise concernant les cuvelages utilisés et afin de les comparer aux épaisseurs de paroi déterminées par les mesures ultrasoniques, des mesures manuelles supplémentaires ont été effectuées à partir de mars 2023 dans les puits Joseph et Else. Il s'agissait essentiellement d'un relevé systématique des épaisseurs de matériau des brides de cuvelage sur tous les anneaux de cuvelage.

Les archives de la MDPa nous apprennent que la fabrication des cuvelages en fonte pour les puits Joseph et Else a été effectuée par la Gutehoffnungshütte (GHH) à Oberhausen-Sterkrade. Selon [5], la collaboration des fabricants allemands de cuvelages a conduit dès la fin du XIX^e siècle à une forme de cuvelage uniforme, toutefois encore sans nervures à l'arrière. Selon [5], celles-ci ne sont devenues standard que dans les années 1930, afin

d'obtenir une meilleure imbrication avec les matériaux de remplissage. On peut supposer que les cuvelages du puits Joseph ne disposent pas de nervures à l'arrière. Cette hypothèse est appuyée par trois dessins de construction disponibles pour des anneaux d'ajustage de la GHH datant des années 1911 et 1912 (figure 3).

Cette figure montre également que la longueur (radiale) des brides et des nervures intérieures est de 90 mm, mesurée à partir de l'intérieur de la paroi arrière. Dans la norme DIN BERG 1501 introduite en 1939 (devenue par la suite DIN 21501), cette mesure est par défaut de 120 mm. Une autre différence par rapport à cette norme est l'épaisseur des brides, qui est ici 5 mm plus importante que l'épaisseur de la paroi arrière. Selon la norme DIN 21501, cette valeur est de 10 mm pour le cuvelage allemand.

Comme les anneaux d'ajustage ont été fabriqués en trois épaisseurs de paroi différentes (35 / 45 / 60 mm), on peut supposer que les autres cuvelages ont également été construits avec ces épaisseurs.

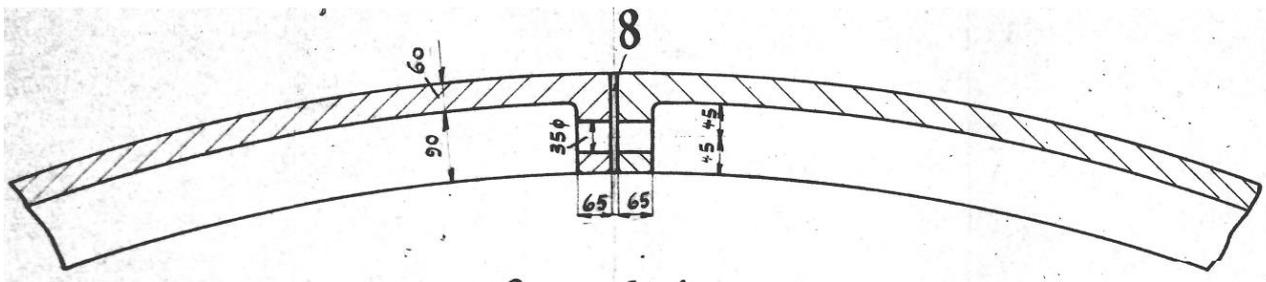


Figure 3 : Extrait d'un dessin de construction pour un anneau d'ajustage de GHH [7].

Le passage de texte ci dessous, provient d'une source inconnue des archives de MDPa, permet une interprétation similaire. Cependant, l'épaisseur moyenne des parois d'environ 75 mm mesurée à environ -120 m de profondeur dans le puits Else est en contradiction avec cette affirmation, mais pourrait d'autre part provenir d'une inexactitude de mesure ou d'une irrégularité locale.

2°/ Application au cuvelage du puits Joseph

a) Caractéristiques du cuvelage

En partie supérieure, le cuvelage, sauf aux endroits des renforts, a un diamètre extérieur de 5,35 m et une épaisseur de 35 mm. Plus bas, en dessous de 20 m, le diamètre extérieur passe à 4,85 m (diamètre intérieur 4,60 m), l'épaisseur restant à 35 mm, puis passant à 40, 45 mm. Le module E est pris égal à $9.4 \cdot 10^{10}$ Pa.

2.2.1 Puits Else :

Les valeurs de mesure obtenues conduisent tout d'abord à la confirmation de la longueur (radiale) des brides et des nervures intérieures de 90 à 95 mm indiquée dans la figure 3.

Jusqu'à une profondeur d'environ - 35 m, on obtient des épaisseurs de cuvelage assez uniformes d'environ 42 mm en moyenne (cf. figure 4). En suivant la systématique de la figure 3, cela suggère une épaisseur de paroi d'environ 35 mm. Entre - 35 et - 105 m de profondeur, l'épaisseur du cuvelage varie entre 41 et 54 mm environ, avec une valeur moyenne de 48 mm (ce qui correspond à une épaisseur de paroi d'environ 40 mm ou parfois 45 mm). Sous -105 m et jusqu'à la fin du cuvelage vers -120 m de profondeur, les valeurs varient entre 52 et 61 mm. Par conséquent, les épaisseurs de paroi pourraient alors être de 45, 50 ou 55 mm.

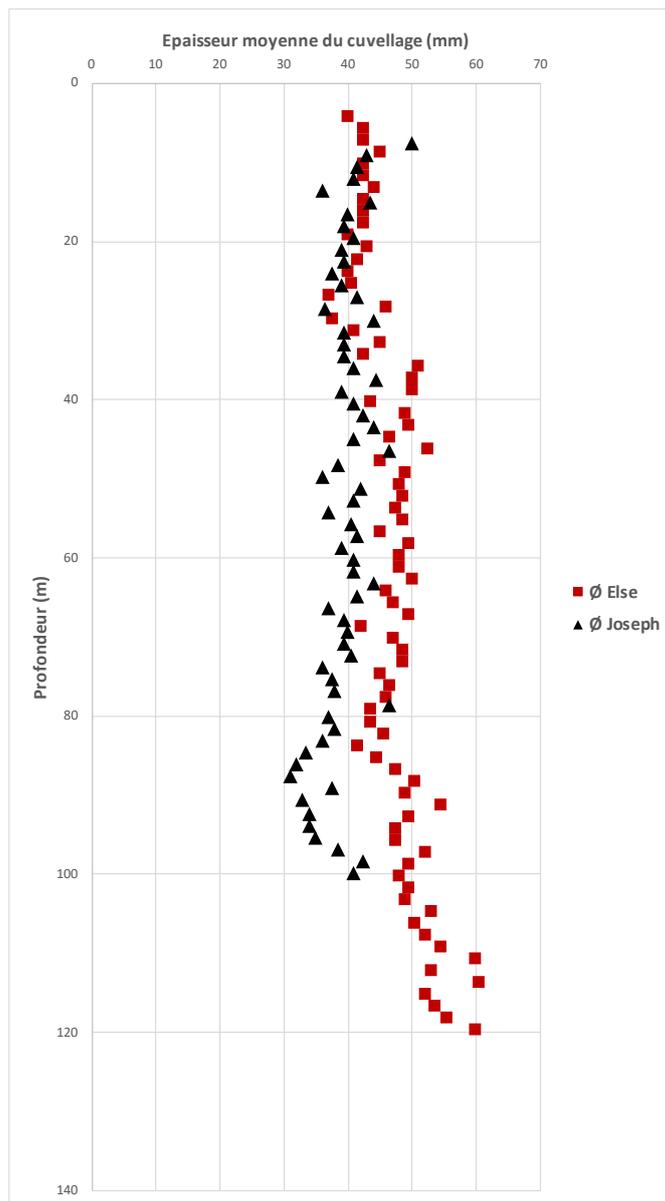


Figure 4 : Mesures manuelles des cuvelages

2.2.2 Puits Joseph :

Les valeurs de mesure obtenues dans le puits Joseph sont également représentées dans la figure 4. Au moment de la rédaction du rapport, les valeurs mesurées ne sont disponibles que jusqu'à 100 m de profondeur environ. Contrairement au puits Else, il n'y a pas d'augmentation apparente de l'épaisseur des cuvelages en fonction de la profondeur. La majorité des valeurs mesurées se situent dans une plage de 40 mm, ce qui indique que l'épaisseur initiale du cuvelage était de 35 mm.

2.3 Mesure du puits par balayage laser (uniquement Joseph)

Le 01/12/2022, le puits Joseph a été mesuré sur toute sa profondeur par balayage laser par la société IGECV. Les résultats sont documentés dans [10]. Les mesures par balayage laser ont été effectuées sur 59 sections en tout. Pour chaque section, un nuage de points a été généré, à l'aide duquel des mesures très précises pourront également être effectuées a posteriori. Les nuages de points ont été mis à la disposition de MDPA et RSA sous forme numérique. Un modèle global comprenant la superposition des nuages de points et des photos prises simultanément par le scanner laser a été mis à disposition via le cloud internet. Ce modèle offre d'excellentes possibilités pour examiner en détail sur les zones critiques du revêtement du puits à postériori après une visite du puits. Quelques extraits représentatifs ou singuliers figurent dans l'annexe 1.

Le scan du puits confirme pour l'essentiel les constatations documentées dans [1] et [2]. Les cuvelages sont dans l'ensemble fortement à très fortement corrodés. Cela se traduit d'une part par des éclatements de rouille importants sur les parois du cuvelages et d'autre part par des nervures intérieures fortement attaquées et sur certaines zones presque entièrement détachées. La partie du cuvelage la plus corrodée se situe dans la zone centrale du cuvelage (env. M47-M80) . Celle-ci est documentée dans [2], où l'on peut voir les effets de la corrosion sur les plaques nervurées.

Le relevé du puits a également permis de constater une légère ovalisation du puits de 130 à 151 m de profondeur. Cette ovalisation s'arrête brusquement à 151 m de profondeur, car un joint de picotage y est aménagé. Ces joints ont été inséré lors de l'installation du cuvelage et du jour vers le fond. En raison des moyens mis en œuvre au début du XX^e siècle. La pose ne pouvait pas être effectuée au millimètre près. C'est la raison de l'apparition des ce type de plan de joint et du décalage horizontal entre la partie supérieure du cuvelage et la partie inférieure du cuvelage. Pour étanchéifier ces joints, on y enfonçait généralement des coins et cales en bois susceptibles de gonfler en présence d'eau (picotage). Une autre caractéristique des joints de picotage est l'absence de boulonnage des brides d'appui horizontales adjacentes.

Le puits Joseph a une particularité qui n'a été observé avant. Grâce à la numérisation du puits, on peut constater que le revêtement du puits [10] change à la profondeur d'environ 87 m (figure 6). Sur le même diamètre il y a 10 panneaux de cuvelage en partie inférieure et seulement 9 panneaux en partie supérieure. Le transition se fait à l'aide de l'anneau

ajusté. Cette information est confirmée par un dessin provenant du fonds documentaires des MDP A (voir aussi chapitre 2.2 et PJ1).

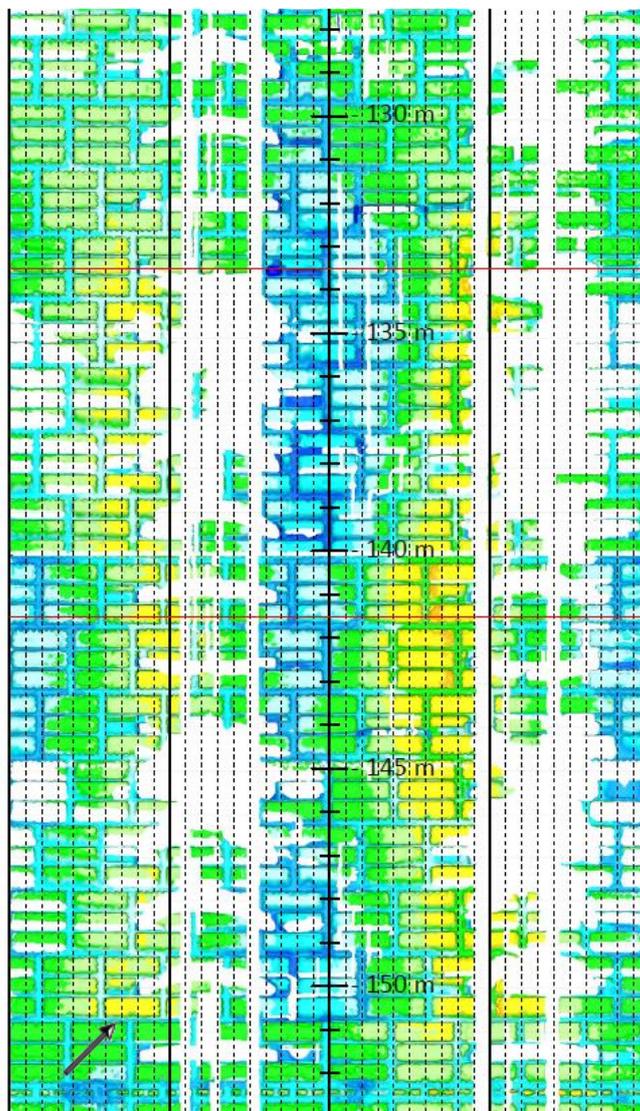


Figure 5 : Légère ovalisation à partir d'environ 130 m avec interruption brutale par un joint de picotage à environ 151 m (flèche : joint de picotage, vert : pas de déformation, bleu : déformation vers l'intérieur, jaune : déformation vers l'extérieur) [10]

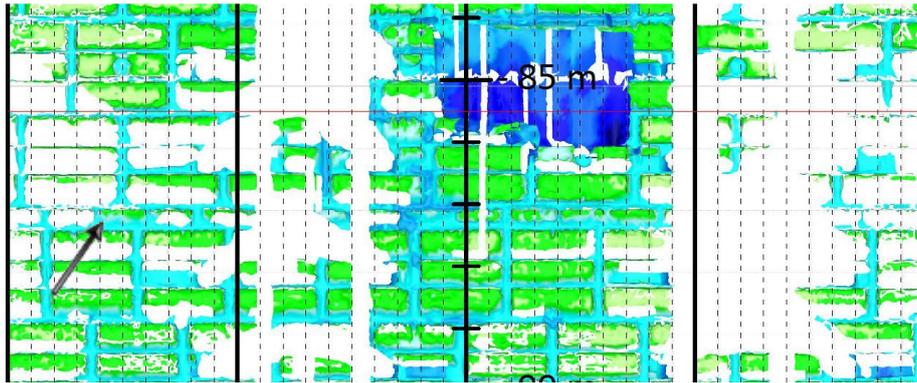


Figure 6 : L'anneau ajusté (vers milieu du dessin, flèche). Passage du cuvelage composé de 9 pièce au cuvelage composé de 10 pièces, profondeur: environ 87m [10]

La numérisation du puits faite fin 2022, montrent, que le puits est légèrement incliné dans sa partie inférieure ou le muraillement est réalisé avec des blocs de béton et du béton coulé. Cette inclinaison est présente entre la profondeur 275m et la recette fond du puits. L'inclinaison totale mesurée est le 65cm dans la direction NE, ce qui correspond à une inclinaison de 2mm par 1 mètre [10].

Du point de vue de l'auteur du présent document, ni la légère ovalisation, ni la présence du joint picot, ni l'inclinaison de la partie basse du puits n'ont d'influence sur la stabilité du cuvelage

3 Notes de calculs

3.1 Charges

Il est pratiquement impossible de déterminer avec précision les charges externes agissant sur le soutènement du puits en raison de la complexité et de la variabilité naturelles des structures géologiques. Cela vaut en particulier pour les roches solides avec des eaux de fracturation. En règle générale, on a recours à des études géotechniques intensives afin d'obtenir une connaissance plus approfondie des effets possibles. Par expérience, on constate que la plupart du temps et même après de telles recherches, de grandes incertitudes subsistent quant aux hypothèses de charges à prendre en compte.

Dans le cas du puits Joseph, il y a certes un profil lithologique complété par des descriptions de la roche, mais aucun paramètre mécanique des roches n'existe. Il ressort de certains documents d'archives que seul le niveau de roches meubles quaternaire jusqu'à environ 35 m est un aquifère significatif. Les formations de roches solides qui se trouvent en dessous sont en principe considérées comme des barrages vis-à-vis de l'eau souterraine, mais ces formations géologiques disposent de fentes aquifères. D'après la coupe lithologique, la profondeur finale du cuvelage a été identifiée sur la couches de gypse la plus profonde (zone à gypse), car on considérait que cela indiquait la présence d'eau (transformation de l'anhydrite en gypse).

Dans ces conditions, on ne peut estimer que de façon approximative les charges exercées sur le cuvelage. C'est pourquoi il semble légitime d'adopter l'approche formulée dans [13], appliquée à un grand nombre de puits dans les mines de houille, de sel et de potasse allemandes, qui se formule ainsi :

$$p_a = p_g + p_w = 1,3 * H * \gamma_w$$

Avec

p_a = pression horizontale extérieure uniforme [kN/m²]

p_g = pression de la roche [kN/m²]

p_w = pression de l'eau [kN/m²]

H = hauteur manométrique statique des eaux souterraines [m]

γ_w = poids spécifique des eaux souterraines [kN/m³].

En d'autres termes, cela signifie qu'à l'endroit du calcul, on applique 1,3 fois la pression de l'eau, ce qui correspond à une colonne d'eau présente jusqu'à la surface jour et à un supplément de 30 % pour tenir compte des éventuelles pressions des roches.

De plus, à la pression extérieure uniforme se superpose une irrégularité de 5 % répartie sur le périmètre du puits, comme le montre la figure 7. Le calcul de l'irrégularité de 5 % est conforme à la norme DIN 21500 [14].

Comme on ne connaît pas les caractéristiques du remblai à l'arrière du cuvelage et que l'on peut de toute façon supposer que la pression de l'eau s'exerce directement à l'arrière de la paroi du cuvelage en raison des infiltrations, le remblai n'est pas pris en compte dans les vérifications statiques.

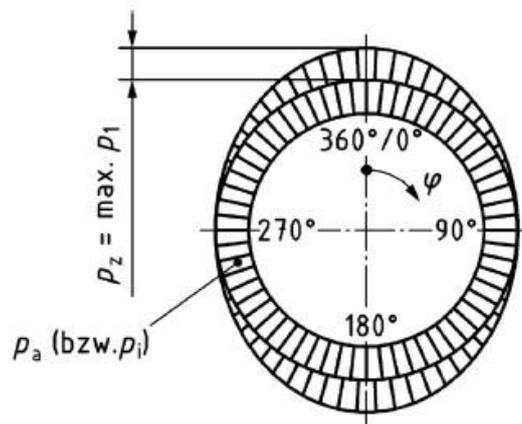


Figure 7: Pression uniforme et non-uniforme selon la norme DIN 21500

3.2 Composition des panneaux de cuvelage

La composition réelle des matériaux pour les panneaux de cuvelages en fonte du puits Joseph n'est pas disponible dans les archives de MDPA. Cependant, il existe des documents de référence du milieu du 20^{me} siècle de différentes entreprises minières qui fabriquaient les cuvelages. Certains de ces documents peuvent nous être utiles et ils nous permettent de tirer des conclusions par analogie. Dans un document de 1964 [6] on peut lire comme suit:

D'après la littérature ancienne on sait que dans le cas de panneaux de cuvelage, la résistance à la traction est de 14 kg/mm² et la résistance à la compression est le 75kg/mm². Les valeurs obtenues par l'inspection des fragments de roches et l'inspection des carottes sont, très souvent, inférieures aux valeurs précitées. La résistance à la traction est très souvent entre 8 et 14 kg/mm² et la résistance à compression entre 40 et 60 kg/mm².

Selon la norme DIN BERG 1501 de 1939 (plus tard: DIN 21501) la résistance moyenne à la traction pour les revêtement en cuvelage est de 180 N/mm² (GG-18, selon DIN 1691). Il est probable que les cuvelages des puits Joseph et Marie sont en GG-10. Dans la norme en vigueur DIN 1561[15] le matériau anciennement connu sous le nom GG-10 est désormais connu sous le nom de EN-GJL-100. On lui attribue les propriétés mécaniques suivantes, souvent extrapolées, qui nous ont servis comme la base pour les calculs présentées ici.

Tableau 1: Caractéristique de la fonte type EN-GJL-100

Matériau	Résistance à la traction [N/mm ²]	0,1%-Seuil d'élasticité [N/mm ²]	Résistance à la compression [N/mm ²]	0,1%-Seuil de compression [N/mm ²]	Modul E [N/mm ²]*	Poisson [-]
EN-GJL-100	100	67	400	130	94000	0,26

* selon les archives MDPA ; toutes les autres valeurs sont extrapolées de la norme DIN EN 1561

3.3 Section des panneaux de cuvelage

3.3.1 Épaisseur

Les mesures ultrason montrent que les épaisseurs de parois existantes sont supérieures à 20mm sur toute la partie cuvelée du puits. Par précaution, nous prendrons pour nos calculs la valeur de 20mm.

3.3.2 Nervures externes

Les mesures précitées dans le chapitre 2.2 montrent que nervures externes n'ont pas été prises en compte pour déterminer les sections transversales.

3.3.3 Nervures internes

Comme précisé dans le chapitre 2.3 les nervures de la partie supérieure et la partie inférieure des panneaux restent intactes. Par contre, elles sont très corrodées au milieu (voir PJ 1). Pour les calculs statiques, nous avons pris en compte une épaisseur de nervure interne égale à 30mm. Les valeurs sélectionnées peuvent être retrouvées en Figure 8 . La Figure 9 montre le modèle 3-D d'un panneau de 1.5m de hauteur modélisé pour les calculs.

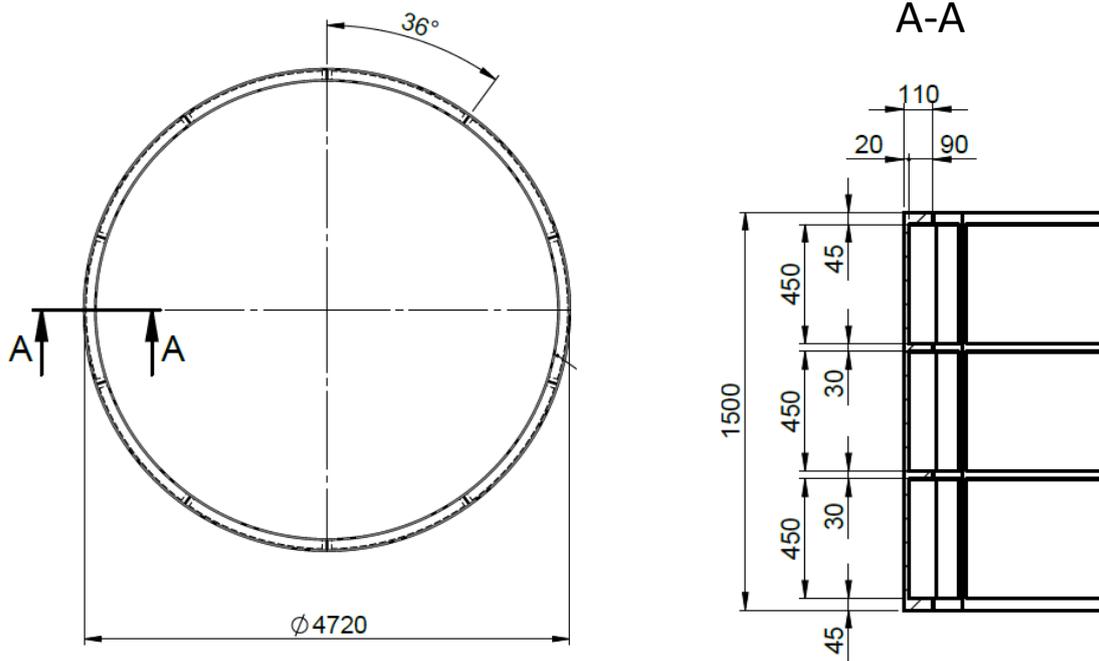


Figure 8: Modèle choisi pour les calculs statiques des panneaux de cuvelage choisis

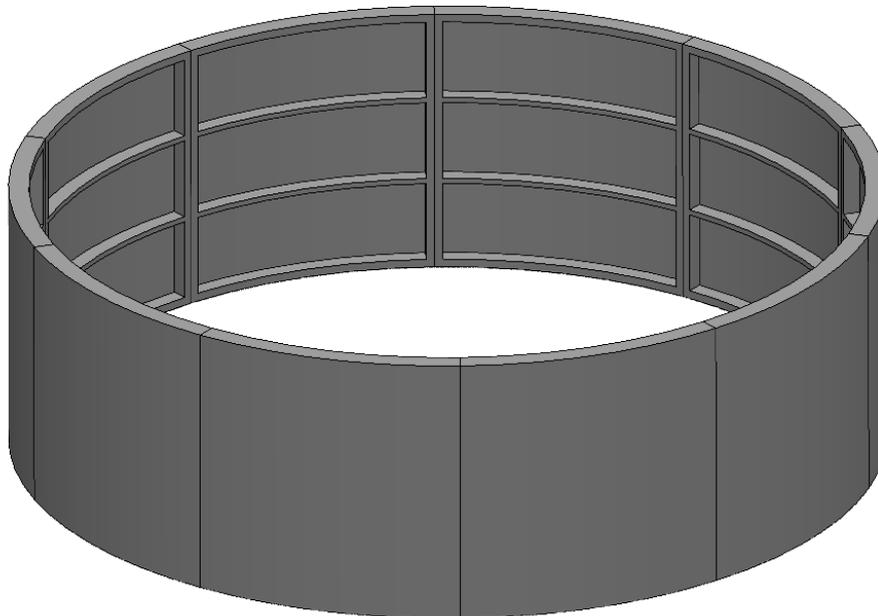


Figure 9: Modèle 3-D d'un anneau de ~~du~~ panneau de cuvelage

4 Preuve de la capacité portante

Pour vérifier la capacité portante on définit d'abord les contraintes présentes dans le cuvelage. Elles ont été estimées d'après le modèle 3-D du cuvelage (Figure 9) en appliquant la méthode des Éléments Finis (FEM). Pour le faire, nous avons utilisé un logiciel qui fait partie de Solidworks. Les contraintes critiques sont des contraintes tangentielles qui sont présentes sur le bord de l'anneau interne du cuvelage.

Les pressions uniformes externes, sont uniquement les pressions de compression. Lorsqu'elles se superposent aux pressions non-uniformes, les contraintes de traction apparaissent. La Figure 10 montre les contraintes normales, présentes sur le panneau de cuvelage à la profondeur de 70m.

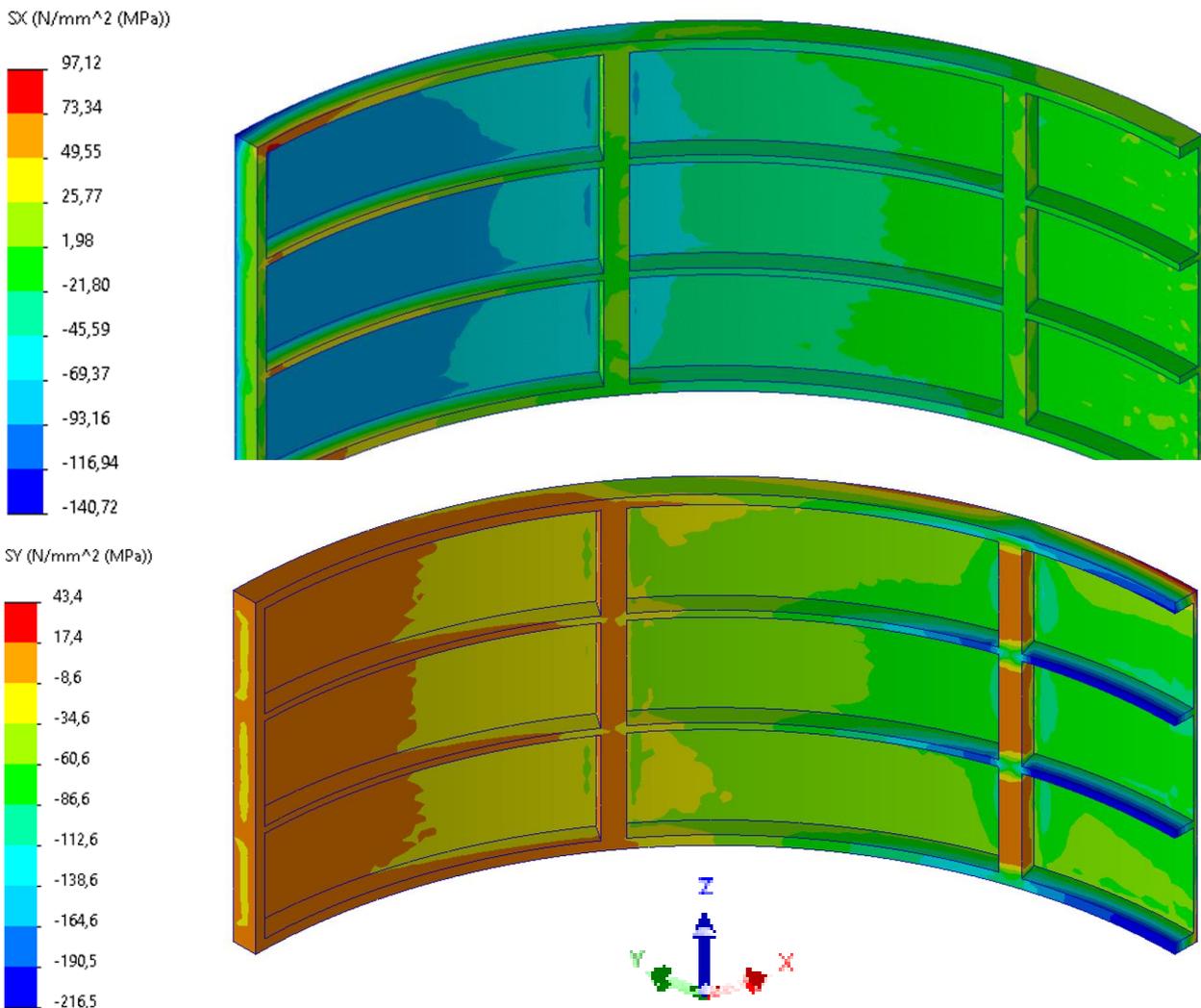


Figure 10: Contraintes normales, présentes sur le panneau de cuvelage à la profondeur de 70m

Pour une meilleure compréhension, la preuve de la capacité portante est basée sur les consignes générales de sécurité. Cela veut dire, que les facteurs partiels ne sont pas pris en compte pour les calculs. Dans les mines, on utilise le coefficient « général » de sécurité – FoS : Ce coefficient de sécurité est toujours utilisé et est déterminé à l'aide des charges. En général, dans les mines, le coefficient de sécurité ne doit être jamais inférieur à 1.5.

Les coefficients définissant différents niveaux de sécurité, pour les différentes profondeurs, sont répertoriés dans le Tableau 2. Si le niveau de sécurité est inférieur à 1,5, le coefficient FoS devient jaune. Dans le cas du puits Joseph, c'est le cas à partir de la profondeur d'environ - 60m.

Si le coefficient de sécurité est inférieur à 1, le niveau de sécurité est souligné en rouge. Dans ces zones, il n'est plus possible de prouver la résistance du cuvelage à la rupture par des calculs mathématiques. C'est le cas dans le puits JOSEPH ou au-delà de la profondeur de -100m, le coefficient de sécurité est inférieur à 1.

Tableau 2: Résultats de la vérification de la capacité portante

Profondeur r [m]	γ_w [kN/m ³]	p_a [kN/m ²]	p_z [kN/m ²]	max σ_t (pression) [MPa]	admissible σ_t (pression) [MPa]	FoS (pression)	max σ_t (tension) [MPa]	admissible σ_t (tension) [MPa]	FoS (tension)
5	10	65	3,3	32,8	400	12,19	25,36	100	3,94
15		195	9,8	40,8		9,80	15,71		6,37
25		325	16,3	68,1		5,88	26,19		3,82
35		455	22,8	59,2		6,75	65,7		1,52
50		650	32,5	136,1		2,94	52,4		1,91
70		910	45,5	190,5		2,10	73,3		1,36
90		1.170	58,5	245,0		1,63	94,3		1,06
110		1.430	71,5	299,4		1,34	115,2		0,87
130		1.690	84,5	353,9		1,13	136,2		0,73
150		1.950	97,5	408,3		0,98	157,15		0,64
170		2.210	110,5	462,7		0,86	178,1		0,56
190		2.470	123,5	517,2		0,77	199,06		0,50

Il est évident, notamment parce qu'il n'y a pas de fissures, que tout le cuvelage a gardé une capacité portante suffisante pour contenir les différentes sollicitations initiales. Il faut savoir, que la capacité portante calculée peut être différente de la capacité portante réelle. Ainsi, la réserve de la capacité portante, telle que présentée dans le chapitre 1, ne peut être déterminée. La société Redpath Deilmann ne peut pas s'exprimer dans ce cas - il est impossible de faire un pronostic fiable et de dire quelle sera la durée pendant laquelle l'intégrité du revêtement du puits sera conservée.

Dans ce cas il faut se baser sur la capacité portante calculée. Selon l'auteur du présent rapport, la stabilité théorique du cuvelage (=calculée) au delà de la profondeur d'environ 100m ne peut être acceptée que si le puits est remblayé dans les prochaines années. Il faudra s'assurer, que le cuvelage du puits est régulièrement contrôlé.

5 Effets possibles sur le cuvelage

Le cuvelage a été conçu en tant que le revêtement (presque) étanche du puits. Il devrait résister à la pression d'eau et des roches. Dans le pire des cas, une défaillance de ce revêtement pourrait faire venir de l'eau et des roches vers l'intérieur du puits. Dans le cas extrême, la vie humaine peut être mis en danger au jour comme au fond par des mouvements des terrains. Provoquant des effondrements rendant impossible l'accès au fond de la mine, et en particulier suite à l'effondrement des couches de sel et de potasse. Dans le cas de StocaMine, « un cas problématique » serait le cas où les eaux souterraines entre en contact avec les déchets.

Bien qu'il est presque impossible que tout le puits s'effondrent en un seul moment, on a noté de tels incidents dans le passé. Les deux cas les plus extrêmes sont mentionnés dans le [11]. Il s'agit des deux puits en Allemagne: « Franz Haniel II » et « Auguste Victoria III » qui se sont effondrés en 1925 et 1927.

Le puits Franz Haniel II s'est effondré après avoir enlevé les tuyaux du système de congélation - les panneaux avaient été remblayé avec de l'argile et non avec du béton. On suppose que le cuvelage a flambé et revêtement du puits a rompu. La profondeur prévue pour ce puits était de (458m) et n'avait été atteinte [11].

Le puis Auguste Victoria III a avait été foncé à sa profondeur finale de 820m. Le puits s'est effondré et presque toute l'installation est tombé dans une cheminé de diamètre de 120 cm. Dans ce cas, le cuvelage avait aussi été remblayé avec de l'argile et rigidifié avec deux anneaux en forme de cale. On suppose que, comme pour le puits FRANTZ HANIEL II, le cuvelage avait flambé avant de rompre.

Il faut préciser qu'il s'agissait de deux puits qui n'avait pas été mis en exploitation. L'auteur du présent document a pu échanger avec des salariés de Redpath Deilmann expérimentés ou déjà retraités. Suite à ces échanges nous pouvons constater, qu'aucun cas d'effondrement du cuvelage de puits existant n'est connu à la société Redpath Deilmann. Les exemples d'effondrement existent dans la littérature minière. Comme précisé dans

[12], aucun des 300 puits sécurisés par un cuvelage, et foncés dans la région de Ruhr en Allemagne (mines de charbon), ne s'est effondré.

Les cas de FRANZ HANIEL II et VICTOTIA III sont des cas très extrêmes et ne doivent pas être pris en compte pour le puits Joseph. Il faut d'abord noter, que le cuvelage du puits JOSEPH bien que très corrodé, n'est pas fissuré - ceci est un signe que le cuvelage est encore stable. De nombreux exemples existent dans la littérature minière [12] ainsi que comme l'expérience de la société Redpath Deilmann le montre, quelques fissures et autres petits endommagements du cuvelage ne mènent pas forcément à la perte totale de la capacité portante du cuvelage de puits. Cependant, dans le cas de StocaMine, la tolérance aux endommagements du cuvelage devrait être limitée. Il faudra alors continuer à contrôler régulièrement le revêtement du puits.

6 Conclusions et préconisations

6.1 Conclusions

Le revêtement du puits Joseph est visiblement en mauvais état. Cela concerne aussi bien le cuvelage que le revêtement en blocs de béton et le revêtement en béton coulé sur place. Les surfaces revêtues de cuvelage doivent normalement faire l'objet d'une attention particulière, car il s'agit en général des endroits soumis à la présence d'eaux souterraines, qu'il faut empêcher de pénétrer dans le puits, en particulier dans le cas des puits de potasse et de sel gemme. Ainsi, la présente étude se concentre sur le cuvelage.

Dans la première partie nous avons présenté les investigations qui ont été faites depuis mi-2022 et qui montrent l'état du puits - surtout l'état de sa partie cuvelée. Un des phénomènes constatés concerne l'état très avancé de corrosion du cuvelage en fonte, surtout sur la profondeur entre 70 et 125m de profondeur. Le contrôle à ultrason montre que l'épaisseur des panneaux du cuvelage n'est guère supérieur à 20mm.

Les résultats des calculs ayant servi à estimer la capacité portante du cuvelage, dans les conditions précisées dans le chapitre 1, sont les suivants:

- La zone située au-dessus de 60 m de profondeur peut être considérée comme non critique.

- Le niveau de sécurité généralement exigé dans l'industrie minière (Factor of Safety - FoS) n'est plus assuré à partir de 60 m de profondeur.
- Pour la profondeur au delà de 100m, il n'est plus possible de prouver la résistance du cuvelage à la rupture par des calculs mathématiques.

Il est évident, notamment parce qu'il n'y pas des fissures, que tout le cuvelage a gardé une capacité portante suffisante. Il faut savoir, que la capacité portante calculée peut être différente de la capacité portante réelle. Cependant, la réserve de la capacité portante, telle que présenté dans le chapitre 1 , ne peut pas être déterminée avec exactitude. La société Redpath Deilmann ne peut pas s'exprimer dans ce cas et il est impossible de faire un pronostic fiable et de dire quel est la durée au-delà de laquelle la capacité portante du revêtement de puits sera suffisant pour assurer l'intégrité du cuvelage.

Dans ce cas il faut faire l'analyse à partir de la capacité portante calculée. Selon l'auteur du présent rapport, la stabilité théorique du cuvelage (=calculée) au delà de la profondeur d'environ 100m ne peut être accepté que si le puits est remblayé dans les prochaines années (il est prévu encore 5 années d'exploitation dans le planning MDPA) . Il faut s'assurer que le cuvelage du puits sera régulièrement contrôlé.

6.2 Préconisation

6.2.1 Préconisation à court terme

Tout d'abord, le cuvelage du puits Joseph doit être contrôlé régulièrement, par exemple, il faudrait faire un contrôle visuel une fois par mois. Il faut se concentrer sur les recherches d'éventuelles fissures. Dans ce contexte, il faut enlever les amas lourds sur le cuvelage et veiller à ce que les nouvelles amas ne se cumulent plus.

Il serait judicieux de faire tous les ans une campagne de mesure du puits à l'aide d'un scan laser pour voir son évolution géométrique et détecter le cas échéant les éventuelles déformations du puits.

6.2.2 Préconisations à long terme

Le remblayage du puits doit intervenir au plus tard dans 5 ans compte-tenu de l'état du cuvelage. Si, avant cette date, des fissures apparaissent dans le revêtement ou si la convergence du puits est constatée, il faut obligatoirement entreprendre des travaux qui permettront de stabiliser le cuvelage. Une des solutions, qui a été appliquée avec succès

dans les mines de sel et de potasse en Allemagne est la pose d'un revêtement en acier sur le cuvelage existant. Ce revêtement en acier est généralement entièrement soudée, complètement étanche aux eaux souterraines et reprend la capacité portante du cuvelage du puits. Le revêtement en acier est placée devant la structure existante et les vides entre le nouveau et l'ancien cuvelage sont remplis avec du mortier. Le diamètre intérieur du puits est alors réduit. Le revêtement peut être également construite avec du béton. Néanmoins cette variante ne garantit généralement pas une étanchéité totale. De plus, l'épaisseur du revêtement en béton sera supérieure à l'épaisseur à l'épaisseur d'un revêtement en acier, ce qui a pour conséquence de réduire la section du puits.

Notre préconisation prévoit la mise en place d'une revêtement en acier, entièrement soudée.