

*ÉCOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS DES TRAVAUX DE LA
CONSTRUCTION*

Projet de fin d'études



Sujet : Etudier l'impact entre une palplanche simple et double.

Rédacteur :

GASSER Martin
Téléphone : +33 6 99 35 11 00
mgasser@eleve-esitc-metz.com

Tuteur de stage :

Raphaël MASSI
Chef de projet travaux spéciaux
Téléphone : + 41 44 874 28 24
raphael.massi@strabag.com

Entreprise d'accueil :

STRABAG AG
Unterrohrstrasse 5, 8952 Schlieren, Suisse
Téléphone : +41 44 874 26 00

Tuteur pédagogique :

Alexis GALMICHE
Téléphone : +352 661 300 407
alexis.galmiche@fondasol.lu

Dates de début et de fin de stage : 29.01.2024 au 26.07.2024

ITC5 TP – Année scolaire 2023/2024

Remerciements,

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Raphael Massi, tuteur de stage, ancien étudiant à l'ESITC de Metz (promotion 2015), occupant la fonction de responsable de département travaux spéciaux, qui a supervisé mon parcours. Il a également su être présent pour me guider et me conseiller.

Mes remerciements s'étendent également à M. Alexandre Carli, responsable travaux spéciaux Suisse romande, pour son leadership exemplaire et qui a su me confier des missions qui m'ont permis de consolider mes connaissances.

La contribution de M. Oleksandr Zimels, expert en statique et géotechnique, je lui suis reconnaissant pour le partage généreux de son expertise. Un merci particulier à M. Alexis Galmiche, mon tuteur pédagogique, pour ses conseils avisés. Enfin, je tiens à remercier Stefan Hohler, directeur de la filiale, Mme Edisa Softnic, assistante de direction, pour leurs accueils et leurs bienveillances durant mon stage.

Je remercie l'entreprise STRABAG de m'avoir accueilli durant ces 6 mois ainsi que l'ensemble des collaborateurs pour l'accueil et l'intégration qu'ils m'ont offerts. Leurs soutiens m'ont également beaucoup apporté et m'ont conforté dans mon projet professionnel.

Je désire finalement remercier l'ESITC de Metz, pour son soutien administratif et moral. Je suis profondément reconnaissant pour les cinq années d'études enrichissantes et formatrices que j'ai pu y passer. Ces années m'ont non seulement permis d'acquérir des compétences techniques solides, mais m'ont aussi offert des opportunités de développement personnel et professionnel.

1.	Introduction	5
2.	Présentation de l'entreprise.....	6
2.1.	Présentation de STRABAG SE.....	6
2.2.	Présentation de STRABAG AG Suisse et de sa filiale travaux spéciaux suisse.....	7
2.3.	Organigrammes de l'entreprise	8
2.4.	Organigrammes du chantier	9
3.	Présentation des missions confiées	10
3.1.	Paroi berlinoise, Genève	10
3.2.	Ancre, Russin	12
3.3.	Pieux D800, Yverdon	13
3.4.	Palplanche et parois clouées, Palézieux	14
3.5.	Autres tâches communes et diverses.....	15
4.	Les enjeux de mon projet de fin d'études	17
5.	Principes de base sur les palplanches.....	18
5.1.	Histoire et champ d'application	18
5.2.	Les types	19
5.3.	Normes.....	21
5.4.	Mise en œuvre.....	22
5.5.	Etalement du rideau de palplanche.....	24
6.	Les différences entre palplanches simples et doubles	26
6.1.	Les palplanches simples et doubles.....	26
6.2.	Avantages des palplanches simples.....	27
7.	Deux chantiers de référence réalisés par Strabag.....	29
7.1.	Travaux de soutènement voie ferroviaire : Vallée de la Limmat	29
7.2.	Etude des valeurs mesurées sur un chantier type : Oberwil-Lieli.....	31
7.3.	Conclusion sur les valeurs réelles	34
8.	Dimensionnement et modélisations sur les logiciels de calculs.....	35
8.1.	Explication de la méthodologie.....	35
8.2.	Dimensionnement des palplanches	36
8.3.	Modélisation des palplanches sur RFEM6.....	40
9.	Synthèse des résultats pour comparaison.....	47
10.	Ouverture : Les limites de l'étude.....	49
11.	Conclusion	51
	ANNEXES	52

Lexique

- Contre-maître : Celui qui est responsable d'une équipe d'ouvriers, en France c'est le chef de chantier.
- BFS Spetzaltiefbau : Bauführer Sitzung Spetzaltiefbau c'est la séance bimensuelle pour les conducteurs de travaux.
- Spetzaltiefbau : Travaux Spéciaux en français.
- Séance : Mot utilisé pour faire référence à une réunion en Suisse.
- Ingénieur : C'est l'équivalent du bureau d'étude en Suisse.
- SIA : Les normes SIA, de la Société des Ingénieurs et des Architectes, traitent des conditions générales de l'exécution des travaux de construction en Suisse. Largement reconnues et utilisées, elles complètent le régime juridique et elles précisent les exigences techniques à prendre en compte.
- Serrure : Dispositif utilisé pour assembler et interconnecter les palplanches, assurant ainsi une paroi continue et étanche dans les travaux de construction.
- Lierne : C'est une poutre horizontale utilisée pour stabiliser et maintenir les palplanches en place, assurant ainsi la rigidité et la résistance de la structure.
- R01 : Nomination des cibles permettant de mesurer les déformations en X, Y, Z.
- S275 : S275 est une désignation de qualité d'acier selon la norme européenne, indiquant un acier avec une limite élastique minimale de 275 MPa
- HEB : C'est une désignation pour un type de profilé en acier laminé à chaud, conforme à la norme européenne. Elles sont aussi appelées poutres larges et ont une section en forme de H avec des ailes larges et épaisse.

1. Introduction

Au cours du semestre 10 de ma formation d'ingénieur à l'ESITC Metz, j'ai eu l'opportunité exceptionnelle de réaliser un stage de six mois, une étape cruciale dans le processus de préparation à l'entrée dans le monde professionnel. Ce stage, débuté le 29 janvier et clôturé le 26 juillet 2024, s'est déroulé au sein de la filiale Travaux Spéciaux de l'entreprise STRABAG AG, une référence majeure dans le domaine de la construction, opérant tant dans la partie Romande que dans la partie Allemande, avec des déplacements fréquents entre Lausanne et Zurich.

L'une des particularités de ce stage a résidé dans la diversité linguistique des régions que j'ai eu le privilège de couvrir. En effet, la cohabitation des langues allemandes et françaises au sein des équipes m'a exposé à des défis linguistiques enrichissants et une intégration au sein des équipes.

Cette expérience a une importance significative dans ma formation, m'offrant une immersion concrète dans le monde professionnel et consolidant mes connaissances acquises à l'ESITC Metz. Le stage de six mois a constitué une véritable passerelle entre le monde académique et le milieu professionnel, me permettant d'appliquer mes compétences théoriques à des projets concrets.

Le choix de ce stage chez STRABAG AG a été guidé par ma passion pour les travaux spéciaux. La décision de m'immerger dans un environnement professionnel suisse a été motivée par le désir de découvrir une nouvelle culture, d'autres réglementations et des projets hors-normes.

Dans les sections suivantes de ce rapport, je détaillerai l'entreprise STRABAG AG, les missions qui m'ont été confiées au cours de ce stage, et enfin, je présenterai mon projet de fin d'études axé sur les palplanches. Cette expérience significative a non seulement renforcé mes compétences techniques et interpersonnelles, mais elle a également constitué une étape cruciale dans ma préparation à l'entrée dans le monde du travail en tant qu'ingénieur.

2. Présentation de l'entreprise

2.1. Présentation de STRABAG SE

Fondée en Autriche en 1928, STRABAG SE s'impose aujourd'hui comme un acteur majeur du secteur de la construction en Europe. Siégeant à Vienne, l'entreprise déploie ses activités dans 75 pays à travers le monde, comptant quelque 79 000 employés. Spécialisée dans la planification et la réalisation de projets divers, allant du génie civil aux ouvrages d'art, en passant par les routes, les bâtiments et les tunnels, STRABAG SE a acquis en 2004 le statut de « Societas Europaea » (SE). Ce statut lui permet d'opérer dans chaque pays de l'Union européenne, adoptant une forme juridique reconnue par tous les États membres.

En 2023, l'entreprise a généré un chiffre d'affaires, atteignant environ 18 milliards d'euros. Cette performance la place au cinquième rang des entreprises européennes du secteur, juste derrière des géants tels que Vinci, ACS (Espagne), Bouygues et Eiffage. Notamment, près de la moitié de son chiffre d'affaires, soit environ 46%, provient du marché allemand, où STRABAG SE opère principalement sous le nom de Züblin AG, une société acquise en 2006.

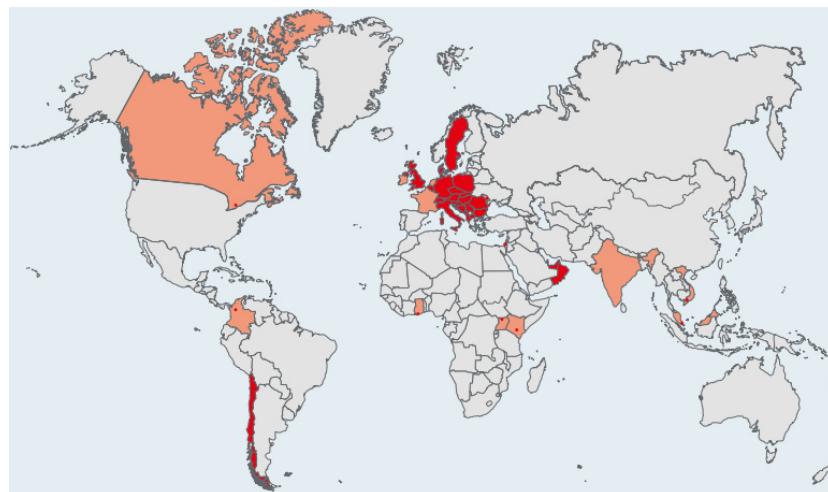


Figure 1 : Implantations (couleur rouge) et projets (orange) de STRABAG SE à travers le monde

Depuis 1986, elle figure au sein de l'indice « Austrian Traded Index » (ATX), équivalent du CAC 40 en France, et rend compte de ses performances financières de manière trimestrielle. Cette pratique témoigne de son engagement envers la transparence et la rigueur dans la gestion de ses résultats. Une caractéristique notable réside dans le fait que la direction de chaque division, y compris celle de la Suisse et ses sous-divisions est assurée par un ingénieur et un commercial. Cette structure reflétant son implication à l'échelle mondiale et ses résultats financiers exceptionnellement positifs, atteste de l'efficacité organisationnelle de STRABAG SE.

2.2. Présentation de STRABAG AG Suisse et de sa filiale travaux spéciaux suisse

L'établissement de STRABAG en Suisse remonte à 1995, une initiative concrétisée à la suite de l'acquisition de diverses entreprises locales. Son siège est localisé à Schlieren, dans le canton de Zürich, et elle a étendu ses activités à 21 emplacements distincts à travers toute la Suisse alémanique. Comptant 800 employés, STRABAG AG s'illustre dans la construction d'infrastructures variées, couvrant les secteurs du bâtiment, des ouvrages d'art, des travaux publics, des travaux spéciaux, des tunnels et des infrastructures routières. Son action prédominante se situe en Suisse alémanique, tout en élargissant son influence en Suisse romande avec l'ouverture d'un nouveau siège secondaire à Lausanne.

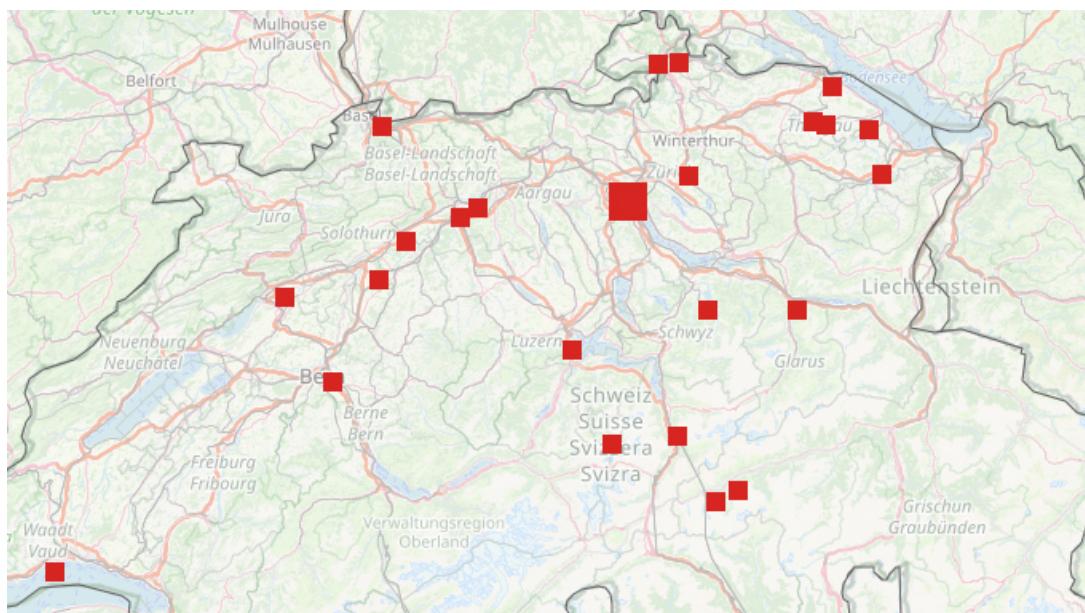


Figure 2: Toutes les implantations de STRABAG AG en Suisse

La division travaux spéciaux, au sein de laquelle j'ai effectué mon stage, est établie à Schlieren et compte environ cinquante employés, dont vingt œuvrent au sein des bureaux. Ses activités se répartissent entre les départements dédiés à l'épuisement des eaux, aux rideaux palplanches, aux petits et grands forages. Le secteur des grands forages englobe les travaux de pieux, pieux sécants et de parois berlinoises. Dans le domaine des petits forages, est inclus la mise en œuvre de micropieux, ainsi que l'installation de clous et de tirants d'ancrages pour des parois de soutènements. Le secteur des rideaux palplanches s'occupe également des étalements, tandis que celui de l'épuisement des eaux englobe toutes les techniques de pompage et d'évacuation d'eau sur le chantier.

La direction de cette filiale est conjointement assurée par M. Stefan Hohler, directeur technique, et M. Mike Albinus, directeur commercial. En 2023, la filiale a enregistré un chiffre d'affaires de 21 millions de francs suisses.

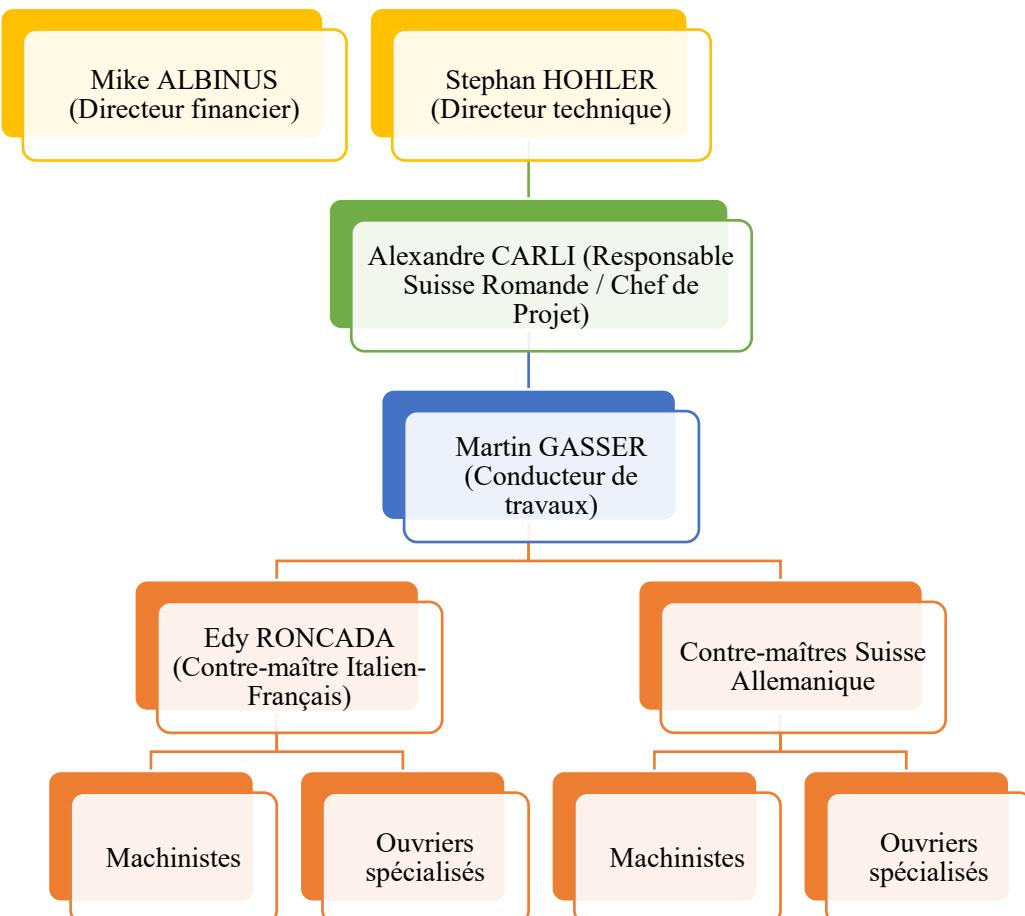
2.3. Organigrammes de l'entreprise

Voir **annexe 1** : Organigramme de la filiale travaux spéciaux suisse de STRABAG AG

Outre les secteurs dédiés à l'épuisement des eaux, aux palplanches, aux petits et grands forages, la filiale intègre des départements dédiés aux calculs, aux acquisitions, à la sécurité, au service commercial et aux entrepôts. Le département des acquisitions se charge de la recherche de projets et de clients, celui de la sécurité assure la communication et la prévention auprès des employés internes. Le département "calculs" répond aux appels d'offres et évalue les coûts des projets, tandis que le service commercial gère les finances de la filiale et des projets de construction.

Une réunion appelée « BFS Spetzialtiefbau » réunie l'ensemble des employés du bureau toutes les deux semaines, favorisant une communication fluide et permettant à chacun de rester informé de l'activité générale de la filiale. Lors de ces réunions, sont communiqués des éléments tels que les nouveaux marchés de travaux, les problématiques rencontrées sur certains chantiers ou à l'entrepôt. Cette initiative renforce la cohésion au sein de l'entreprise et assure une gestion transparente des différents aspects de l'activité de la filiale.

2.4. Organigrammes du chantier



Ci-dessus, est représenté l'organigramme type pour chaque chantier dont j'ai pu être confronté. Mon responsable, Alexandre CARLI, est le chef de projet pour chaque chantier en Suisse romande. Il a travaillé sur chaque chiffrage, planification et gestion. Pour la conduite de travaux, Alexandre m'a fait entièrement confiance sur chaque projet. Et pour finir, mon équipe travaux varie jusqu'à cinq personnes maximums suivant les chantiers. Cet organigramme représente uniquement la branche travaux en Suisse Romande, il ne fait pas figurer le pôle étude, dépôt, ...

3. Présentation des missions confiées

Durant les cinq mois de mon stage, j'ai été amené à accomplir des missions qui n'étaient pas directement en lien avec mon étude PFE, en raison de l'absence de projets de palplanches actifs. Le seul chantier de palplanche prévu ne démarra qu'à la fin du mois de juin et était en phase de préparation durant mai et juin. Pendant ce temps, j'ai assumé les responsabilités d'un conducteur de travaux pour l'ensemble des opérations en Suisse Romande. Mon responsable, Alexandre Carli, chef de projet, m'a assisté et conseillé, se concentrant principalement sur les interactions avec les clients et le suivi financier. J'ai eu l'opportunité de travailler sur divers chantiers, me permettant ainsi de réaliser un large éventail de tâches pratiques et techniques. Je vais détailler ces chantiers dans les sections suivantes.

3.1. Paroi berlinoise, Genève

J'ai eu l'opportunité de participer à un chantier de parois berlinoises, situé Rue du Colombier, en plein cœur de Genève. Ce projet, d'une valeur approximative de 300 000 CHF, a été réalisé par Strabag en tant que sous-traitant de l'entreprise Cuénod. Notre mission principale consistait à forer 80 pieux d'un diamètre de 400 mm (D400), destinés à accueillir des profilés HEB320 bétonnés en ensuite soutenue par de l'étalement.

Le chantier est divisé en deux phases distinctes, adaptées aux exigences de phasage pour la réalisation du futur bâtiment. Cette segmentation était cruciale pour coordonner les différentes étapes de construction tout en minimisant les interruptions et les interférences avec les opérations urbaines environnantes. En conséquence, les travaux se sont étalés sur presque 4 mois, incluant les périodes d'attente et les jours non travaillés, notamment pendant les étapes de terrassement. Initialement, il était prévu de recouvrir l'espace entre les profilés avec de la gunite. Cependant, l'entreprise a finalement opté pour l'installation de parois préfabriquées en béton, ce qui a permis de gagner du temps sur le chantier tout en assurant une bonne finition. En plus de ces travaux, notre équipe a été responsable de la réalisation complète de l'étalement. Cette étape impliquait l'installation de liernes et de bêquilles, utilisant environ 40 tonnes d'acier pour soutenir et sécuriser la structure durant les travaux. L'étalement est essentiel pour garantir la stabilité des parois berlinoises jusqu'à l'achèvement des opérations de construction du bâtiment futur.

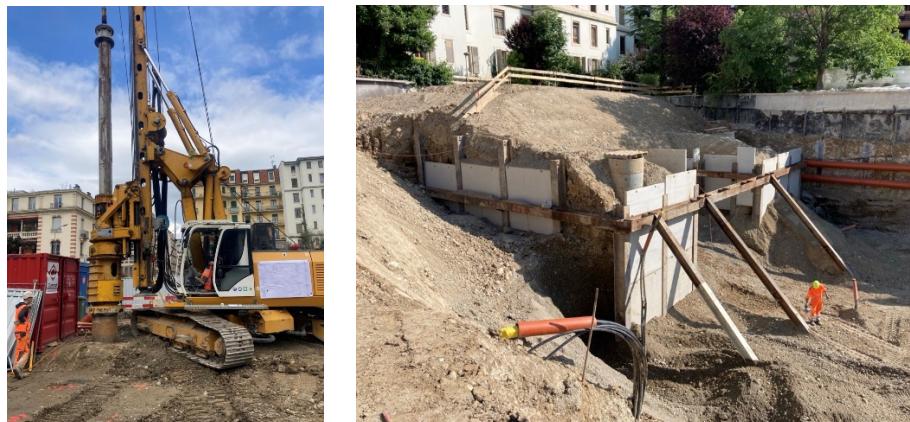


Figure 3 Parois berlinoise : démarage - fin

Durant ce chantier, j'ai pris en charge l'ensemble des aspects opérationnels, depuis la préparation initiale jusqu'à l'exécution finale des travaux. Mon rôle a débuté avec la phase de préparation du chantier, qui incluait la commande de tous les matériaux nécessaires. J'ai également réalisé des états des lieux pour assurer que tout était en ordre avant le début des travaux.

J'ai ensuite assuré le suivi quotidien du chantier, participant aux réunions de chantier avec les autres parties prenantes pour discuter du planning et résoudre les problèmes éventuels. Mon rôle impliquait aussi la gestion financière, avec la facturation mensuelle et le traitement des avenants pour ajuster le budget en fonction des travaux supplémentaires, comme la reprise en sous-œuvre. L'organisation des transports de matériaux et des machines, ainsi que la gestion de toute la phase des travaux sur l'étalement, faisaient également partie de mes responsabilités. Pour optimiser le chantier, nous avions proposé des variantes techniques, telles que l'utilisation d'une foreuse alternative capable d'opérer dans des zones restreintes.

Parmi les défis rencontrés, la barrière linguistique avec l'équipe de foreurs de Suisse alémanique qui m'a demandé une préparation méticuleuse et une communication claire. Un autre problème significatif a été une mauvaise implantation des pieux par le géomètre, qui nous a contraints à refaire certains pieux. De plus, l'arase de terrassement était bien trop haute, compliquant ainsi l'installation des profilés à -3 mètres de profondeur. Il y a aussi eu les difficultés de coordination avec la coactivité sur site entre les différentes entreprises : géothermie et de la pose d'assainissement. Pour la phase d'étalement, j'ai dû m'assurer que nous disposions d'une quantité suffisante d'acier et gérer le désaiment de matériel provenant d'autres chantiers pour alimenter celui-ci. À une période critique, nous avons fait face à un manque de personnel qualifié, ce qui nous a obligés à faire appel à des soudeurs externes pour maintenir le rythme des travaux.

3.2. Ancre, Russin

Pour le chantier d'ancrage situé à Russin, nous avons travaillé en tant que sous-traitant pour l'entreprise Cuénod, offrant nos services pour un montant forfaitaire de 70 000 CHF. Ce projet impliquait la réalisation de 22 ancrages actifs, chacun d'une profondeur de 15 mètres et incliné à 15 degrés, reprenant les charges sur une filière constituée de deux profilés UPN220.

Initialement, les ingénieurs prévoyaient l'utilisation de forages tubés avec réinjections pour faire les ancrages. Cependant, des problèmes imprévus sont rapidement apparus : les premiers forages au niveau supérieur n'ont pas maintenu leur position lors de la mise sous tension, malgré les nombreuses réinjections effectuées. De plus, certaines de ces réinjections ont eu pour conséquence inattendue de remplir la cave du voisin, compliquant davantage la situation.



Figure 4 Chantier d'ancrage : démarrage- fin

Face à ces défis, nous avons dû adapter notre approche et opter pour l'utilisation d'ancrages autoforants pour les niveaux inférieurs et les ancrages supplémentaires. Ces autoforants étaient réalisés avec des barres GEWI, une solution que nous avions initialement proposée, mais qui avait été rejetée par les ingénieurs en charge du projet. Compte tenu des circonstances, des avenants ont été nécessaires pour couvrir les travaux supplémentaires et les transports des différentes foreuses.

En tant que responsable de ce chantier, j'ai supervisé l'ensemble des opérations, y compris la coordination des réunions de chantier, l'approvisionnement en matériaux et le suivi financier du projet. Ce chantier à Russin a mis en évidence l'importance de la flexibilité et de la capacité d'adaptation face à des conditions de terrain imprévues.

3.3. Pieux D800, Yverdon

Le chantier situé à proximité d'Yverdon, le long de l'autoroute et en bordure d'un pont, représente un défi majeur en termes de complexité technique et de sécurité. Avec un budget total de 412 000 CHF, les travaux incluent la réalisation de 27 pieux de diamètre D800, 20 pieux D400, des travaux de gunite et l'installation de 40 ancrages. Ce projet vise à stabiliser un glissement de terrain en cours, menaçant la sécurité de l'autoroute.



Figure 5 Chantier forage pieux D800

En tant que sous-traitants de l'entreprise Bernasconi, nous avons dû naviguer dans un environnement de chantier particulièrement exigeant, marqué par la proximité immédiate de la circulation et les risques associés aux forages sur le bord d'un énorme talus et près d'un pont. Initialement, les forages devaient être effectués au-dessus de la glissière de sécurité de l'autoroute avec une foreuse LB28. Cependant, cette approche s'est révélée impraticable. Nous avons donc déployé une foreuse BG24, plus légère, pour travailler à la limite du talus.

Les difficultés ne se sont pas arrêtées là. Certains pieux D800 étaient impossibles à forer en raison de leur éloignement du pont ou de la complexité excessive du tubage entre le niveau de la plateforme et celui de la foreuse. Pour surmonter ce problème, les ingénieurs ont modifier l'implantation et ils les ont remplacés par de multiples pieux en D400.

Ce chantier est également placé sous la juridiction de l'Office Fédéral des Routes (OFROU), une autorité très exigeante en matière de précision, exigence de mise en oeuvre et de sécurité. La gestion de ce projet nécessite une attention constante pour respecter les strictes normes de sécurité et de précision imposées par l'OFROU.

Mon rôle a été de superviser l'organisation et le suivi des opérations sur le chantier, assurant une coordination fluide. À ce jour, nous avons uniquement complété la phase de forage des pieux de D800.

3.4. Palplanche et parois clouées, Palézieux

Le chantier de Palézieux, situé à proximité d'une voie ferroviaire gérée par les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF), présente des défis uniques en raison de son environnement complexe. Nous intervenons en tant que sous-traitants pour l'entreprise Bernasconi, avec pour objectif principal de stabiliser un glissement de terrain menaçant la zone. Le site est divisé en deux zones distinctes, de part et d'autre des rails, situées sur un talus escarpé traversé par un tunnel accueillant une rivière. Ces particularités confèrent au chantier plusieurs dimensions de complexité, incluant la proximité immédiate de la voie ferroviaire, la gestion d'un environnement protégé, et les travaux en zone pentue.



Les travaux, d'une valeur totale de 450 000 CHF, englobent la réalisation de forages pour l'installation d'instruments de mesure, la construction de quatre puits de palplanches de 18 mètres de profondeur avec étayage et application de gunite, ainsi que la création de deux immenses parois clouées pour stabiliser les versants du talus. Jusqu'à présent, nous avons complété les forages pour les dispositifs de mesure, incluant des piézomètres, des inclinomètres, un inkrex et des ancrages d'essai.

Figure 6 Chantier petit forage : forage d'un piézomètre

Pour naviguer dans ce terrain difficile, nous avons dû faire appel à une pelle araignée équipée d'un dispositif de forage, adaptée aux conditions extrêmes du site. Cette machine spécialisée nous a permis de travailler efficacement sur les pentes abruptes et dans les zones où l'accès est limité.

Actuellement, je suis responsable de toute la préparation du chantier pour les travaux à venir, ce qui inclut l'organisation logistique et l'approvisionnement en matériel. Cette tâche est particulièrement complexe en raison des exigences strictes en matière de sécurité autour de la voie ferroviaire et de la nécessité de minimiser notre impact sur l'environnement protégé. Je supervise également le suivi des travaux en cours, en veillant à ce que toutes les étapes soient menées à bien de manière coordonnée et efficace.

3.5. Autres tâches communes et diverses

3.5.1. Tâches communes à tous les chantiers

En tant que responsable de chantier, j'ai eu des tâches communes à réaliser sur chaque chantier. L'une de mes principales missions était le suivi rigoureux des rapports de forage et des rapports journaliers. Ces documents étaient essentiels pour analyser la géologie du site et pour maintenir un historique précis de l'évolution des travaux.

Je devais également assurer le suivi des heures de travail des équipes sur chaque projet. Cela impliquait la vérification minutieuse des heures fines du mois, garantissant ainsi la précision de la gestion du temps et des coûts associés à la main-d'œuvre.

En parallèle, je réalisais régulièrement des demandes d'offres de prix auprès des fournisseurs. Cette activité me permettait de comparer les propositions et de négocier pour obtenir les meilleurs prix possibles pour les matériaux et les services requis, optimisant ainsi le budget de chaque chantier.

Mon rôle comprenait également la gestion de l'ensemble des aspects administratifs des chantiers, tant en interne chez Strabag qu'en externe avec nos partenaires et sous-traitants. J'étais responsable de la préparation et de la gestion de tous les documents administratifs nécessaires, incluant les facturations, les avenants et les rapports de suivi.

Enfin, j'avais en charge la gestion des documents de sécurité spécifiques à chaque projet. Je veillais à ce que toutes les procédures et normes de sécurité soient strictement respectées, assurant ainsi un environnement de travail sûr.

3.5.2. Tâches diverses

J'ai été impliqué dans une variété de tâches diversifiées qui ont enrichi mon expérience et m'ont permis d'acquérir une vision globale de la gestion de chantier. Un exemple marquant est mon implication sur un chantier de nuit à Turtmann, dans le Valais. Bien que le chantier, d'un montant de 800 000 CHF en sous-traitance pour Prader Losinger, ait été principalement géré par un autre conducteur de travaux, j'ai eu l'opportunité de suivre de près son déroulement et de contribuer par la commande de matériaux et le suivi des opérations. Ce projet comprenait des travaux de parois berlinoises, d'ancrages, de micropieux et de pieux de D1200.

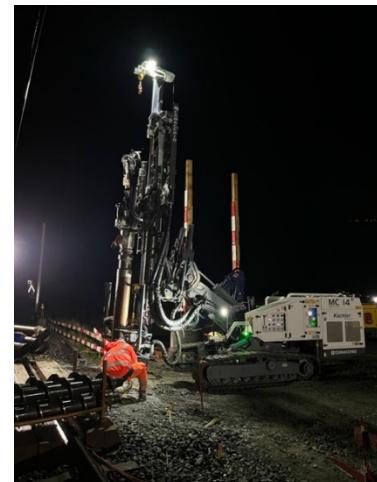


Figure 7 Chantier de nuit à Turtmann - micropieux

En parallèle, j'ai géré la phase de désaffectation sur divers chantiers achevés, ce qui impliquait le démontage et l'évacuation du matériel et des équipements pour les ramener au dépôt ou les redéployer sur d'autres projets en cours.

Concernant les nouveaux projets, j'ai été responsable de la préparation de chantiers futurs tels que celui de Palézieux et notre nouveau chantier à Porrentruy dans le Jura, qui prévoit la réalisation de 40 micropieux.

En outre, avec l'ouverture récente de la nouvelle filiale en Suisse romande, il y a un an, j'ai eu diverses missions liées à l'inventaire du matériel. J'ai réalisé un inventaire complet, aussi bien sur les chantiers déjà réalisés qu'au dépôt, ce qui était essentiel pour maintenir une gestion efficace de nos équipements et fournitures.

Une autre de mes responsabilités a été la réalisation de métrés en phase d'appels d'offres. Cette tâche est cruciale pour ajuster les prix en fonction des quantités réelles et pour élaborer des stratégies de réponse concurrentielles. En effectuant ces métrés, j'ai contribué à identifier des erreurs ou des oubliés de quantités sur les plans, ce qui peut potentiellement augmenter la rentabilité du projet en phase de réalisation.

4. Les enjeux de mon projet de fin d'études

Dans le cadre de mon stage chez STRABAG Travaux Spéciaux en Suisse, j'ai pu comprendre que de nombreux MOA exigeaient souvent des palplanches doubles dans les appels d'offres, mais elles sont en réalité rarement utilisées dans la pratique pour plusieurs raisons (voir § 6.1. Avantages des palplanches simples) et qu'elles n'étaient pas nécessaire du point de vue statique.

D'où est née l'étude entre des palplanches simples et des doubles. Il s'agit de porter une réflexion sur l'équivalence entre les deux systèmes selon chaque phase du chantier. En effet, selon l'expérience de STRABAG, les palplanches simples avec lierne sont équivalentes statiquement aux palplanches doubles avec lierne.

L'utilisation de palplanches simples présente des avantages notables par rapport à celles doubles, notamment en termes de coûts, de facilité d'installation et de flexibilité dans la conception des structures de soutènement. En privilégiant les palplanches simples, l'entreprise peut potentiellement réaliser des économies significatives tout en garantissant une efficacité équivalente.

Cette étude se concentre sur la mise en place de rideaux de palplanche auto stable en profil en U avec lierne. Le soutènement servira uniquement de protection temporaire sur de grandes excavations.

Le but est de prouver que l'utilisation d'une lierne soudée sur un rideau de palplanches simple permet de faire fonctionner ceux-ci comme un rideau de palplanche double avec lierne. En effet, le lierne va empêcher le pianotement du rideau. Donc les mesures de déformations devraient être les mêmes.

La démonstration officielle de cette étude permettrait à STRABAG de remporter énormément d'appels d'offres en proposant des variantes de palplanches simples. En effet, de par son ancienneté dans son domaine, STRABAG possède le plus grand stock en Suisse, de 43 000 m² de palplanches simples et doubles. Contrairement à la concurrence possédant essentiellement des palplanches doubles et en plus petites quantités.

De plus, STRABAG investit dans ce sujet, car l'acier a de l'avenir. Les palplanches sont des outils qui ne seront pas remplacées contrairement au béton. En effet, l'acier a un fort impact carbone lors de sa fabrication, mais il diminuera fortement avec sa capacité de réutilisation. De plus, l'acier a un réel prix de revente (750 CHF/To).

Aucune étude n'a été réalisée ou du moins publiée sur ce sujet en Suisse. La grande difficulté est de pouvoir modéliser un rideau de palplanches simple et double en 3D et d'appliquer les contraintes de l'environnement réelles (pressions des terres, appuis, soudures, liernes, ...). A l'heure actuelle, aucun logiciel géotechnique n'est capable de réaliser conformément cette comparaison.

5. Principes de base sur les palplanches

Cette partie aborde les bases nécessaires à la réalisation d'un rideau de palplanches afin de bien comprendre l'étude.

5.1. Histoire et champ d'application

D'après les découvertes archéologiques, les Romains utilisaient déjà des types de palplanches pour sécuriser leurs fouilles. La plus ancienne date de 169 avant J-C, retrouvé dans une fouille à Trèves près de la porte de Nigra sous la forme de deux planches et un pieu en bois.

Les palplanches en acier d'aujourd'hui ont été utilisées pour la première fois au début des années 1900. Les profilés rivetés en U ont été fabriqués en 1902 jusqu'en 1914. En effet, à l'époque, il n'était pas possible techniquement de laminer les serrures avec le profilé d'une seule pièce, c'est pourquoi la serrure était rivetée. Après la Première Guerre mondiale, Hoesch AG a déposé un brevet pour le système de laminage en Z et a commencé la production en 1928.

Les palplanches sont utilisées comme des éléments de construction temporaires ou permanents. Elles sont utilisées dans diverses conceptions (construction hydraulique, soutènement et construction portuaire). Dans le génie civil, celles-ci sont souvent utilisées comme murs de soutènement temporaires pour la réalisation d'un ouvrage, puis retirées. Dans certains cas, il est possible que les profilés soient coupés et restent dans le sol.



Figure 8 Exemple d'une fouille en palplanche

L'avantage d'un rideau de palplanche comme mur de soutènement est la possibilité de réaliser des zones d'excavations étroites, sans perdre de la surface de terrain contrairement au talus. Dans les zones où les prix des terrains est élevé, il est préférable d'investir dans un rideau de palplanche plutôt que d'acquérir un terrain aux abords et faire des talus.

5.2. Les types

Les palplanches peuvent être fabriquées à froid ou à chaud. Elles sont généralement laminées à chaud, car cela permet des fabrications avec des géométries plus complexes et moins coûteuse. Le profilé et la serrure sont laminés d'une seule pièce et la limite de longueur correspondra au transport ou au banc de laminage.

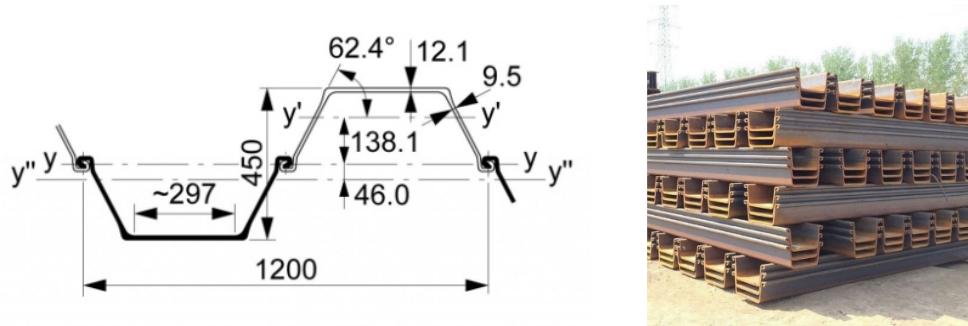
Les longueurs les plus courantes sont comprises entre 6 et 15 mètres. Pour pouvoir transmettre des forces de cisaillement conformément à la norme, deux palplanches simples doivent être assemblées par adhérence pour former une palplanche double. La solution la plus économique pour les assembler est de les presser en usine. Il est toutefois possible de les souder sur chantier.

Les palplanches peuvent être équipées en usine d'une protection contre la corrosion. Mais cette protection n'est pas pertinente pour les palplanches utilisées comme blindage temporaire. Elles deviennent plus rapidement inutilisables en raison de leur réutilisation répétée (rupture, déformations excessives, ...) que du manque d'épaisseur du matériau dû à la corrosion.

5.2.1. Profilés en U

Les profilés en U correspondent à la forme de base telle que développé par Larssen dans les années 1900. La largeur courante d'une planche est de 600 mm. La hauteur et l'épaisseur de la paroi dépendent du profil ou des exigences statiques.

Le plus grand fabricant de palplanches, ArcelorMittal, et appelle ses profilés en U des palplanches PU. La géométrie a été quelque peu modifiée afin d'optimiser le poids et les résistances. A titre d'exemple, ci-dessous la comparaison entre le PU 22 et le Larssen 605k :

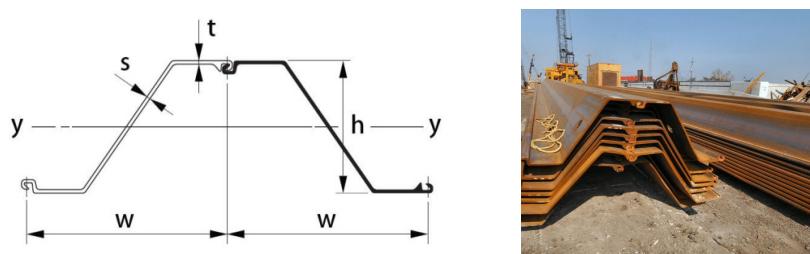


Fabricants	Poids (kg/m)	Moment d'Inertie y (cm ⁴ /m)	Module de flexion élastique (cm ³ /m)	Moment statique (cm ³ /m)	Moment de résistance plastique (cm ³ /m)
PU 22	144	49460	2200	1275	2580
Larsen 605k	144.5	42630	2030	1193	2386
Différence	-0.35%	+16.02%	+8.37%	+6.87%	+8.13%

Le poids des profilés est presque identique, voire légèrement inférieur pour le profilé PU 22. Les valeurs statiques sont jusqu'à environ 16% meilleures. Les profilés en U existent dans de nombreuses dimensions différentes, ce qui permet de choisir un profilé approprié en fonction des exigences statiques.

5.2.2. Profilés en Z

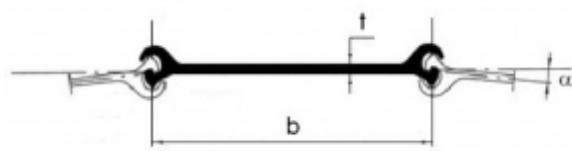
Les palplanches de type Z sont plus larges et ont une plus grande profondeur, ce qui entraînerait des valeurs plus élevées pour le moment d'inertie, et le module de section par conséquent. De grandes capacités de moment de flexion sont généralement observées pour les palplanches de type Z, et il est préférable de les installer là où les conditions du site sont assez difficiles ou défavorables.



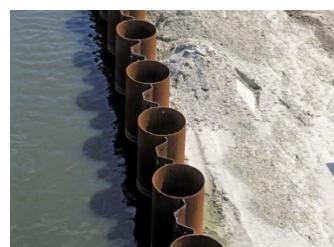
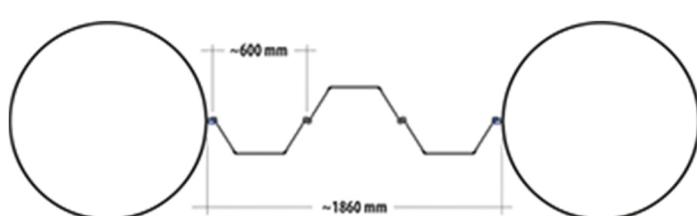
5.2.3. Profilés pour ouvrage durable

Les palplanches peuvent aussi être utilisées pour des ouvrages permanents. On utilisera davantage des palplanches plates et des rideaux combinés. En raison de la mise en œuvre et des coûts plus élevés, ce type de palplanches ne convient pas pour les travaux temporaires d'excavations.

Les profilés plats conviennent aux objets pour lesquels un ancrage n'est pas possible, comme lors de fouilles circulaires. Ainsi, les profilés principalement sollicités par des forces de traction horizontales, c'est pourquoi une condition importante est ici que la serrure peut absorber les forces provenant de l'âme. Les plaques de palplanches peuvent tourner jusqu'à 4 à 12 degrés.



Les rideaux combinés sont réalisés à partir de deux éléments distincts qui se combinent facilement pour l'exécution d'écrans avec une résistance à la flexion importante : un élément principal et un élément secondaire. Cela peut être une combinaison de poutrelles/ palplanches ou caissons / palplanches ou pieux tubulaires / palplanches.



5.3. Normes

Pour le dimensionnement des palplanches, on utilise en France l'Eurocode 7 et en Suisse la norme SIA 263.019. Les deux normes sont normées Eurocode 3 sans annexes nationales, car la mise en œuvre correspond aux conditions suisses. En Suisse, le dimensionnement est effectué selon la norme géotechnique SIA 267.

5.4. Mise en œuvre

Il existe seulement trois méthodes de mise en place des palplanches. Le choix de la méthode dépend des conditions du sol et de l'environnement.

5.4.1. Battage



Le principe de battage des palplanches dans le sol à l'aide d'un outil : le marteau, est le plus simple. Une masse est soulevée et vient ensuite frapper une plaque de frappe. Cet impact enfonce la palplanche dans le sol, pièce par pièce.

Parmi les marteaux, on peut retrouver deux types. Les marteaux simples (par exemple : les marteaux à chute libre) et les marteaux à air comprimé (par exemple avec un cylindre pneumatique). Cet outil est très efficace dans les terrains durs.

L'inconvénient du battage dans le sol est son impact sur l'environnement. Celui-ci génère beaucoup de bruit et surtout de fortes vibrations dans le sol qui peuvent endommager les ouvrages adjacents, c'est pourquoi cette méthode n'est pas adaptée, notamment dans les zones urbaines. Il peut aussi provoquer des déchirures sur les palplanches.

Figure 9 Outils utilisé pour le battage : le marteau

5.4.2. Vibro-fonçage

La méthode la plus connue pour mettre en place des palplanches est la vibro-fonçage. Le vibreur est équipé d'une pince qui bloque la palplanche. Les vibrations du vibreur sont transmises au sol, ce qui réduit sa friction avec celui-ci et la force centrifuge permet de surmonter la résistance à la pointe de la palplanche.

Sur les vibrateurs modernes, il est possible de régler la vitesse de vibration et la pression afin de l'adapter aux conditions du sol. Il existe de nombreux types d'outils pour vibrer (vibreur haute fréquence, vibreur sur pelle, pendulaire).



Figure 10 Le vibro-fonçage

L'impact sur l'environnement est ainsi minimisé par l'utilisation efficace de la vibration. Il provoque moins de nuisance sonore que le battage. De plus, l'avancement des travaux est plus rapide (cadence de 100 à 150 m²/jour). Cet outil peut aussi servir pour retirer les palplanches.

5.4.3. Presse hydraulique

Comme le vibro-fonçage et le battage génèrent des vibrations dans le sol et le compactent, des dommages peuvent être causés aux ouvrages voisins. Ceux-ci peuvent certes être minimisés grâce au système de presse hydraulique, avec la possibilité de réglage en continu.



Figure 11 La presse hydraulique

Le pressage consiste à enfoncer des palplanches dans le sol à l'aide de vérins hydrauliques, ce qui ne fait pas de bruit, ni de vibrations. L'inconvénient de la presse hydraulique est l'enfoncement dans les terrains durs. De plus, il faut utiliser un autre engin pour soulever et guider les palplanches dans la presse. Ces deux désavantages mènent à un rendement plus faible (60 à 80 m²/jour.) C'est pourquoi l'utilisation de presses n'est vraiment utile que dans les zones où l'utilisation de vibrateurs ou de marteaux n'est pas possible, par exemple lorsque le chantier est proche de bâtiments existants.

5.4.4. Les systèmes d'ameublissement du terrain

Avant de commencer à mettre en place les palplanches, il est recommandé de réaliser des sondages du sol, s'il n'est pas fourni par le client. Si la profondeur des palplanches requise ne peut pas être atteinte avec les méthodes disponibles, il faut alors prendre des mesures d'ameublissement.

On retrouve alors différentes techniques :

- **Les trous d'ameublissement :** des préforages sont réalisés avec des tarières dans les sols cohésifs et compacts. Il s'agit de réaliser des forages dans la zone où se trouveront plus tard les serrures de palplanches, ce qui permet de détendre le sol en prélevant du matériau. Cela permet de réduire la résistance au battage.



Figure 12 Exemple de forage d'ameublissement avec tarière

- **Remplacement de sol :** Les forages de remplacement sont réalisés par tubage. En effet, les déblais de forage sont alors retirés du tubage et remplacés par un matériau d'échange approprié. Cette technique est plus compliquée et onéreuse au vu du prix du matériaux de remplacement.

- **Le lancement :** Cette technique est associée au fonçage des palplanches. En effet, elle consiste à envoyer de l'eau sous pression, au voisinage du pied de la palplanche. Les lances sont des tubes en aciers rigides souvent soudées à la palplanche et raccordées à des pompes par des flexibles. Le jet d'eau ameublit le sol et diminue la résistance en pied de palplanche lors du fonçage. Cette technique baisse de 10 à 40% du frottement latéral dans les argiles.

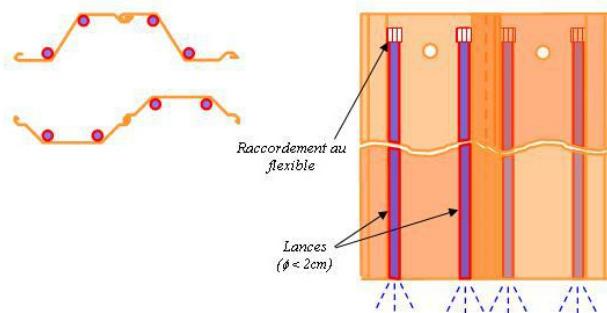


Figure 13 Système d'aide par lancement

- **Explosion :** Dans un sol rocheux, il est possible de réaliser des micros forages dans l'axe des palplanches, qui sont ensuite remplis d'explosifs. Cela transformera la roche en gravier.

5.5. Etalement du rideau de palplanche

Les palplanches font partie des types de blindage "souples", elles nécessitent alors des mesures de sécurité supplémentaires sous forme d'étalement ou d'ancrages lorsque la profondeur de fiche est trop faible ou lorsque la profondeur de l'excavation est supérieure à 3,5 mètres.

5.5.1. Lierne

On appelle lierne, les poutres horizontales qui reposent sur des équerres. Celles-ci soudées ensuite au rideau de palplanche. Le but de cet élément permet de répartir uniformément les forces aux points d'appuis des bêquilles, ancrages ou butons. Des raidisseurs peuvent être soudés afin de renforcer l'âme de la lierne. Dans le cas de petites excavations, cette ceinture constitue à elle seule un contreventement suffisant.



Figure 14 Représentation d'une lierne avec son équerre en acier

5.5.2. Béquille

La méthode la plus simple et la plus rentable pour sécuriser davantage un rideau de palplanches est de le soutenir vers l'intérieur à l'aide de béquilles. Il s'agit d'un étalement oblique, souvent des poutres en acier type HEB. Le problème est qu'une partie importante de la surface de travail est ainsi perdue. Comme les palplanches sont en principe utilisées comme blindage de fouille afin de pouvoir construire sur la plus grande surface possible, les béquilles obliques se font rares. Une partie est soudée à la lierne et l'autre est fichée dans le socle de béton en pied. Avec le même principe, il existe aussi les renforts d'angles. Celle-ci sera placée et soudée à l'horizontale sur les palplanches dans un angle et renforcera le coin.



Figure 15 Représentation d'une bâche de soutènement

5.5.3. Buton

Les butons sont en général des poutres HEB ou des profilés ROR. Ils soutiennent deux parois de fouille opposées l'une contre l'autre. Cette solution permet un certain phasage d'exécution où les travaux de terrassement pouvaient se faire en parallèle avec les travaux de génie civil. Mais aussi lorsque l'utilisation d'une foreuse d'ancre n'est pas rentable ou n'est pas possible pour des raisons d'espace ou si des bâtiments adjacents sont trop proches.

La position des butons peut constituer un obstacle pour la suite des travaux, car il est difficile de manipuler des grands éléments par la suite. De plus, l'utilisation de butons n'est pas rentable si les parois à étayer sont trop espacées (25 mètres maximum). Ils existent des éléments réutilisables, ce qui peut améliorer le bilan carbone du chantier.



Figure 16 Système par butonnage

5.5.4. Ancreage

Un ancrage est un type d'étalement. On distingue les ancrages passifs et actifs. Ils sont introduits dans le sol à l'aide d'une petite foreuse. Les injections de ciment de celle-ci permettent de transmettre les forces de traction des palplanches dans des couches porteuses. Les ancrages peuvent être tendus au moyen de la tête d'ancrage.

Un ancrage de palplanches est la seule mesure de sécurité qui ne limite pas la liberté de travail à l'intérieur de la fouille.

L'utilisation d'ancrages nécessite un travail conséquent et des coûts relativement élevés. De plus, il se peut que l'utilisation soit impossible en raison de la présence de conduites et de canalisations. Comme les ancrages dépassent souvent sur des terrains appartenant à des tiers, il peut être nécessaire d'obtenir une autorisation pour les utiliser.



Figure 17 Ancrage du rideau de palplanches

6. Les différences entre palplanches simples et doubles

6.1. Les palplanches simples et doubles

Une palplanche double est un élément composé de deux palplanche simple reliées par adhérence (soudure ou pincement). Les palplanches simples se distinguent par le fait qu'aucune force de cisaillement ne peut être supposée par le calcul. Cela ne fonctionne que pour les profils en U, car pour les profils en Z, les serrures sont symétriques par rapport à l'axe neutre et ne transmettent pas de forces de cisaillement. Deux palplanches simples en U pressées ou soudées pour former une palplanche double peuvent, selon la norme, transmettre des forces de cisaillement.

Sur la base de l'expérience terrain, on sait que deux palplanches simples assemblées agissent de la même façon qu'une palplanche double (soudée ou pressée). En effet, une liaison « naturelle » se produit au niveau des serrures de deux palplanches sous l'influence de plusieurs facteurs :

- Lors de la mise en place, des matériaux terreux pénètrent dans la serrure et la compriment.
- La rouille de l'acier dans les serrures

- L'inclinaison et la torsion des planches à la suite d'obstacles lors du battage

La pratique a souvent confirmé que ces phénomènes se produisent. En effet, l'extraction des palplanches simples pose souvent des problèmes. Il se peut que des palplanches restent parfois dans le sol parfois. Cela signifie que les palplanches simples sont statiquement équivalentes aux palplanches doubles, mais qu'à la fois, ils n'ont pas les inconvénients des palplanches doubles. Toutes les personnes qui ont retiré des planches de différents types de sol savent à quel point le frottement est souvent important. Cette difficulté varie et dépend de plusieurs facteurs : la largeur et le type de serrure, le profilé, la profondeur de battage, le sol et ses tassements.

En règle générale, dans le cas d'excavations profondes où les palplanches doubles paraissent plus judicieuses en raison des avantages théoriques. On ajoute de toute façon au rideau un renforcement supplémentaire sous la forme d'une ceinture (lierne) avec un étayage ou un ancrage. La lierne va donc limiter les pianotements et déplacements des palplanches.

De plus, sur de nombreux chantiers, des mesures de sécurité sur le rideau sont rajoutées afin de réduire les risques de déplacement. Ce sont des mesures de sécurité supplémentaires et coûteuses prises pour réduire la crainte concernant le véritable moment de résistance théorique avant l'expérience pratique.

6.2. Avantages des palplanches simples

Au premier abord, il n'est peut-être pas facile de comprendre pourquoi il est préférable d'installer des palplanches simples plutôt que d'utiliser des palplanches doubles prescrits par l'ingénieur géotechnicien. Cependant, les palplanches simples présentent quelques avantages.

6.2.1. Installation et extraction

Tout d'abord, la faible largeur d'une palplanche simple rend son utilisation beaucoup plus facile en manutention et flexible en conception avec des géométries de fouilles compliquées. Avec un profilé de 60 cm, on peut changer de direction ou installer un profilé d'angle tous les 60 cm, contrairement à des palplanches doubles de 120 cm.

De plus, les machines de pose et dépose seront plus petites, car la résistance au battage est moindre. L'utilisation de petits appareils est particulièrement avantageuse dans les zones urbaines. Cela implique aussi une réduction des coûts d'utilisation des machines.

L'argument principal que l'on entend le plus c'est la perte de cadence de pose en m² avec les palplanches simples. Certes, la mise en place de palplanches doubles augmente par deux la cadence de pose. Surtout lorsque le sol est facile à battre et qu'il y a de nombreuses sections longues. L'utilisation de plus grosse machine sont rentable d'un point de vue économique. Or, dans la pratique, les blindages remplissant ces conditions sont très rares et on retrouve bien plus de fouilles présentant des plans avec des géométries complexes.

6.2.2. Transport

Les palplanches simples sont moins larges (60 cm) et pèsent donc moins lourd, ce qui rend le transport beaucoup plus flexible. Une palplanche double peut avoir des caractéristiques de stabilité et de maniabilité différentes par rapport à des palplanches simples en raison de sa structure combinée. En effet, les palplanches simples peuvent être empilées de façon stable contrairement aux doubles qui seront de billais.

Il est possible d'acheminer des palplanches simples par camion et de les souder par la suite sur le chantier, mais cela provoque une perte de temps. De plus, les palplanches simples permettent de travailler avec des engins plus petits, le transport des engins sera également plus simple et plus économique.

7. Deux chantiers de référence réalisés par Strabag

7.1. Travaux de soutènement voie ferroviaire : Vallée de la Limmat

Le projet ferroviaire dans la vallée de la Limmat est un projet d'infrastructure situé dans les cantons de Zurich et Argovie. Celui-ci a été réalisé dans le but de maîtriser l'augmentation constante du trafic routier en fonction de la croissance démographique en Suisse.

Le chantier réalisé par Strabag concerne le lot 6 : Dietikon Ouest - zone du passage souterrain. Strabag a été chargée de la réaliser le soutènement en palplanche sans lierne.

Le passage souterrain est destiné au passage d'une route, de conduites industrielles et de transports publics. Pour ce projet, Strabag a optimisé le système de palplanches afin de proposer une variante économique au client et donc démarcation concurrentielle. Les trois types de systèmes suivants ont été vérifiés et réalisés.

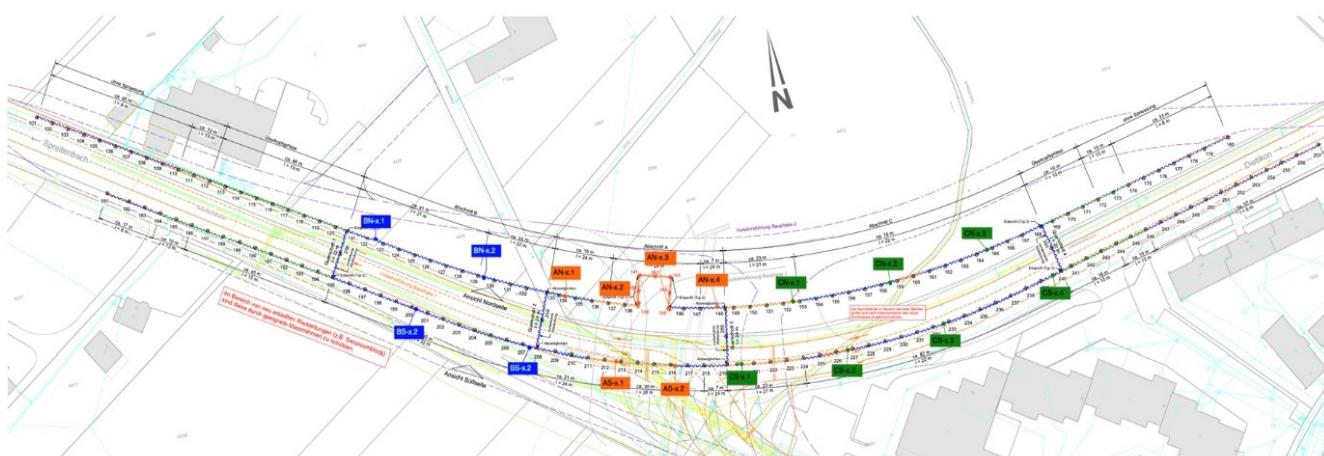


Figure 18 Plan du chantier : Passage du chemin de fer Valée de la Limmat

7.1.1. Palplanches simples au lieu de palplanches doubles

Pour la réalisation du soutènement de la fouille, Strabag devait mettre des palplanches doubles PU28 d'une longueur de 13 m aux points d'implantation 110-121, 168-174, 184-195 et 240-246. Tant le profil des palplanches que leur longueur a pu être optimisés, ce qui a finalement permis d'installer des palplanches PU22. Malgré le potentiel d'optimisation, la longueur a été maintenue à 13 m afin de simplifier l'exécution. L'utilisation de palplanches simples a été prouvée avec d'anciens chantier de référence et via des vérifications sur logiciel.

Le soutènement a donc été réalisé avec des palplanches simples au lieu de palplanches doubles, et il n'y a pas eu de valeur de déformation dépassant la limite.

7.1.2. Palplanches simples soudées

Aux points d'implantations 121-136, 145-148, 153-168, 195-211, 216-219 et 224-240, Strabag n'a pas trouvé de variante d'optimisation. Ils étaient obligés de suivre les prescriptions et de mettre des palplanches doubles PU28 de différentes longueurs. Or, Strabag préfère travailler avec des palplanches simples dues à leur stock et leur expérience de travail. Donc ils ont mis dans le sol des palplanches simples et ils sont venus les souder par paire en fonction de l'avancement du terrassement. La soudure se situe du haut des palplanches jusqu'au fond de fouille.

Cela a permis d'utiliser des palplanches simples en stock tout en respectant les préconisations de l'ingénieur statique. Cette technique a aussi n'a pas donné suite à un dépassement de valeur de déformation limite.

Par ailleurs, réaliser le soudage en fonction des terrassements ne semble pas être la meilleure solution en raison de la charge de travail élevée à un moment précis. Mais il faut aussi noter que la mise en place de palplanches doubles, n'est pas toujours possible, car la résistance au battage est beaucoup plus élevée. Cela signifie qu'il faudrait recourir à une méthode d'ameublissement coûteuse.

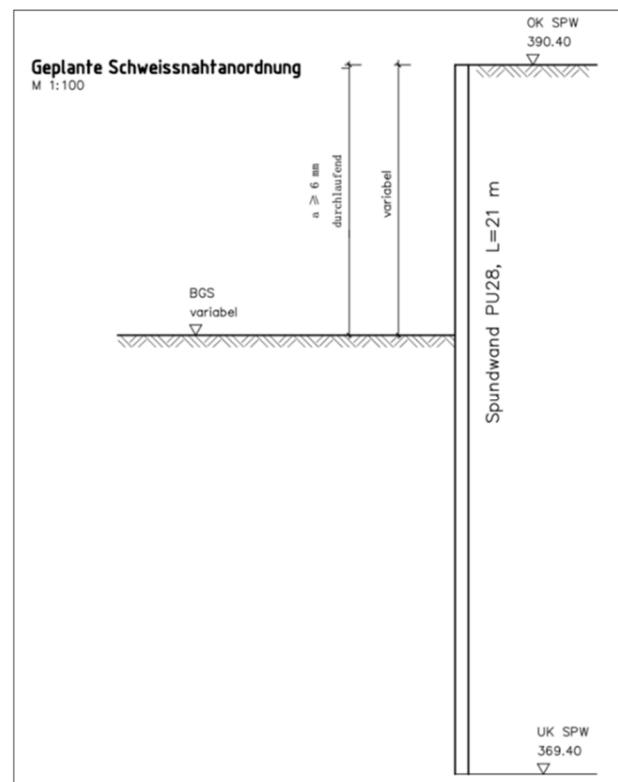


Figure 19 Coupe type d'une paroi avec la soudure

7.1.3. Palplanches simples pré-soudées sur toute la longueur

Pour les zones qui devaient résister à de grandes charges de poussées, Strabag a préféré prendre de la sécurité sur la résistance du rideau. Encore une fois, Strabag a pris le risque d'utiliser des simples au lieu des doubles prescrites initialement. Celles-ci ont été livrées sur le chantier, puis enfilées par paires et ensuite soudées entre elles sur toute la longueur avec un cordon de soudure supérieur à 6 mm. Ce n'est qu'après la soudure qu'elles ont été mises dans le sol. Cela permet de garantir que les palplanches simples soudées correspondent entièrement aux prescriptions de l'appel d'offres et dédouanent Strabag de toute déformations supérieures aux limites.

7.2. Etude des valeurs mesurées sur un chantier type : Oberwil-Lieli

7.2.1. Présentation du chantier et de la stratégie

Lors d'un chantier privé, STRABAG a proposé une variante pour réaliser une fouille économique avec l'utilisation de palplanche simple à la place de palplanche double prévue dans l'appel d'offres. Le client a accepté, à conditions d'avoir un système de mesure continu des déplacements du rideau de palplanche afin de contrôler les valeurs de déformations limites.

Le chantier situé à Oberwil-Lieli en Suisse a été réalisé en 2020. Il s'agissait d'une fouille accueillant un bâtiment résidentiel de 15 appartements.

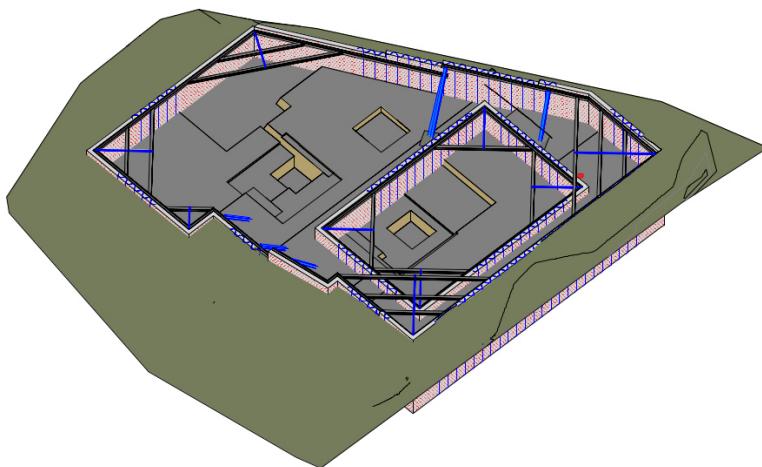


Figure 20 Vue 3D de l'étalement du chantier Oberwil-Lieli

Vous trouverez le plan du chantier en **annexe 2**.

Avant le démarrage du chantier, le dimensionnement des palplanches a été réalisé pour deux types de palplanche en utilisant la méthode de dimensionnement SIA 267. Dans le cas des calculs avec palplanches doubles, toutes les vérifications ont pu être effectuées. Mais, lors des calculs des palplanches simples, la rupture du rideau n'est pas vérifiée, car la contrainte de flexion était trop élevée d'environ 20%.

Des chantiers antérieurs ont cependant montré que les palplanches simples combinées avec une lierne agissent statiquement pratiquement comme des palplanches doubles. Étant donné que toutes les autres vérifications ont été validées sur les palplanches simples sauf la vérification de la contrainte de flexion. Il a été décidé de tout de même mettre en place des palplanches simples avec lierne. En effet, actuellement les logiciels de calculs atteignent leurs limites sur la prise en compte des gains structuraux avec la mise en place de la lierne. C'est pour cela que STRABAG a pris l'hypothèse que rajouter la lierne permettrait de vérifier la contrainte de flexion.

Pour l'aspect responsabilité, c'est de la responsabilité de l'ingénieur géotechnique de décider si une réalisation avec des palplanches simples est tout de même possible sans mettre en péril la sécurité du chantier.

7.2.2. *Les mesures de déformation*

Cette stratégie et hypothèses ont été confirmées par les mesures de déformation réalisées sur chantier à l'aide de matériel de mesure avec des cibles précises de 2 mm. C'est l'entreprise Terradata qui a placé 8 cibles (R01 à R07) sur chaque rideau de palplanche du chantier. Ces cibles prennent la valeur des déformations maximales mesurées en tête du rideau de palplanche. On ne connaît donc pas les déformations au ventre de la palplanche.



Figure 21 : Cible de mesures



Auftrag:
Auftrag-Nr.:
Auftraggeber:

Neubau MFH am Gehrenbach
18772.01
STRABAG AG, Unterrohrstrasse 5, 8952 Schlieren

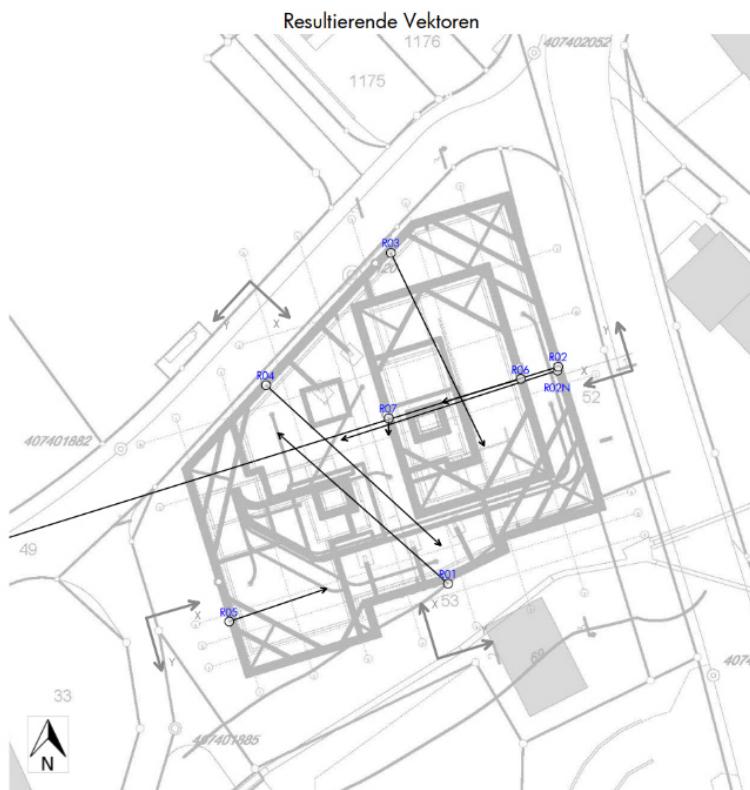


Figure 22 Positionnement des cibles sur chantier

Le tableau des mesures des déplacements se trouve en **annexe 3**. Ce tableau regroupe les déplacements selon X, Y et Z des rideaux selon des dates. Ces dates correspondent à l'avancement du chantier à travers des phases de réalisation (voir les étoiles de couleurs). Nous nous intéressons essentiellement aux déplacements selon X. Ces mesures permettent de vérifier si les palplanches n'ont pas dépassé les valeurs de déplacements limites calculées auparavant. De plus, elles seront utilisées comme référence pour la suite de la démonstration.

La déformation d'une palplanche commence toujours en tête via le démarrage de l'excavation. Puis la lierne est mise en place avec la béquille, ces éléments vont alors bloquer les déplacements en tête et vont faire démarrer les déformations au ventre de la palplanche.

Observations des mesures :

La mesure R02 n'est pas à utiliser pour cette étude, car elle est le résultat d'une erreur d'exécution. Une fois l'erreur corrigée, une nouvelle mesure zéro (R02N) a donc été effectuée. La déformation maximale des palplanches en tête est de +15 mm après la mise en place de la lierne selon la cible RO4. La valeur mesurée est bien inférieure à la valeur calculée hypothétiquement pour des palplanches simples (39,4 mm). De plus, la valeur mesurée sur chantier avec est donc bien plus proche de la valeur calculée hypothétiquement pour les palplanches doubles à savoir 20,4 mm.

Selon les mesures sur chantier, les palplanches simples réagissent de la même façon que les palplanches doubles en tête après la mise en place de la lierne. Mais nous n'avons pas de valeurs de déformation au ventre de la palplanche, donc impossible de conclure sur le phénomène après mise en place de la lierne. De plus, on observe une grande différence de déformation en tête mais impossible de conclure sur ce phénomène car nous n'avons pas de valeurs de déformations de palplanche double.

Grâce à cette optimisation, il a été possible de proposer au client une excavation économique avec le même délai d'exécution. En effet, STRABAG n'a pas eu de problèmes dans le délai de livraison, puisque les palplanches simples sont toujours disponibles en quantité suffisante dans les dépôts.

7.3. Conclusion sur les valeurs réelles

Dans le cas du chantier : Valée de la Limmat, on a pu observer les différentes variantes pour mettre en place des palplanche doubles en travaillant avec des palplanches simples. Mais elles ne sont bien moins recommandées au vu des coûts et des délais supplémentaires. En prouvant qu'il y a une réelle équivalence en termes de comportement structurel entre les palplanches simples et les doubles, il serait possible de réduire les pertes financières et de temps.

Dans le cas du chantier d'Oberwil-Lieli, l'utilisation de palplanches simples n'a pas pu être prouvée par le calcul, mais des palplanches simples ont tout de même été utilisées sur la base des expériences acquises lors de projets précédents. Des mesures de déformation ont permis de prouver que les palplanches simples étaient suffisamment résistantes.

Les bénéfices de la lierne avec la transmission de la force de cisaillement sur les palplanches simples ne pouvaient pas être résolus numériquement jusqu'à maintenant. En effet, les logiciels de calculs atteignaient leurs limites. Cela signifie que l'on sait que cet effet existe, mais que l'on ne sait pas comment le prendre en compte dans le calcul statique. Dans la prochaine partie de cette étude, nous allons modéliser la structure en 3D afin de prendre en compte les bénéfices de la lierne.

Pour conclure d'après les valeurs terrain, on peut affirmer que l'utilisation de palplanches simples au lieu de palplanches doubles est possible sans problème dans de nombreux cas. STRABAG a réalisé plusieurs projets de référence pour affirmer ce phénomène comme le passage du chemin de fer dans la vallée de la Limmat.

8. Dimensionnement et modélisations sur les logiciels de calculs

8.1. Explication de la méthodologie

Pour étudier le fonctionnement entre les palplanches simples et les palplanches doubles équipées de liernes, ma méthodologie repose sur une approche rigoureuse alliant observation de chantier, calculs statiques, et modélisation en 3D.

Après avoir étudié les valeurs mesurées sur chantier, j'ai déjà constaté que le phénomène positif de la lierne est perceptible dans la pratique. Mais afin de le démontrer scientifiquement, je vais devoir le prouver via des chiffres qui seront justifiés avec la réalité sur terrain.

Pour ce faire, j'ai commencé par utiliser le logiciel DC-Ecran pour réaliser des dimensionnements de palplanches et des calculs statiques en m'appuyant sur des coupes type des parois du plan et des conditions réelles du chantier.

Ces calculs me permettront d'obtenir les valeurs de déformations et de charges appliquées sur le rideau de palplanche. Ces valeurs seront comparées à celles mesurées dans la réalité pour valider la précision de mon dimensionnement, car un dimensionnement incorrect rendrait toutes les démarches ultérieures inutilisables. A travers ce dimensionnement, j'analyserai quatre types de configurations : le rideau de palplanche simple sans lierne au premier niveau d'excavation puis avec lierne au deuxième niveau ; de même pour un rideau de palplanche double.

Ces comparaisons me permettront peut-être de démontrer que le logiciel ne prend pas en compte l'impact positif de la lierne sur les déformations des palplanches simples. Mais ces différents cas de figure me permettront d'avoir une base de référence sur les déformations et les charges.

Puis afin de démontrer ce phénomène, je créerai quatre modèles 3D par coupe type sur le logiciel RFEM6 avec les éléments métalliques et les conditions exactes du chantier (soudures, appuis, ...). RFEM6 est un logiciel de modélisation et d'analyse structurelle avancée, permettant de simuler des structures en 3D avec des conditions de charge et de contrainte réalistes.

En intégrant les charges calculées par DC-Ecran aux modèles RFEM6, j'analyserai les résultats des déformations obtenues. Si les valeurs des palplanches doubles avec lierne correspondent à celles des palplanches simples avec lierne, cela validera la théorie selon laquelle les palplanches simples avec liernes fonctionnent effectivement de la même manière que les palplanches doubles avec lierne. De plus, elle validera la limite des logiciels géotechniques d'aujourd'hui.

8.2. Dimensionnement des palplanches

8.2.1. Dimensionnement selon SIA 267

L'ensemble des parois de soutènement doit être dimensionné selon la norme SIA 267 (géotechnique). Il est possible de renoncer à la vérification de certains états limite ultime s'ils n'ont pas d'importance par rapport au dimensionnement en question.

Lors du dimensionnement des murs de soutènement, les états limite suivants doivent être vérifiés conformément à la norme SIA-267 :

- L'état limite de type 1 : concerne la stabilité globale de la structure porteuse. Dans ce cas, la résistance de la structure porteuse ou du sol de fondation n'est pas importante.
- L'état limite de type 2 : concerne l'atteinte de la résistance ultime de la structure porteuse ou d'une de ses parties. Ces cas sont essentiellement déterminés par les caractéristiques du sol et des matériaux de construction et par les grandeurs géométriques.
- L'état limite de type 3 : concerne la stabilité du terrain en atteignant la résistance ultime du sol de fondation.
- L'état limite de type 4 : concerne l'atteinte de la résistance à la fatigue du sol, de la structure porteuse ou d'une de ses parties.
- Les états limite de service concernent les exigences relatives à l'utilisation de l'ouvrage conformément à son utilisation.

L'état limite de type 2 est celui qui correspond le mieux à notre étude. En effet, nous voulons observer les déformations et pertes de stabilité d'une palplanche selon sa résistance ultime.

La sécurité structurale est vérifiée lorsque le critère de dimensionnement suivant est rempli :

$$Ed \leq Rd$$

- ✓ Les pressions de terre sont calculées avec les valeurs caractéristiques du sol selon un sondage sur site.
- ✓ Ed : valeur de calcul d'une charge : forces transversales et moments dus à la pression active des terres au-dessus du fond de fouille et à la pression de l'eau qui peut augmenter cette charge.
- ✓ Rd : Valeur de référence d'une résistance ultime de la palplanche

8.2.2. Dimensionnement avec logiciel DC-Ecran

- Modélisation

DC-Ecran est un logiciel permettant d'effectuer des calculs statiques pour la réalisation de fouilles. Le logiciel peut calculer selon différentes normes mondiales ainsi selon une saisie libre.

Tous les calculs ont été réalisé avec l'aide de Oleksandr Zimels, expert ingénieur géotechnicien, selon la norme suisse SIA. L'utilisation d'un logiciel de calcul nous a permis d'obtenir des résultats rapides et précis. Les parois temporaires de fouilles ont été dimensionnées selon l'état limite de type 2 conformément à la norme SIA 260 (structure porteuse). Il correspond à des situations permanentes correspondant aux conditions d'utilisation habituelles.

Le dimensionnement au sens de la norme SIA 267 (Géotechnique) crée un modèle sûr et économique du rideau de palplanche. En effet, cette méthode est obligatoire lorsque des risques géotechniques doivent être pris en compte et selon la nature du sol.

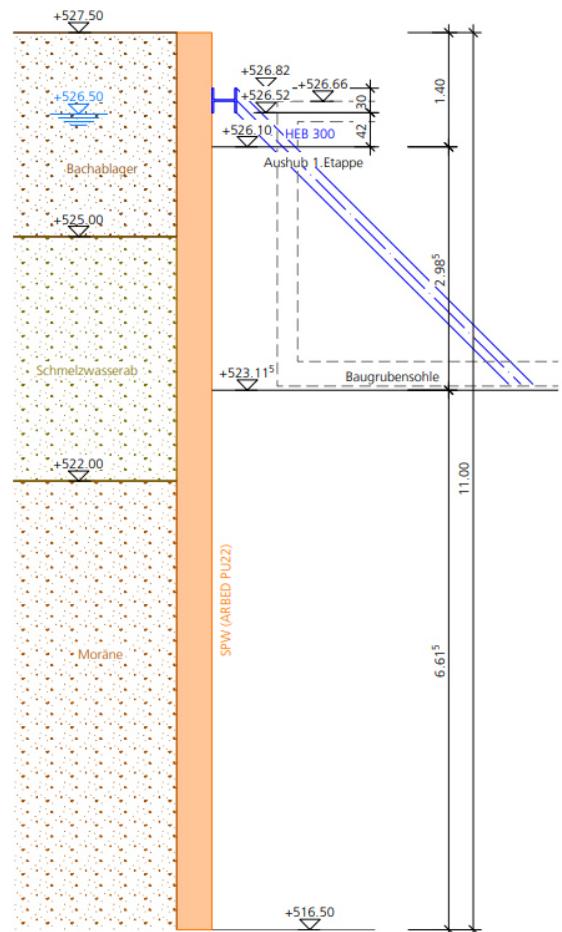


Figure 23 Coupe type 2-2

Le plan du projet Oberwil-Lieli disponible en **annexe 2** comporte des coupes type des différentes parois de soutènement à réaliser sur chantier. Nous nous sommes intéressés à la coupe type 2-2 pour pouvoir ensuite la comparer avec les résultats de mesure sur chantier de la cible RO1.

Sur cette coupe, on retrouve une palplanche PU22 de 9m de long traversant 3 couches de sol contenant la nappe phréatique. La palplanche repose dans de la moraine, c'est une couche de sol gravier/sable sec dure. C'est le sol comportant la meilleure portance avant la roche. Enfin, elle est soutenue par une lierne HEB 300 et bâche en HEB300.

Ce dimensionnement commence par la conception du rideau type comme sur le plan. On y retrouve le type de palplanche, les longueurs des éléments, des éventuels ancrages, les couches de sols avec les différentes hauteurs et valeur géologiques, les charges, les coefficients de poussée des terres et le buton qui a une force appliquée sur la paroi. Ensuite, les différents cas de charges sont appliqués selon les niveaux d'excavations. On retrouve l'excavation 1 : qui va permettre d'installer la lierne et l'excavation 2 : qui fera référence au terrassement jusqu'au fond de fouille. En effet, il faut bien séparer les différentes étapes de construction comme dans la réalité. Ensuite, le logiciel analyse et calcule les déformations et la résistance du rideau selon chaque phasage du chantier. En fonction des résultats et des vérifications du logiciel nous devons adapter notre modèle afin qu'il supporte les contraintes de l'environnement. Donc notre rideau est conçu, dimensionné et validé. On obtient donc différents graphiques. Nous nous intéressons aux graphiques de mesures de déformations totales et aux charges appliquées.

- Proposition de variante

Par la suite, le géotechnicien peut établir des changements de données sur le modèle en prenant des hypothèses sur l'environnement afin d'optimiser la paroi. Il doit réfléchir aux conséquences et au comportement de la structure porteuse après optimisation afin de connaître la prise de risque.

La pertinence des hypothèses et/ou des prévisions de comportement de la structure porteuse est vérifiée pendant l'exécution et/ou avec l'utilisation de système de surveillance. En cas de dépassement des valeurs limites, la sécurité et la fiabilité ne sont donc plus assurées pour la paroi.

Lorsqu'on réalise des optimisations, il faut que notre hypothèse soit mesurable, contrôlable ou observable. De plus, les écarts de valeurs doivent être annoncés suffisamment tôt, afin de réagir au plus vite et prendre des mesures de renforcement.

Pour que la rentabilité financière de l'entreprise soit la meilleure, les risques et les coûts doivent être proportionnels aux gains. Ce rapport doit être soigneusement clarifié avant la remise de l'offre. Il faut tenir compte du fait que les mesures réalisées après le dépassement des valeurs limites coûtent souvent plus cher que si elles avaient été réalisées dès le début.

Sur le chantier de Oberwil-Lieli, la variante a été de remplacer les palplanches simples par des palplanches doubles. Or par le calcul nous n'avons pas réussi à trouver des résultats assez concluants avec les palplanches simple mais Strabag a quand même pris le risque d'en mettre par expérience. Ainsi des calculs ont été réalisés selon les deux phases d'excavation du chantier en comparant les palplanches simples et les palplanches doubles. Un résumé sommaire des calculs statiques se trouve en **annexe 4**.

		Déformation maximale en mm					
		Avant la mise en place de la lierne			Après la mise en place de la lierne		
Point mesuré	Coupe type	Résultat chantier	Résultat de calcul avec logiciel DC-Ecran		Résultat chantier	Résultat de calcul avec logiciel DC-Ecran	
		Mesure Terradata	Avec des palplanches simples (tête)	Avec des palplanches simples (tête)	Mesure Terradata	Avec des palplanches simples (ventre)	Avec des palplanches doubles (ventre)
R01	2-2	28	29,9	8,8	30	53,1	15,6
R03	2-2'	25	34,3	10,1	27	101	29,7

Figure 24 Tableau récapitulatif des mesures terrains et du logiciel DC-Ecran

- Résultat du chantier de Oberwil-Lieli

Ce tableau résume les résultats calculés avec le logiciel (en rouge) et les mesures Terradata réalisées sur chantier (en vert) selon le phasage du chantier. Ces valeurs font référence aux coupes 2-2 et 2-2' et selon le repère de mesure R01 et R03. On y observe des résultats de déformations maximales selon qu'elles soient en tête ou au ventre du rideau.

- Observation pour R01 et valable pour R03 :

Dans la première phase 1, les palplanches simples sans la lierne se déforment en tête sur chantier de 28mm pratiquement comme les valeurs calculées (29.9mm). Puis après excavation et mise en place de la lierne, les palplanches sur chantier se déforment de +2mm en tête.

On peut aussi observer que la déformation des palplanches doubles se déforment beaucoup moins que des simples lorsque la lierne est absente. Et selon le logiciel, il y a toujours cette grande différence de déformations même après la mise en place de la lierne. Or nous savons qu'en réalité les palplanches simples se déforment de la même façon qu'une double.

Pour la deuxième étape selon le logiciel, les palplanches se déforment au ventre de 53.1mm au maximum pour les simples et 15.6mm pour les doubles. Mais nous n'avons pas de quoi comparer ces déformations avec les résultats terrains. Car les cibles mesurent uniquement les déformations en tête. Mais nous savons via l'expérience de Strabag qu'elle devrait réagir de la même façon.

Pour conclure, on peut affirmer qu'il y a une différence entre les palplanches simples et les doubles avant la mise en place de la lierne. Donc pour la première partie, le logiciel est fiable. Mais il y a bien une limite dans le logiciel pour calculer les déformations dans l'étape 2 avec la mise en place de la lierne, puisqu'il y a une forte incohérence entre la réalité et les logiciels. On peut donc affirmer que la lierne freine les déformations sur le rideau après son installation. Dans la partie suivante nous allons soulever le problème de la limite du logiciel.

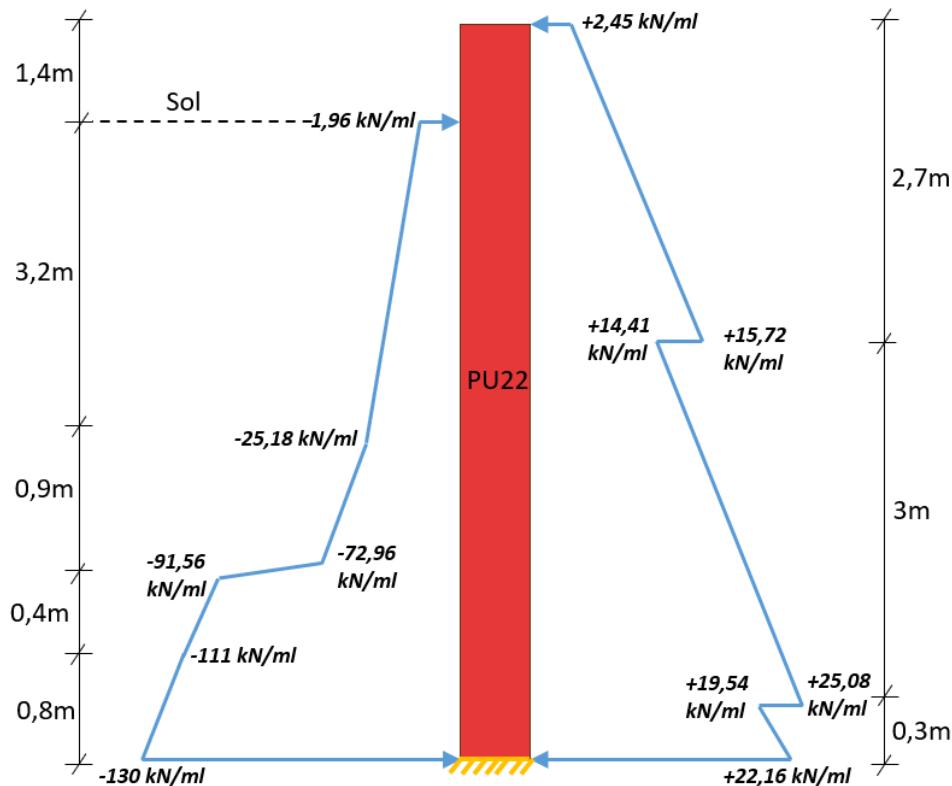
8.3. Modélisation des palplanches sur RFEM6

Pour modéliser les rideaux de palplanches en 3D, j'ai adopté une méthodologie précise et systématique pour représenter différents scénarios de configuration des palplanches. Les modélisations sont identiques aux valeurs de la réalité et du dimensionnement. Les scénarios sont les suivants :

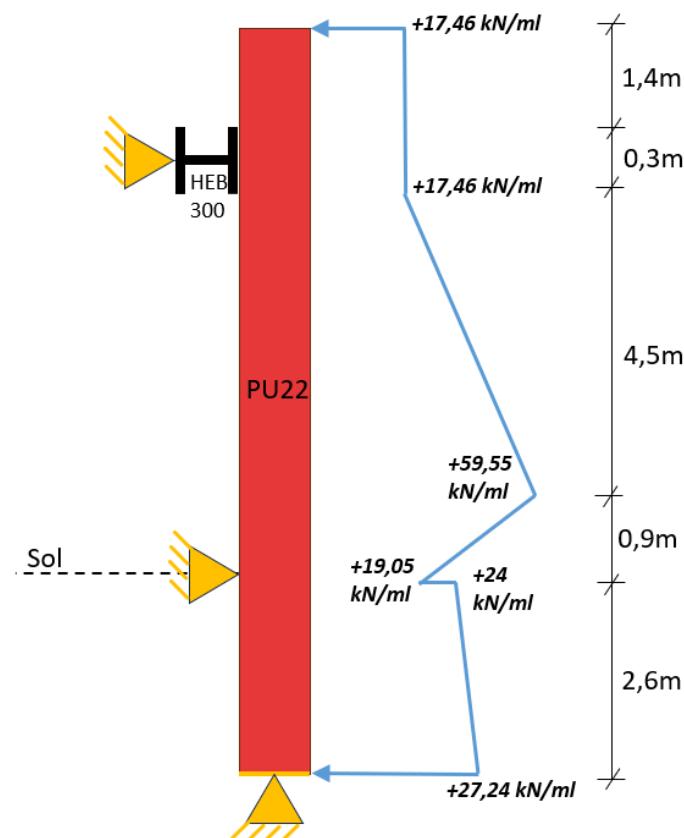
- Scénario 1 : Rideau de palplanche simple (6.7m) avec profondeur d'excavation de 1,4m.
- Scénario 2 : Rideau de palplanche double (6.7m) avec profondeur d'excavation de 1,4m.
- Scénario 3 : Rideau de palplanche simple (9m) avec profondeur d'excavation de 6.4m.
- Scénario 4 : Rideau de palplanche double (9m) avec profondeur d'excavation de 6.4m.

Ci-dessous les coupes types selon les deux type d'excavation :

Coupe type 1 : Excavation de 1.4m



Coupe type 2 : Excavation de 6.4m



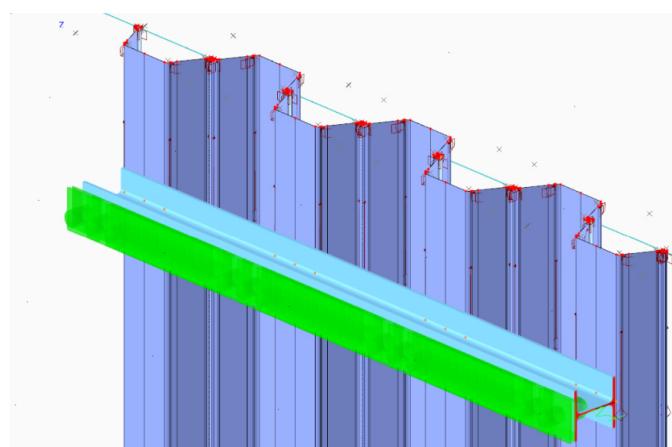
Et voici comment j'ai procédé pour la modélisation :

1. Modélisation de la structure :

J'ai utilisé un fichier AutoCAD (.dwg) officiel d'Arcelor Mittal concernant les palplanches PU22 simples, auquel j'ai ajouté l'axe des palplanches dans la largeur. J'ai inséré ce fichier dans RFEM6 et j'ai ensuite extrudé en surface cette ligne en inscrivant le type d'acier (S355) ainsi que les différentes largeurs des surfaces de la palplanche (12,1 mm pour la face avant et 9,5 mm pour la serrure et les ailes de la palplanche). Ceci m'a permis d'obtenir une modélisation exacte d'une palplanche. J'ai dupliqué cette palplanche sept fois avec un décalage de 0,6 mètre pour les emboîter dans les serrures. J'ai préféré avoir sept éléments de palplanches pour obtenir des résultats de déformations réalistes et plus précis au milieu d'une grande longueur de rideau.

2. Ajout de la lierne (uniquement pour le deuxième cas de figure avec lierne) :

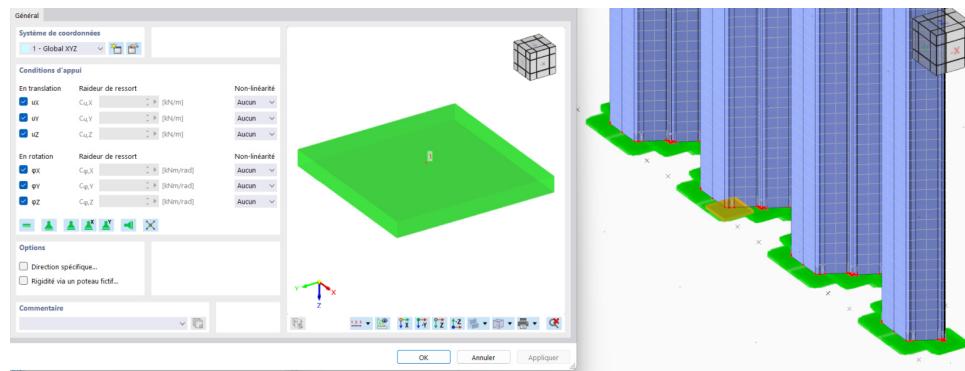
J'ai positionné des nœuds sur la palplanche au niveau exact (526.66) de la lierne sur le plan, puis ajouté une barre HEB300 en spécifiant l'acier S275. J'ai excentré la lierne afin qu'elle soit positionnée devant le rideau et je me suis assuré qu'elle soit bien soudée au rideau comme dans la réalité.



3. Mise en place des appuis :

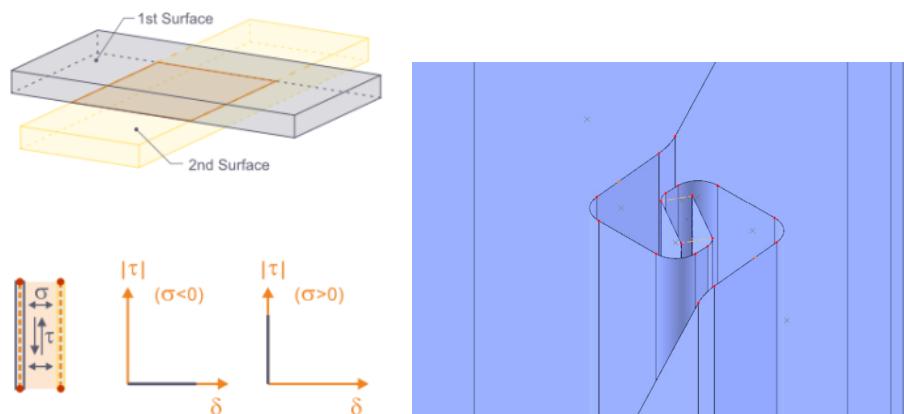
Pour le premier cas de figure, j'ai positionné des appuis encastrés au bas du rideau, en accord avec le dimensionnement et les conditions réelles du chantier.

Pour le deuxième cas de figure, j'ai positionné des appuis simples horizontalement sur la lierne, représentant la retenue de la bâche. J'ai aussi ajouté un appui modélisant le centre de la butée du sol à 1/3 de la longueur. Enfin, j'ai intégré des appuis simples bloquant l'enfoncement des palplanches dans le sol.



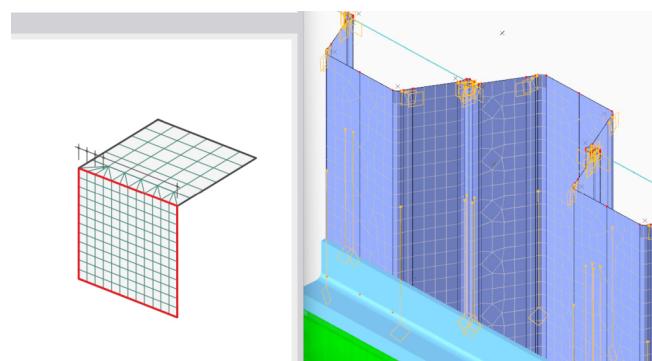
4. Différenciation entre palplanche simple et palplanche double :

Cette étape est cruciale pour différencier les deux types de palplanches. Pour modéliser les palplanches doubles, j'ai assemblé les palplanches avec des plaques d'acier, comme dans la réalité, en utilisant des soudures. Puis entre les palplanches, j'ai ajouté un contact de surface, permettant de choisir le type de contact entre les serrures. J'ai ainsi transmis les efforts perpendiculairement mais laissé les palplanches libres de se déplacer dans les serrures en hauteur.



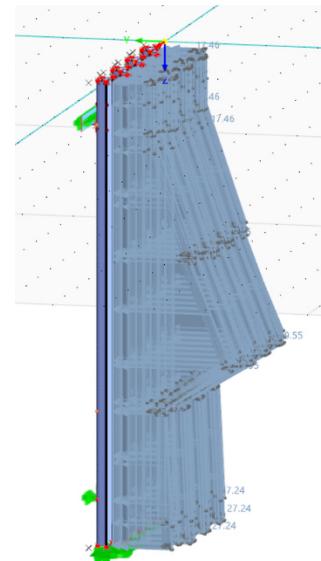
5. Maillage du rideau :

J'ai affiné le maillage sur le rideau pour décortiquer chaque surface et obtenir des résultats plus précis sur son comportement.



6. Application des charges sur le modèle :

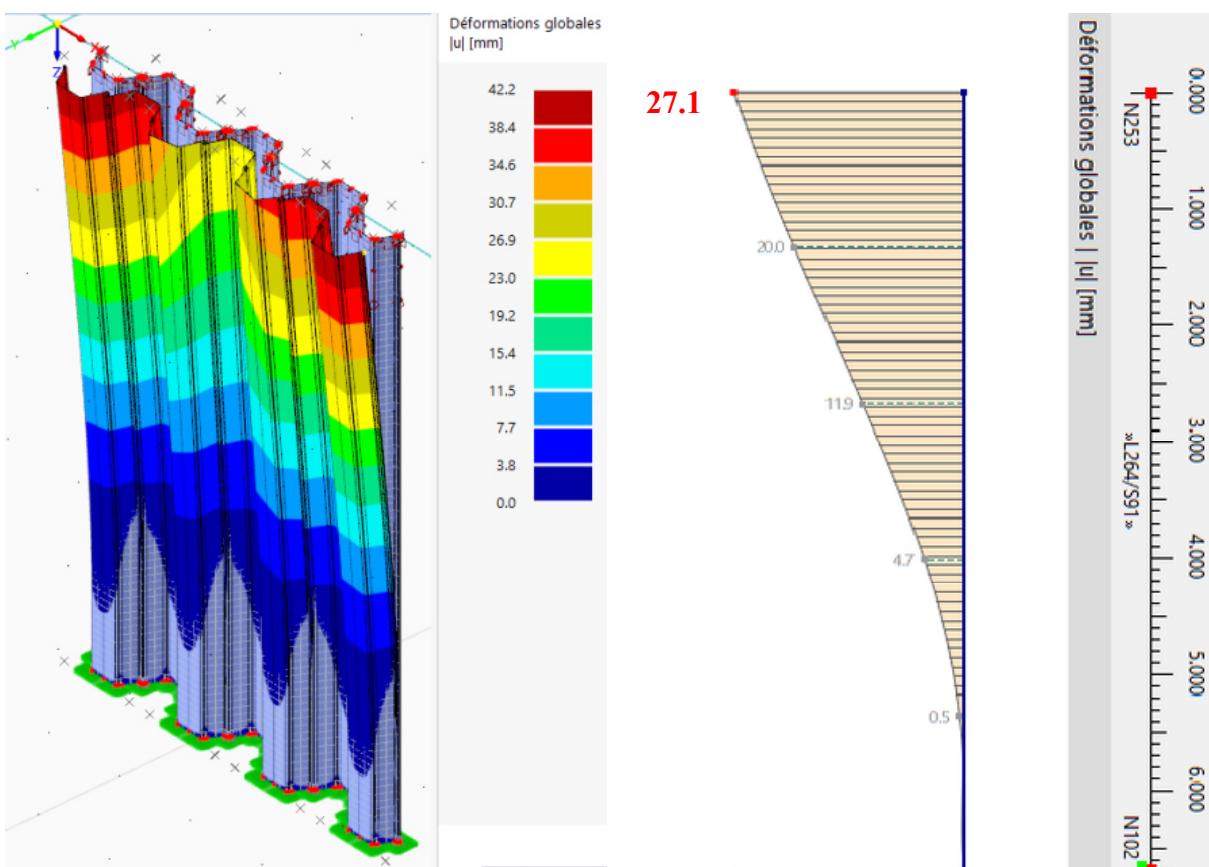
J'ai ajouté les charges calculées selon le logiciel de dimensionnement DC-Ecran, et j'ai chargé le rideau par une charge surfacique variable en hauteur.



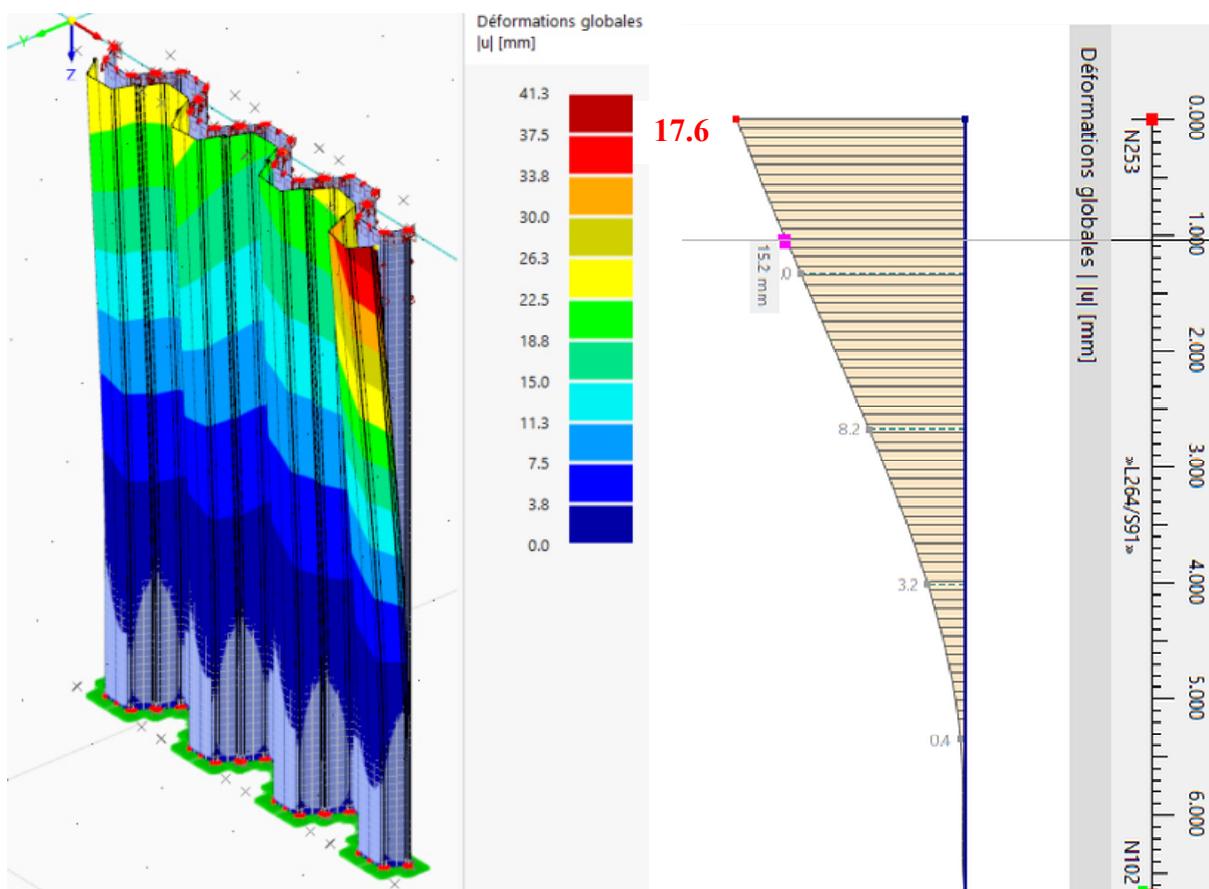
7. Calcul des déformations :

Enfin, j'ai utilisé le logiciel pour réaliser les calculs et obtenir les valeurs de déformations, comme ci-dessous :

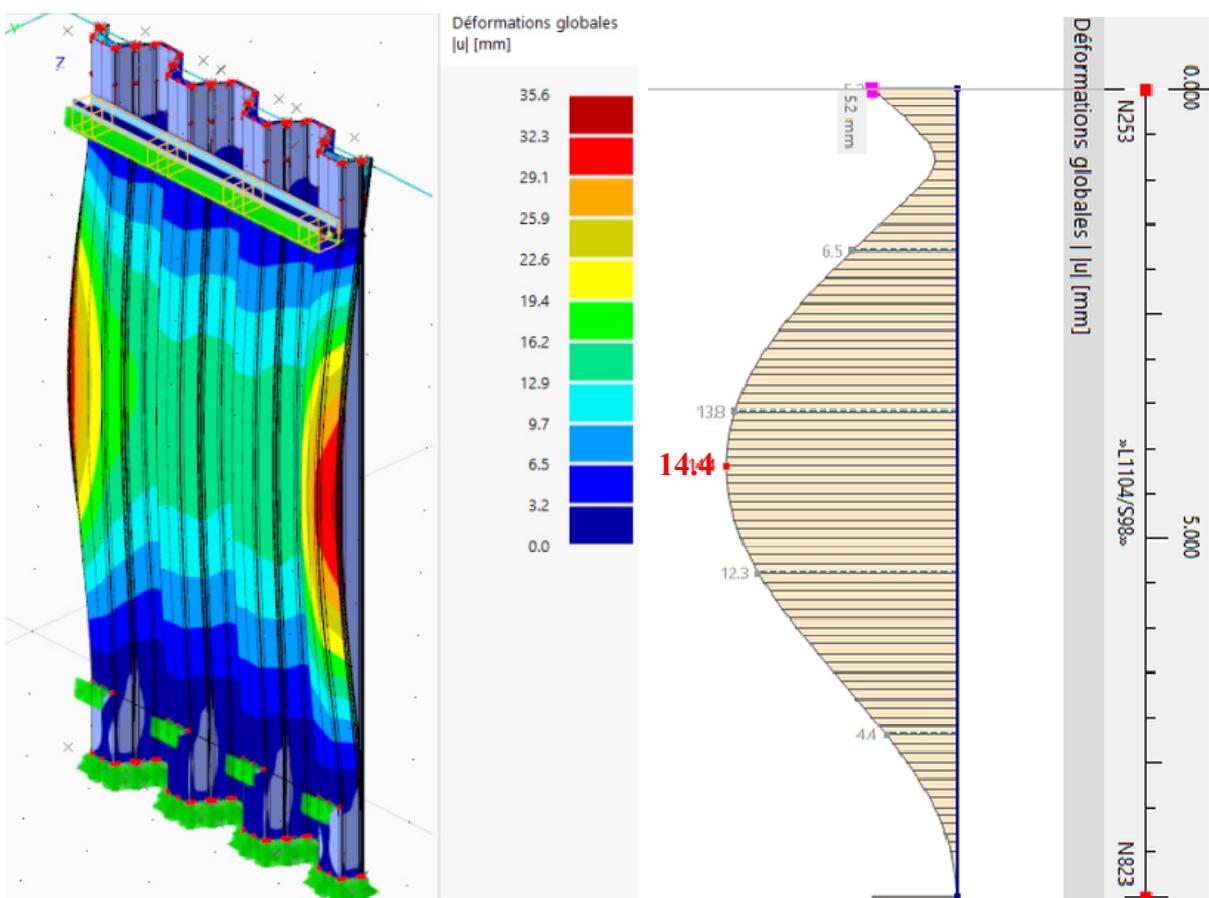
Modélisation 3D sur RFEM6 : Scénario 1 :



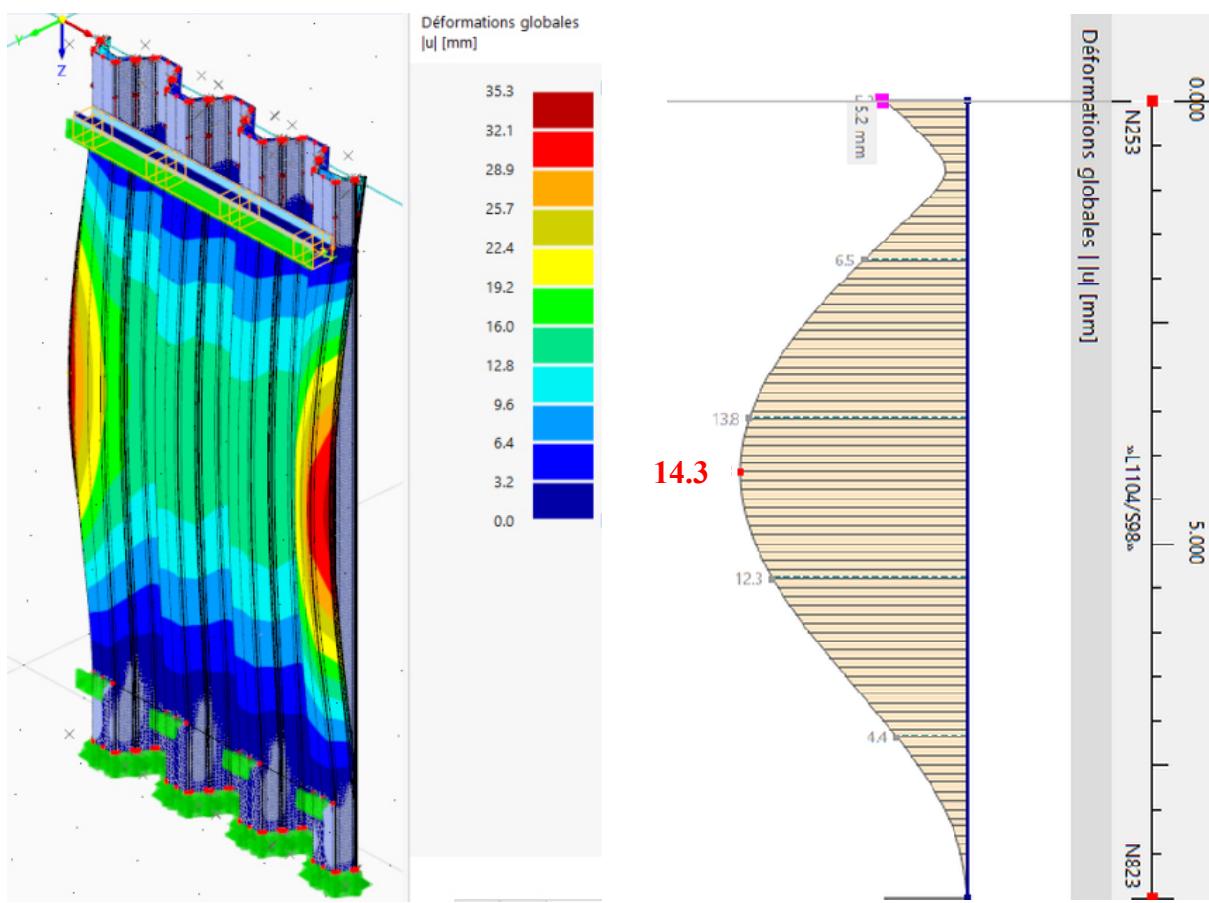
Modélisation 3D sur RFEM6 : Scénario 2 :



Modélisation 3D sur RFEM6 : Scénario 3 :



Modélisation 3D sur RFEM6 : Scénario 4 :



Cette méthodologie m'a permis de modéliser avec précision les rideaux de palplanches et d'obtenir des résultats fiables. On peut observer que des déformations sur les côtés du rideau ne représentent pas la réalité. En effet, il est difficile de mettre en place des appuis représentant la continuité du rideau. C'est pour cela que l'ensemble des mesures des déformations ont été enregistrées au milieu. La modélisation d'un plus long rideau nous permettrait de se rapprocher davantage à la réalité. Par exemple sur le scénario 2, on obtient une valeur de 18 mm de déformation, mais cette valeur diminuerait avec l'augmentation de la longueur du rideau.

9. Synthèse des résultats pour comparaison

À la suite de l'obtention de valeurs réelles concrète sur chantier et des valeurs de logiciels de calculs théoriques, nous pouvons effectuer une synthèse afin d'établir une conclusion. Ce tableau présente toutes les valeurs de déformations du rideau en millimètres (mm), selon les différentes étapes d'excavation et les types de palplanches (simples ou doubles). Les valeurs sont différenciées par des couleurs distinctives pour faciliter l'analyse. Les valeurs en vert représentent les mesures réelles relevées sur le chantier. Celles en rouge sont issues de calculs effectués avec un logiciel géotechnique, tandis que les valeurs en bleu correspondent aux résultats de la modélisation 3D effectuée sur RFEM6. L'ensemble des résultats fait toujours référence à la coupe type 2-2 et coupe type 2-2' du plan et à la cible de mesure R01 et R03 :

Déformation maximale en mm											
		Avant la mise en place de la lierne				Après la mise en place de la lierne					
		Résultat logiciel				Résultat chantier	Calcul avec logiciel				
Point mesuré	Coupe type	Mesure Terradata	Logiciel DC-Ecran	Logiciel RFEM6	Logiciel DC-Ecran	Logiciel RFEM6	Mesure Terradata	Logiciel DC-Ecran	Logiciel RFE M6	Logiciel DC-Ecran	Logiciel RFEM6
		Avec des palplanches simples (tête)	Avec des palplanches simples (tête)		Avec des palplanches doubles (tête)		Avec des palplanches simples (tête)	Avec des palplanches simples (ventre)		Avec des palplanches doubles (ventre)	
R01	2-2	28	29,9	27,1	8,8	17,6	30	53,1	14,4	15,6	14,3
R03	2-2'	25	34,3	27,1	10,1	17,6	27	101	26,6	29,7	25,9

Figure 25 Tableau récapitulatif final : mesures terrains et calculs sur les logiciels

Lors de la première phase d'excavation sans lierne, les valeurs mesurées sur le chantier étaient de 28 mm. Les logiciels de dimensionnement et de modélisation ont respectivement donné 29,9 mm et 27,1 mm pour les palplanches simples, et 8,8 mm et 17,6 mm pour les palplanches doubles. Les résultats réels confirment que la modélisation est fiable et le dimensionnement sans lierne aussi. Néanmoins, il y a avec une différence notable injustifiée avec les palplanches doubles sans lierne entre les deux logiciels. Mais nous n'avons pas de quoi comparer avec des valeurs des palplanches doubles sur le terrain.

Lors de la deuxième phase d'excavation, les déformations mesurées sur le chantier étaient de 30 mm. Les logiciels de dimensionnement et de modélisation ont donné respectivement 53,1 mm et 14,4 mm pour les palplanches simples, et 15,6 mm et 14,3 mm pour les palplanches doubles. Les résultats suggèrent bien que les logiciels de dimensionnement géotechnique ne prennent pas en compte l'avantage de la lierne pour les excavations profondes. Or les autres résultats prouvent bien le phénomène du comportement similaire entre palplanches simples et palplanches doubles. En effet, via les résultats précédents, nous validons notre modèle 3D. Et comme le logiciel de modélisation donne exactement les mêmes valeurs que des palplanches double cela signifie premièrement que les logiciels (comme DC-Ecran) ne prennent pas en compte l'effet de la lierne.

En résumé, les résultats montrent une bonne différence entre les déformations mesurées sur le chantier et celles prédictes par les logiciels lorsqu'il y a la lierne en place. Les palplanches doubles présentent des avantages significatifs par rapport aux simples lorsqu'il n'y a pas la lierne. Puis dans la deuxième étape d'excavation, les résultats sont cohérents avec la réalité et ils sont confirmés par l'efficacité de la modélisation.

Donc je peux conclure, que les palplanches simples se comportement de la même manière, moyennant des dixième de millimètres, que des palplanches doubles lors de la mise en place de la lierne lors de travaux de soutènement avec des excavations profondes.

10. Ouverture : Les limites de l'étude

Mon ouverture sur cette étude des palplanches montre les limites de celle-ci. Toute étude suivant un processus de recherche, avant de se conclure, passe par des étapes essentielles de réflexion et de collecte d'informations. Ce parcours, souvent ponctué de lacunes en matière de données, aboutit finalement à une conclusion solide et irréfutable, ne laissant place à aucune ambiguïté.

Mon travail représente une étape cruciale de cette étude complexe et non aboutie aujourd'hui. Durant les six mois alloués, j'ai pu formuler certaines conclusions tout en identifiant des zones d'ombre. Mon travail offre donc une avancée significative, mais il reste à Strabag à surmonter ces limites et à combler les éléments manquants, comme ceux mentionnés ci-dessous, pour parvenir à une démonstration complète de l'étude.

Au vu des résultats l'étude, s'appuyant sur des preuves réelles et théoriques, nous pouvons en tirer une conclusion. Il faut bien comprendre que c'est une supposition de résultat pour le moment et pas encore une règle vérifiée à 100%. Il faudrait pour cela obtenir plus de mesures de références sur des chantiers et prendre davantage de temps à modéliser entièrement en 3D le rideau de palplanche.

De plus, le manque de valeurs de mesure sur des palplanches doubles sur chantier rend l'étude incomplète. On observe des différences entre les deux logiciels dans les différentes phases d'excavation sur logiciel mais on est incapable de conclure par manque de comparaison avec les palplanches doubles. Strabag doit prendre des mesures sur des chantiers type avec des palplanches doubles.

Les mesures actuelles de Strabag sont seulement mesurées en tête et pas au ventre du rideau. Il serait bien d'installer des cibles sur toute la longueur de la palplanche afin d'avoir une grande base de données de déformations.

Le sujet du dimensionnement 3D sur logiciel est aussi un élément bloquant pour l'étude. Lorsqu'on modélise les palplanches, les déformations sont prises par les charges totales par phases. Or il serait intéressant de trouver une solution pour faire déformer les palplanches selon la première phase d'excavation et d'ensuite ajouter les déformations sur les palplanches déjà déformées pour la deuxième étape de terrassement.

Le phénomène de la lierne qui rend le fonctionnement d'une palplanche simple en une palplanche double est utile seulement dans certains environnements de chantier. En effet, lors du premier niveau d'excavation, les déformations sont souvent plus importantes que dans la deuxième étape. Donc la première déformation est très importante et peut bloquer certaine mise en place sur des chantiers. Par exemple, ci-dessous il y a deux exemples :



Figure 28 Scénario : pose d'une conduite de gaz



Figure 26 Scénario : Passage d'une voie ferroviaire en tête de la palplanche



Figure 27 : Passage d'une voie ferroviaire en bas de la palplanche

La photo de gauche représente des travaux de pose de canalisation de gaz. Les déformations importantes en tête ne présentent pas un réel danger pour ce type de travaux. Puisque la canalisation ne peut pas être touchée par la déformation des palplanches. On pourra alors utiliser des palplanches simples.

Sur les photos de droite, on observe des travaux de soutènement en palplanche reprenant la charge d'une voie de chemin de fer et sur l'autre uniquement le terrain pour le passage du train. Dans cette situation les déformations sont très dangereuses. Pour le premier scénario, elles peuvent provoquer le tassement de la ligne ferroviaire. Et pour le second, la collision entre les palplanches avec le gabarit du train. Dans ces cas-là, les ingénieurs souhaiteront le moins de déformations possibles et obligeront l'entreprise d'utiliser les palplanches doubles.

Il serait intéressant de réfléchir sur un mode opératoire de terrassement et de mise de l'étalement afin de réduire au maximum les premières déformations des palplanches.

11. Conclusion

Ce travail de fin d'études que j'ai mené a apporté des avantages significatifs à Strabag et à moi. Grâce à une méthodologie scientifique rigoureuse combinant les avantages significatifs des palplanches simples, les résultats sur le terrain, le dimensionnement sur logiciel, et la modélisation 3D, il a été possible de vérifier de nombreux résultats via des synthèses intermédiaires. Puis avec une synthèse globale, il a été possible de démontrer que les palplanches simples offrent un comportement similaire aux palplanches doubles après la mise en place de la lierne lors de travaux de soutènement de grande hauteur.

Les outils logiciels DC-Ecran et RFEM6 m'ont initialement posé des difficultés, car ils étaient nouveaux pour moi. Cependant, avec persévérance, j'ai réussi à maîtriser ces outils et à les utiliser efficacement pour la modélisation. De plus, les défis liés à la langue allemande, notamment pour la communication et pour lire et comprendre les documents et les normes, ont nécessité beaucoup de temps de traduction et d'adaptation.

Ce PFE m'a permis d'acquérir une connaissance technique approfondie des palplanches et de leur fonctionnement, ainsi que de la géotechnique en général et pour finir une amélioration linguistique de la langue allemande. Ce projet m'a aussi fait comprendre les différentes étapes d'une étude et j'ai pu soulever les points bloquants pour finir celle-ci.

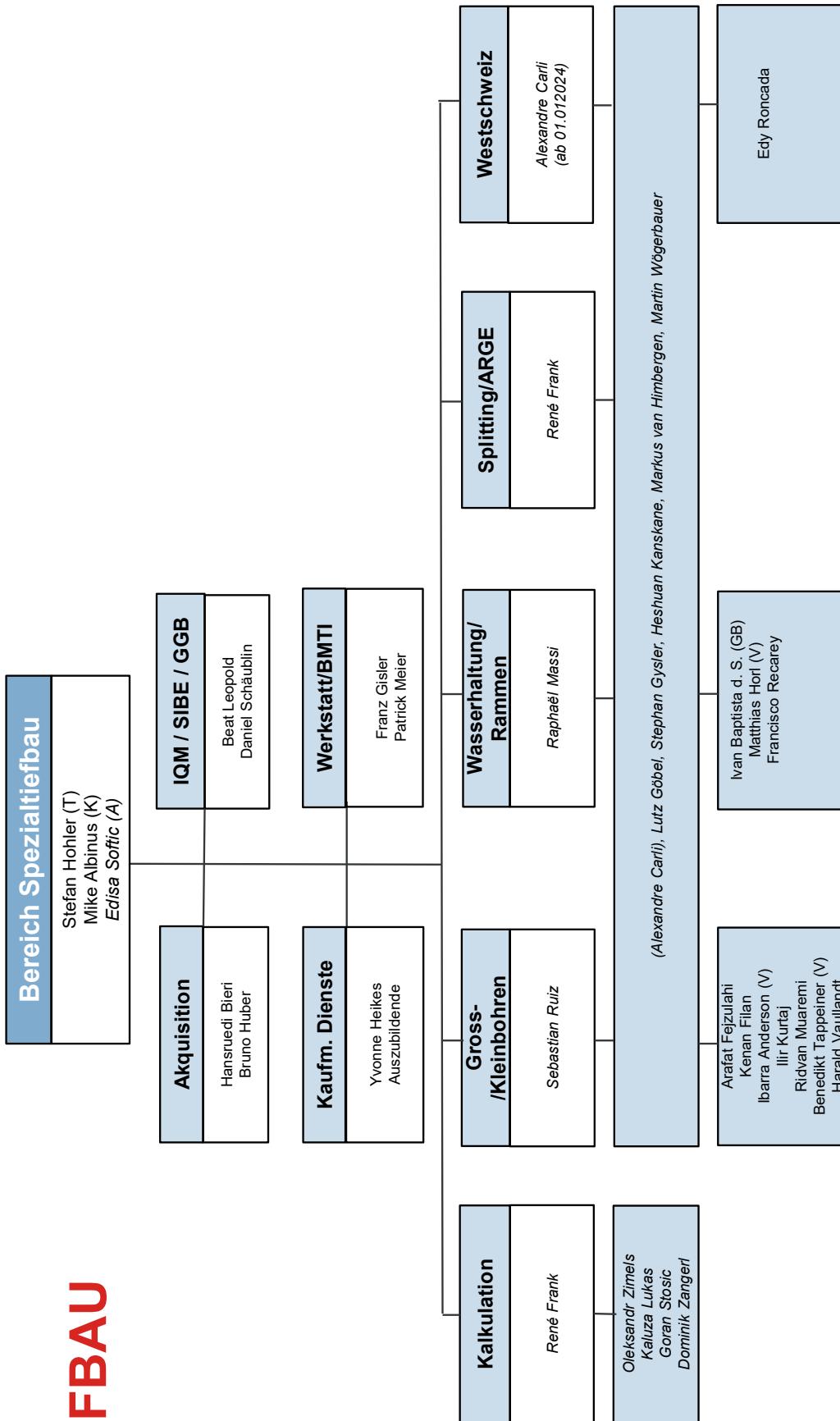
La conclusion obtenue de l'étude aura un impact direct sur les résultats futurs de Strabag sur cette étude et cette étude permettra de remporter plus de d'appels d'offres bien en marché privé que publics. Cela soulève également la nécessité d'améliorer la logistique des palplanches sur les dépôts pour garantir une gestion efficace des stocks.

Pour la suite, il serait judicieux de présenter ce travail à la direction géotechnique de Suisse, en collaboration avec Oleksandr Zimels, pour valider le phénomène en Suisse et de le normer selon les standards locaux.

Enfin, ma passion pour les travaux spéciaux et les missions qui m'ont été confiées m'incitent à poursuivre dans ce domaine. Ce PFE a été très enrichissant, mais je préfère m'orienter vers un poste plus proche du terrain plutôt que de continuer dans la conception et dans le dimensionnement. Je suis donc convaincu que cette expérience m'a préparé à relever de nouveaux défis dans les travaux spéciaux en tant que conducteur de travaux.

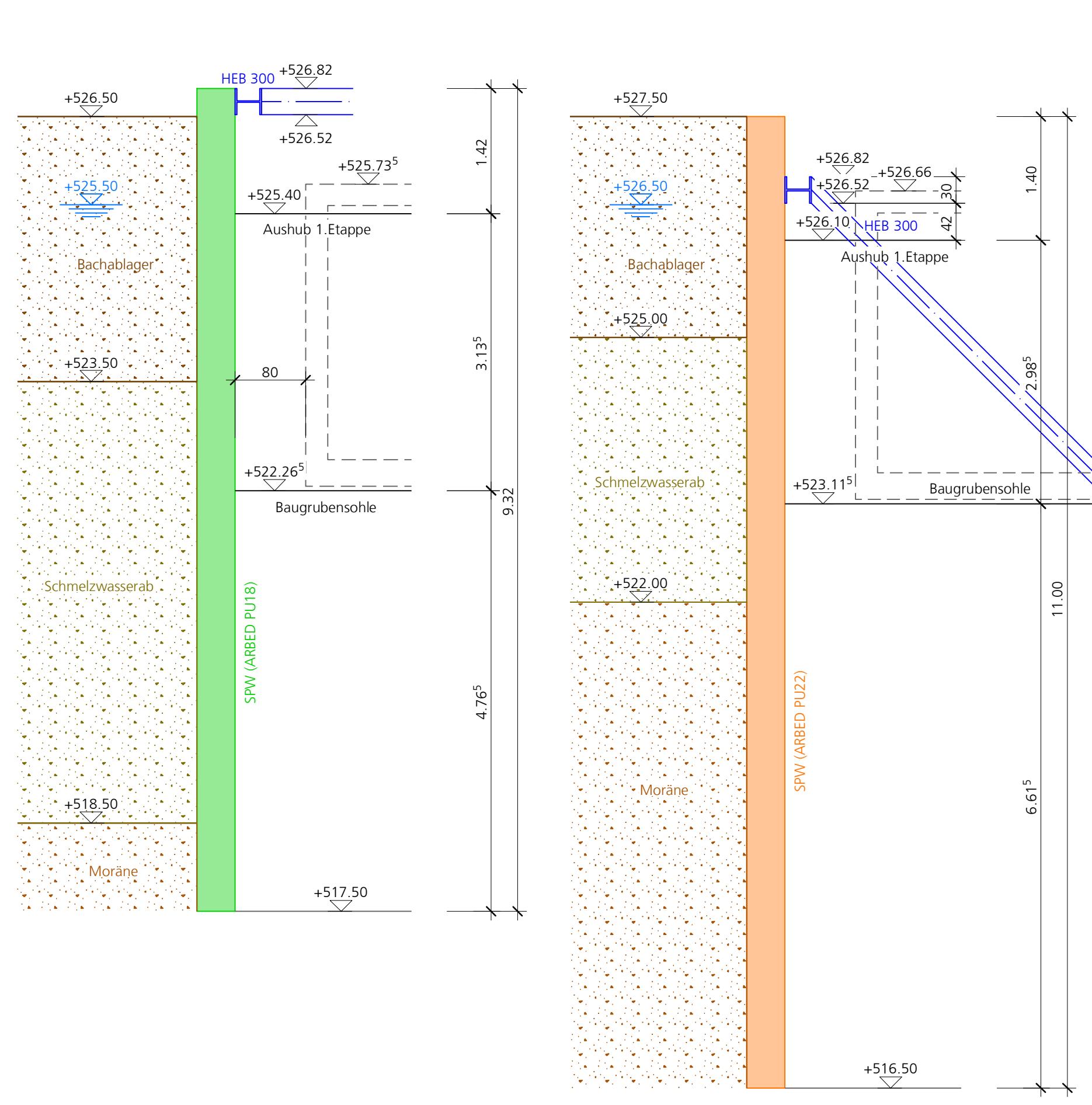
ANNEXES

DIR. MX JJ SPEZIALTIEFBAU

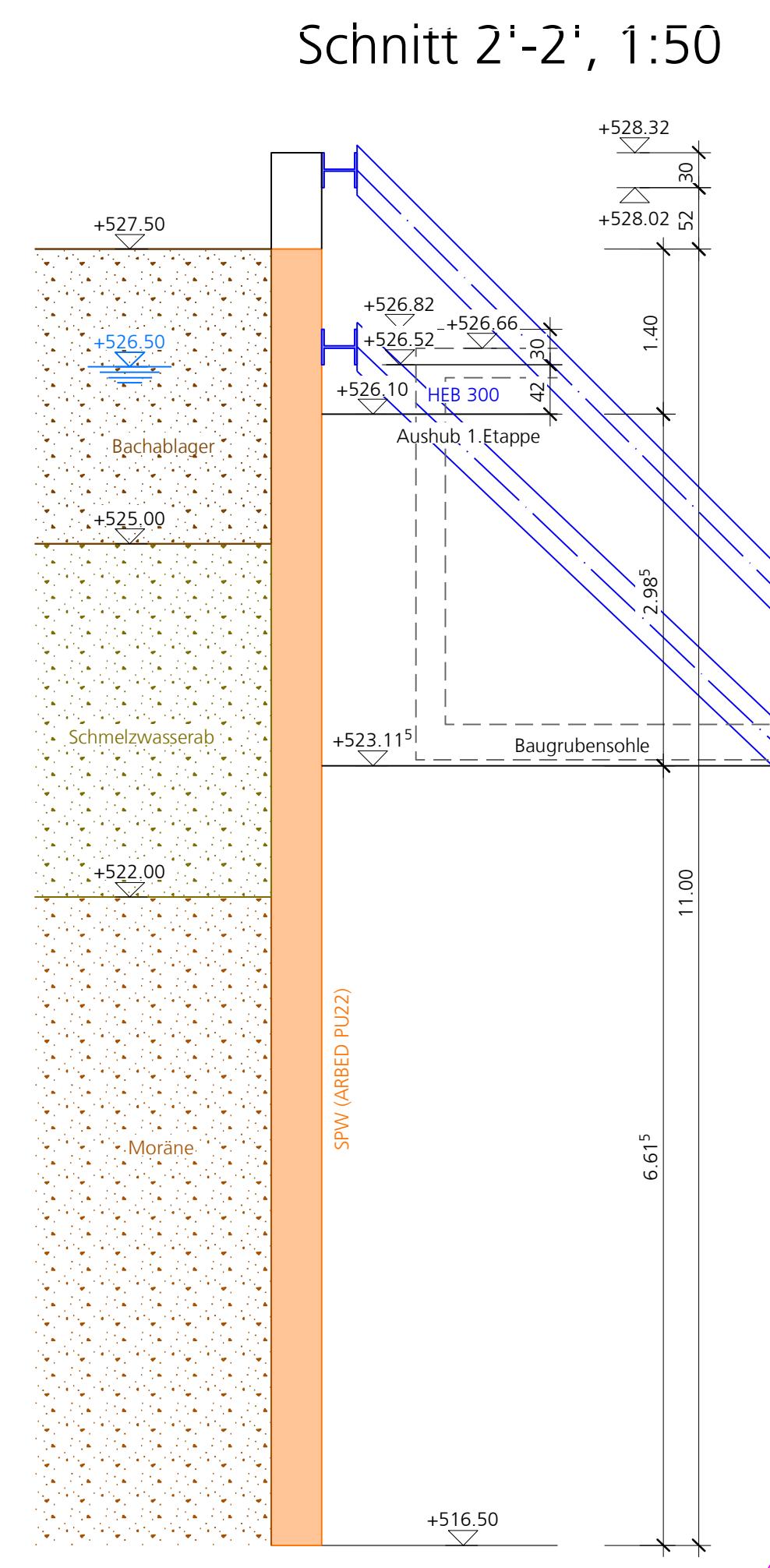


Grundriss 1:100

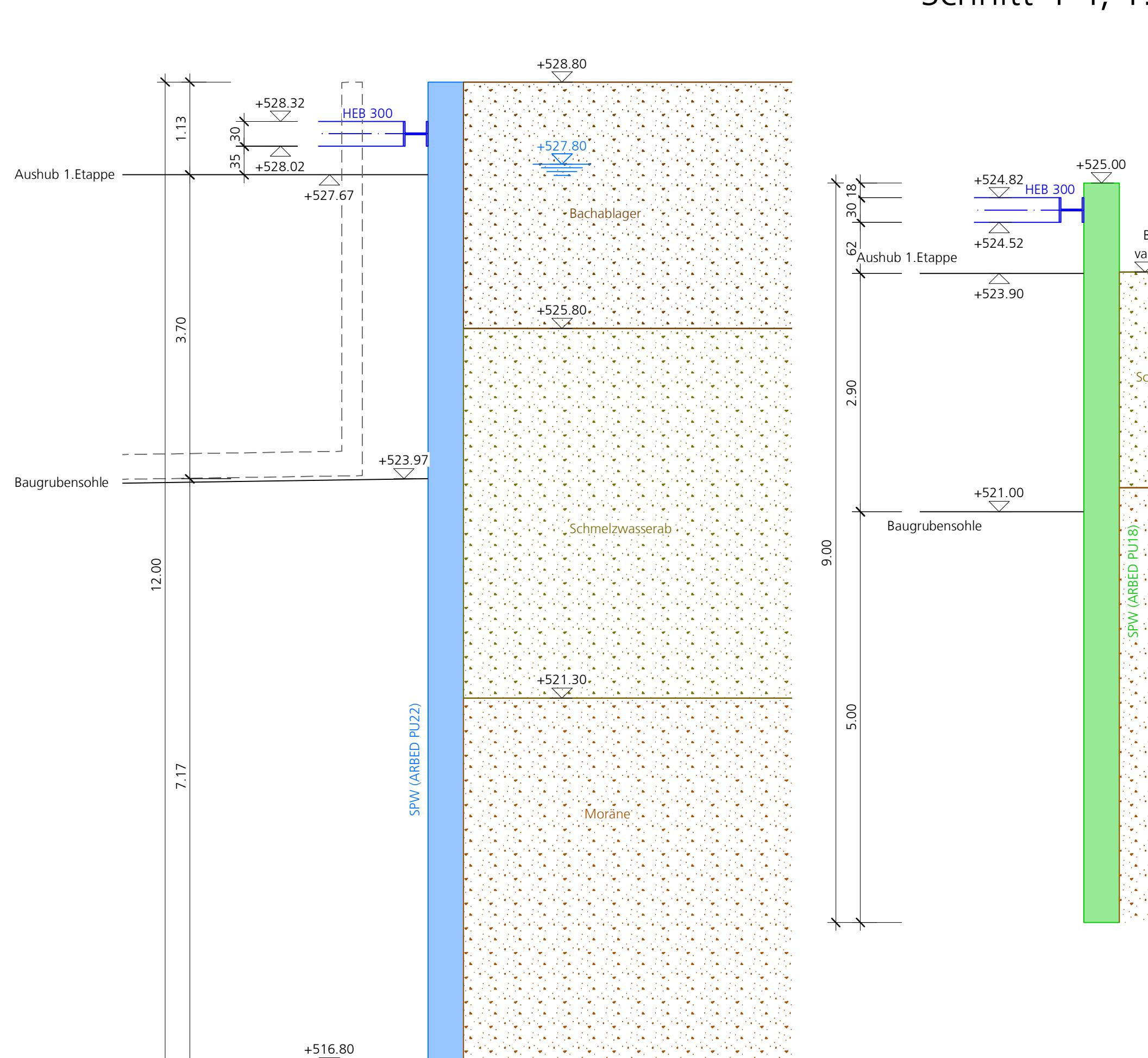
Schnitt 1-1, 1:50



Schnitt 2-2, 1:50



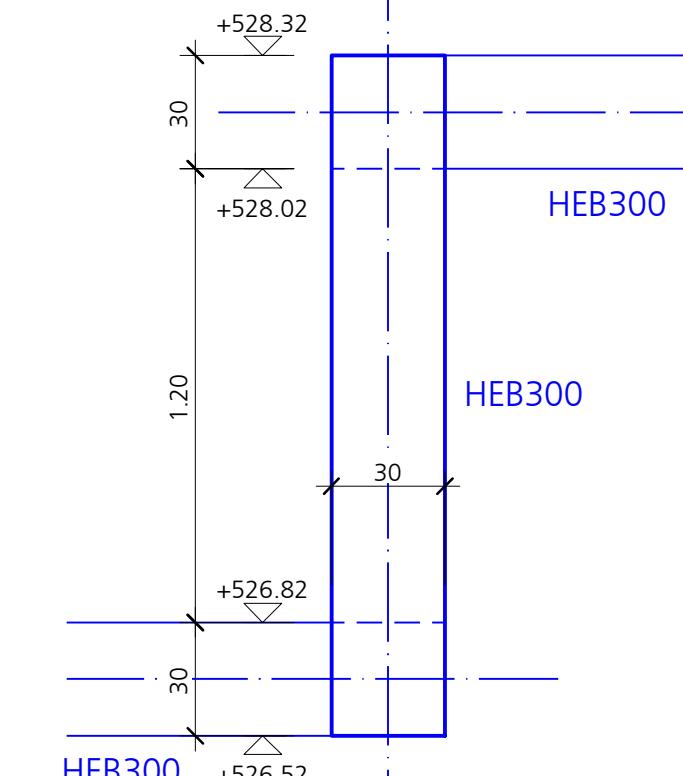
Schnitt 3-3, 1:50



Schnitt 4-4, 1:



Schema Vertikalspriessung 1:20



Legende Spundwand

chnitt 1-1	 ARBED PU18	L = 9.00m	Fläche: ~470m ²
chnitt 2-2	 ARBED PU22	L = 11.00m	Fläche: ~400m ²
chnitt 3-3	 ARBED PU22	L = 12.00m	Fläche: ~770m ²
chnitt 4-4	 ARBED PU18	L = 9.00m	Fläche: ~690m ²

Bauherr : W. Schmid Invest AG, Industriestr. 49, 6302 Zug
Objekt : WÜB am Gehrenbach, Unterdorfstrasse 1, 8966 Oberwil-Liel

Baugrubenverbau

- | | | | |
|--|-----------------|-----|----|
| - Mind. 24 Std. vor dem Betonieren ist der Ingenieur zur Abnahme der Bewehrung aufzubieten. | zug. Plan | Nr. | -- |
| | Bewehrungsliste | Nr. | -- |
| | Messelisten | Nr. | -- |

- Sämtliche Masse sind vom Unternehmer zu kontrollieren.	Stückliste	Nr.	--
	Gleitlagerliste	Nr.	--

$\pm 0.00 = 526.80$ m.ü.M.

Gesamtdruck Maßstab: 1:50/100

Grundriss Massstab 1:50/100								
Index	Datum	Aenderungen	gez.	gepr.	gen.	Biberist	geprüft:	genehmigt:
-	--	--	--	--	--	30.01.2020	gle	gle
-	--	--	--	--	--	gezeichnet: yho	Plan Nr.	14347 - 01
-	--	--	--	--	--	Grösse: 72 x 119		
-	--	--	--	--	--	Rolle Nr.: --		
-	--	--	--	--	--	K:\Statik\Oberwil-Lieli BL\14347 Baugrube Wuß am Gehrenbach\31 eigene Pläne\Vashubpläne\Vashubplan		

Annexe 3 : Mesure des déformations sur le chantier de Oberwil-Lieli

Differenzen

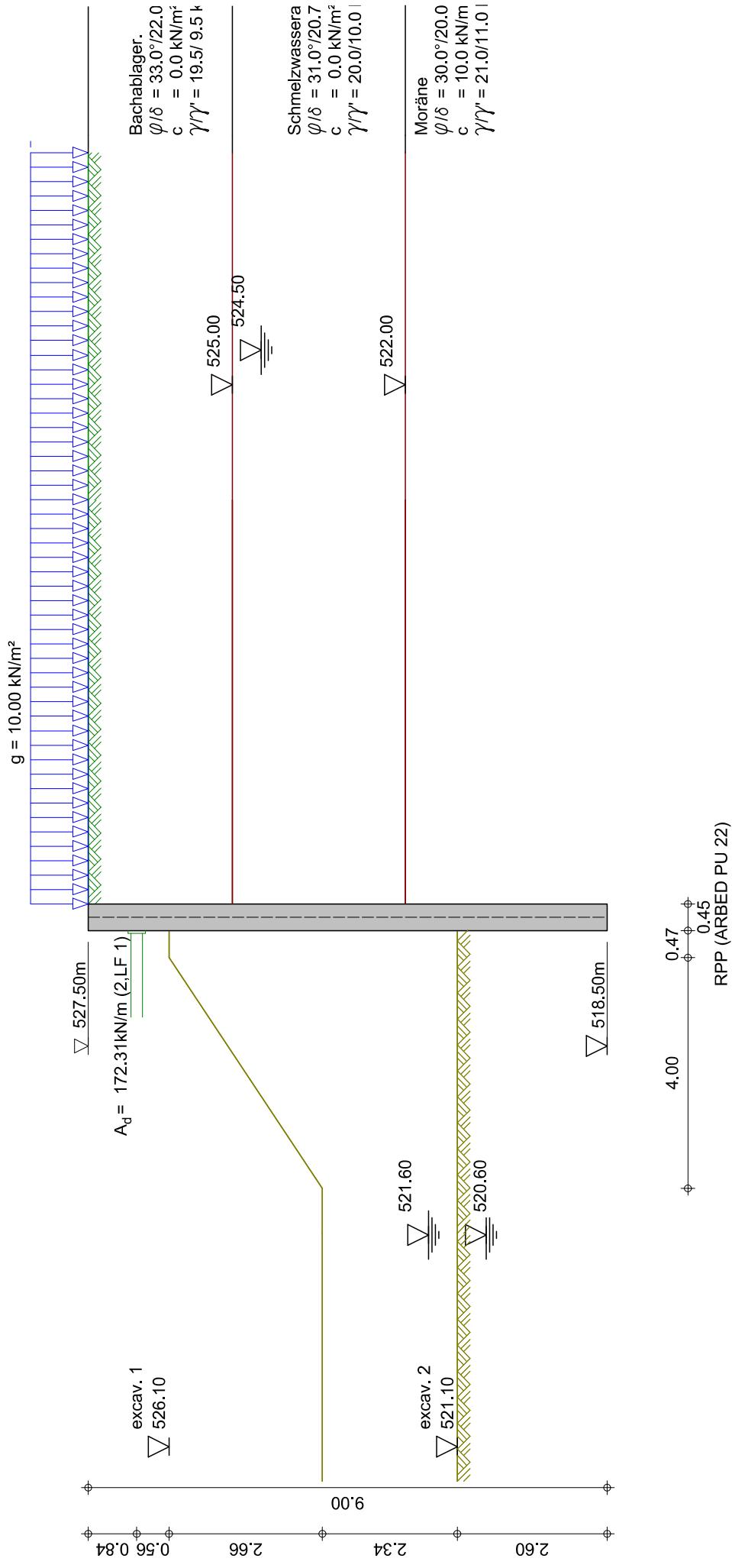
Einheit der Differenzen [mm] - Punktgenauigkeit (1 Sigma) = 2 mm

Abweichungen in der Summenbildung der Differenzen können aufgrund von Rundungen im 1mm-Bereich vorkommen.

Nullmessung	Folge 1						Folge 2						Folge 3						Folge 4													
	05.06.2020			15.06.2020			16.06.2020			18.06.2020			05.06.2020			22.06.2020			29.06.2020			06.07.2020			13.07.2020							
	1. zu 0.	1. zu 0.	2. zu 1.	2. zu 0.	3. zu 2.	3. zu 0.	4. zu 3.	4. zu 0.	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z			
R01	20.04.2020	-7	21	0	-7	21	0	-5	1	1	-12	23	1	0	2	0	-12	25	1	-2	1	0	-14	25	1							
R02	20.04.2020	0	137	1	0	137	1																									
R02N	15.06.2020							Nullmessung						1	5	0	1	5	0	0	5	0	0	10	0							
R03	20.04.2020	8	30	-1	8	30	-1	2	-2	0	10	28	-1	0	0	0	10	28	-1	2	1	0	12	28	0							
R04	20.04.2020	3	30	0	3	30	0	-3	2	0	0	31	0	0	0	0	0	31	0	1	1	0	2	32	0							
R05	20.04.2020	-3	1	-1	-3	1	-1	3	2	0	0	3	-1	-1	1	0	-1	4	-1	-2	-2	1	-2	3	0							
R06	05.06.2020		Nullmessung			-1	7	0	-1	7	0	1	3	1	0	9	1	-1	3	0	-1	13	2									
R07	22.06.2020																															
Nullmessung	Folge 5						Folge 6						Folge 7						Folge 8													
	22.06.2020			29.06.2020			06.07.2020			13.07.2020																						
	5. zu 4.	5. zu 0.	6. zu 5.	6. zu 0.	7. zu 6.	7. zu 0.	8. zu 7.	8. zu 0.	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z			
R01	20.04.2020	-4	2	0	-19	28	1	-2	2	0	-20	29	1	-2	1	0	-22	30	2	3	0	1	-19	30	2							
R02	20.04.2020																															
R02N	15.06.2020	0	2	1	0	13	1	-1	3	0	-1	15	1	0	3	1	-1	18	2	1	0	0	-1	18	3							
R03	20.04.2020	1	-4	1	13	25	0	-1	2	-1	12	27	-1	2	-1	1	14	26	0	-1	0	1	13	26	1							
R04	20.04.2020	-1	3	0	0	35	0	0	8	0	0	43	-1	1	-1	1	1	42	0	-1	1	1	-1	44	1							
R05	20.04.2020	3	0	-1	1	3	-2	0	2	-1	0	5	-3	-3	11	2	-2	16	-1	3	2	0	0	19	0							
R06	05.06.2020	1	0	0	0	13	2	-1	1	0	-1	14	2	1	2	1	0	16	2	-1	-2	1	-1	14	3							
R07	22.06.2020		Nullmessung			1	1	0	1	1	0	0	-1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1							
Nullmessung	Folge 9						Folge 10						Folge 11						Folge 12													
	20.07.2020			27.07.2020			25.09.2020			16.10.2020																						
	9. zu 8.	9. zu 0.	10. zu 9.	10. zu 0.	11. zu 10.	11. zu 0.	12. zu 11.	12. zu 0.	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	Z			
R01	20.04.2020	-3	0	0	-22	30	2	-1	0	0	-23	30	2	-4	8	-2	-27	38	0	2	3	0	-25	40	0							
R02	20.04.2020																															
R02N	15.06.2020	0	3	-1	-1	21	2	0	-1	0	-1	20	2	0	27	1	-1	47	3	-1	1	-1	-1	49	2							
R03	20.04.2020	1	1	-1	13	27	0	1	-1	1	14	26	1	2	8	-1	16	35	0	0	7	-1	16	42	0							
R04	20.04.2020	3	0	-1	2	44	0	-1	1	0	2	45	0	1	3	0	3	48	0	-3	2	-1	0	50	0							
R05	20.04.2020	1	-2	0	2	16	-1	-2	-2	1	0	15	0	-2	4	0	-2	18	0	1	3	-1	-1	21	-1							
R06	05.06.2020	1	3	-1	0	17	2	-1	0	0	-1	17	2																			
R07	22.06.2020	0	-1	-1	1	0	1	2	-1	1	3	-1	1																			

Légende :

- Travaux de terrassement (avant mise en place de la lierne)
- Travaux de terrassement (après mise en place de la lierne)
- Travaux de béton sous-œuvre (avec lierne)
- Retrait des palplanches (retrait de la lierne)



Seite	1
Sommaire	
Maßstab : 1: 100	

Programm DC-Baugrube/Win Version 23.2.12
Wohnüberbauung am Gehrenbach. Oberwil-Lieli 2-2. Einzelbohle

Fichier entrée: C:\Users\ZimelsOle\Desktop\Diplom-Spundwand\Oberwil\
2-2-EB.dbw

Calcul selon SIA 267

Information système

sommet paroi libre
poussée de terre active
sol non cohérent
cote sup. terrain à 527.50 m
niveau de la nappe 524.50 m
coefficients poussée de terre selon SIA 261

Construction paroi

Sec.	type paroi type profiles	x ₁ [m] x ₂ [m]	z ₁ [m] z ₂ [m]	E[MN/m ²] I[cm ⁴ /m] EI[MN*m ²]	A[cm ² /m] d[cm]	g[kN/m ³]
1	Rideau de palp. ARBED PU 22 (palpl.simples)	0.00 0.00	0.00 9.00	210000.00 1.4567E+04 30.59	182.90 45.00	78.50

Valeurs couche de terre		Bachablage	Schmelzwas serab	Moräne
hauteur couche	h	[m]	2.50	3.00
frottem. interne	φ'	[deg]	33.00	31.00
frottem. paroi actif	δ _a	[deg]	22.00	20.67
frottem. paroi passif	δ _p	[deg]	-16.50	-15.50
cohésion actif	c _a '	[kN/m ²]	0.0	0.0
cohésion passif	c _p '	[kN/m ²]	0.0	0.0
poids spé. sol		[kN/m ³]	19.5	20.0
poids spé. ss pous. Arch		[kN/m ³]	9.5	10.0
Frottement latéral		[MN/m ²]	0.00	0.00
Pression pointe		[MN/m ²]	0.00	0.00

Coefficients poussée de terre

coeff.p. terre	K _{agh}	(actif)	0.245	0.268	0.279
coeff.de cohésion	K _{ach}	(actif)	0.000	0.000	1.057
coeff.butée terre	K _{pgh}	(passif)	5.986	5.160	4.807
coeff.cohésion	K _{pch}	(passif)	0.000	0.000	4.385

Charges paroi et surcharges en coord.globales

Toutes charges et sollicit. se rapportent à 1 m largeur paroi

Charges linéaires sur le terrain

Cas charge	q	x _A	x _E	z _Q	Type
1 G	10.00	0.23	999.00	0.00	-

(G = permanent, Q = variable, B = de poids propre du sol)

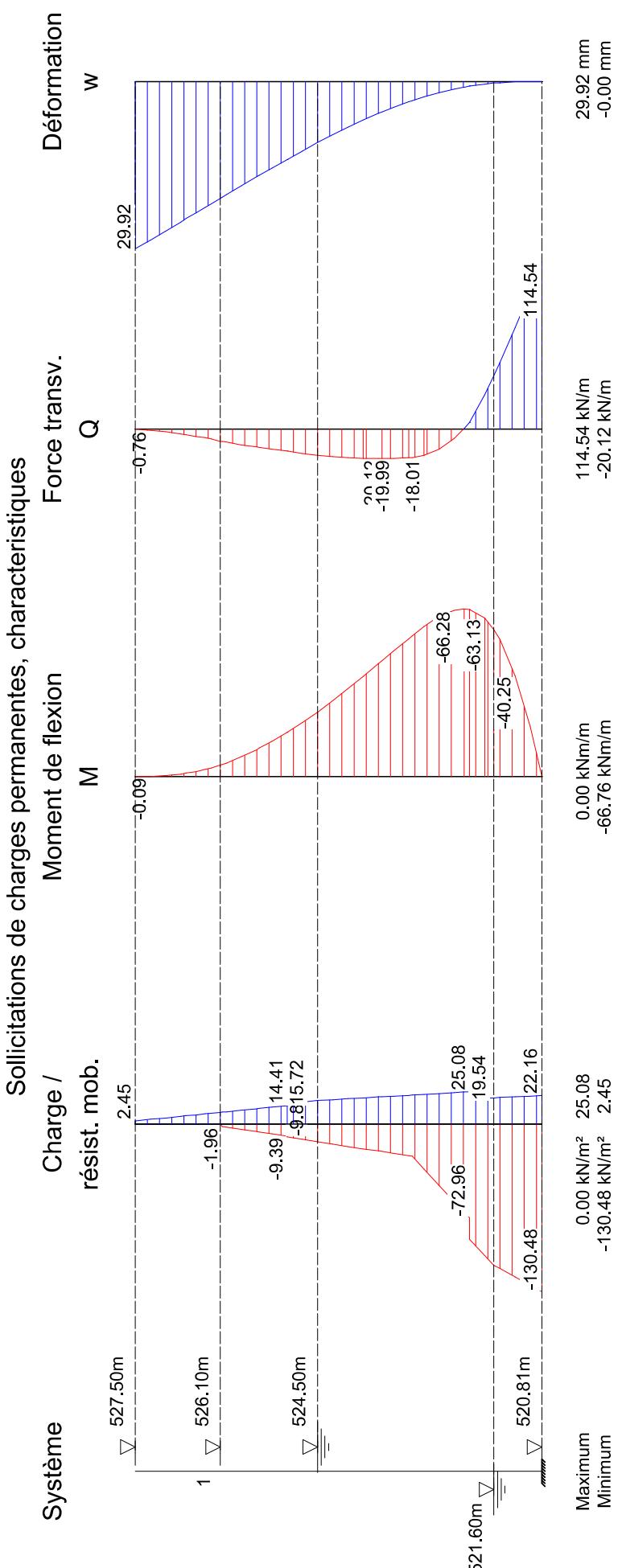
Coefficients sécu. partielle pour EL T.1 (renard hydr.)

γ-	G,sup	G,inf
	1.600	0.900

Détermination du longueur du paroi

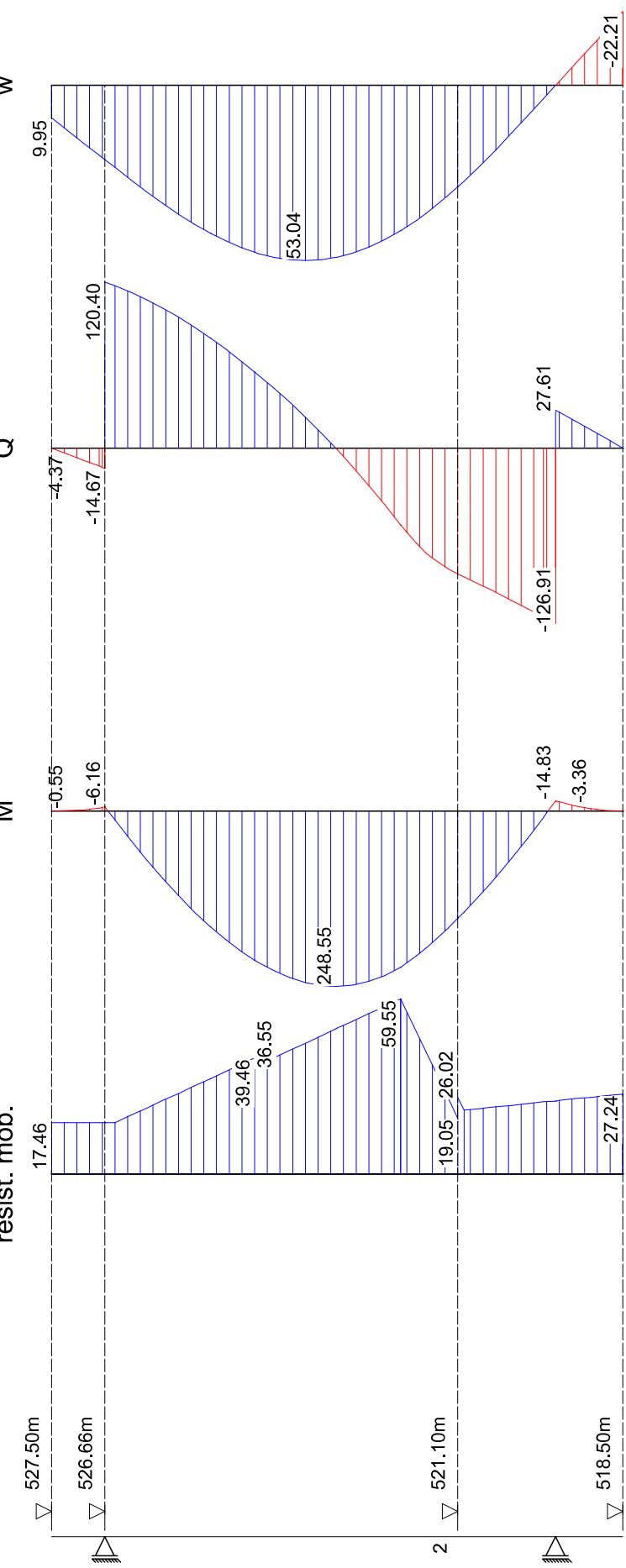
Coeff. de sécurité partielles pour EL T.2

γ-	G	E0g	W	L	OI	Q	Qv
	1.350	1.350	1.200	1.350	1.350	1.500	1.450
γ-	Ep	Wg	γ	φ	c	cu	R,h
	1.400	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
γ-	b	s					
	1.300	1.300					



Seite	11
Aushub	1
Lastfall	1
Maßstab :	1: 100

Sollicitations de charges totales, caractéristiques

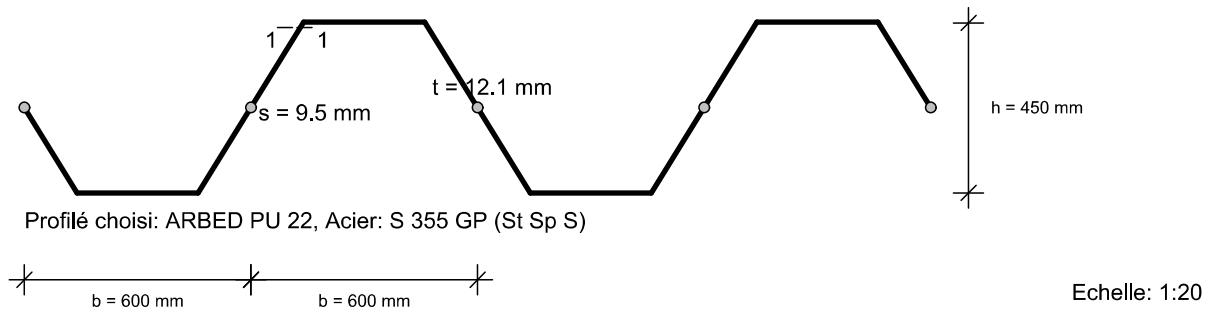


Maximum 120.40 kN/m
 Minimum -126.91 kN/m

Maximum 248.55 kNm/m
 Minimum -14.83 kNm/m

Maximum 53.04 mm
 Minimum -22.21 mm

Seite	21
Aushub	2
Lastfall	1
Maßstab :	1: 100

Dimensionnement du rideau de palplanches (jusqu'à 518.50 m)**Sollicitations déterminantes (par m' paroi):**

Coeff. sécurité

pour charges: γ_F selon EL Typ 2pour résistances: $\gamma_M = 1.00$

Sollicitations de dimensionnement

Moment déterm. $M_{\text{max},d} = 309.59 \text{ kNm}$ dans l'excavation 2 $N_{\text{corresp},d} = -48.06 \text{ kN}$ $V_d = 0.00 \text{ kN}$

en z = 4.46 m

Moment déterm. $M_{\text{min},d} = -68.50 \text{ kNm}$ dans l'excavation 1 $N_{\text{corresp},d} = -11.65 \text{ kN}$ $V_d = 0.00 \text{ kN}$

en z = 5.50 m

Effort tranch. déterm. $V_{\text{max},d} = 152.51 \text{ kN}$ dans l'excavation 2 $M_{\text{corresp},d} = -8.32 \text{ kNm}$ $N_{\text{corresp},d} = -9.63 \text{ kN}$

en z = 0.84 m

Profilé choisi: ARBED PU 22 (palplanches simples), Qualité d'acier: S 355 GP (St Sp S)

Valeurs de section du poutre:

Poids = 143.60 kg/m

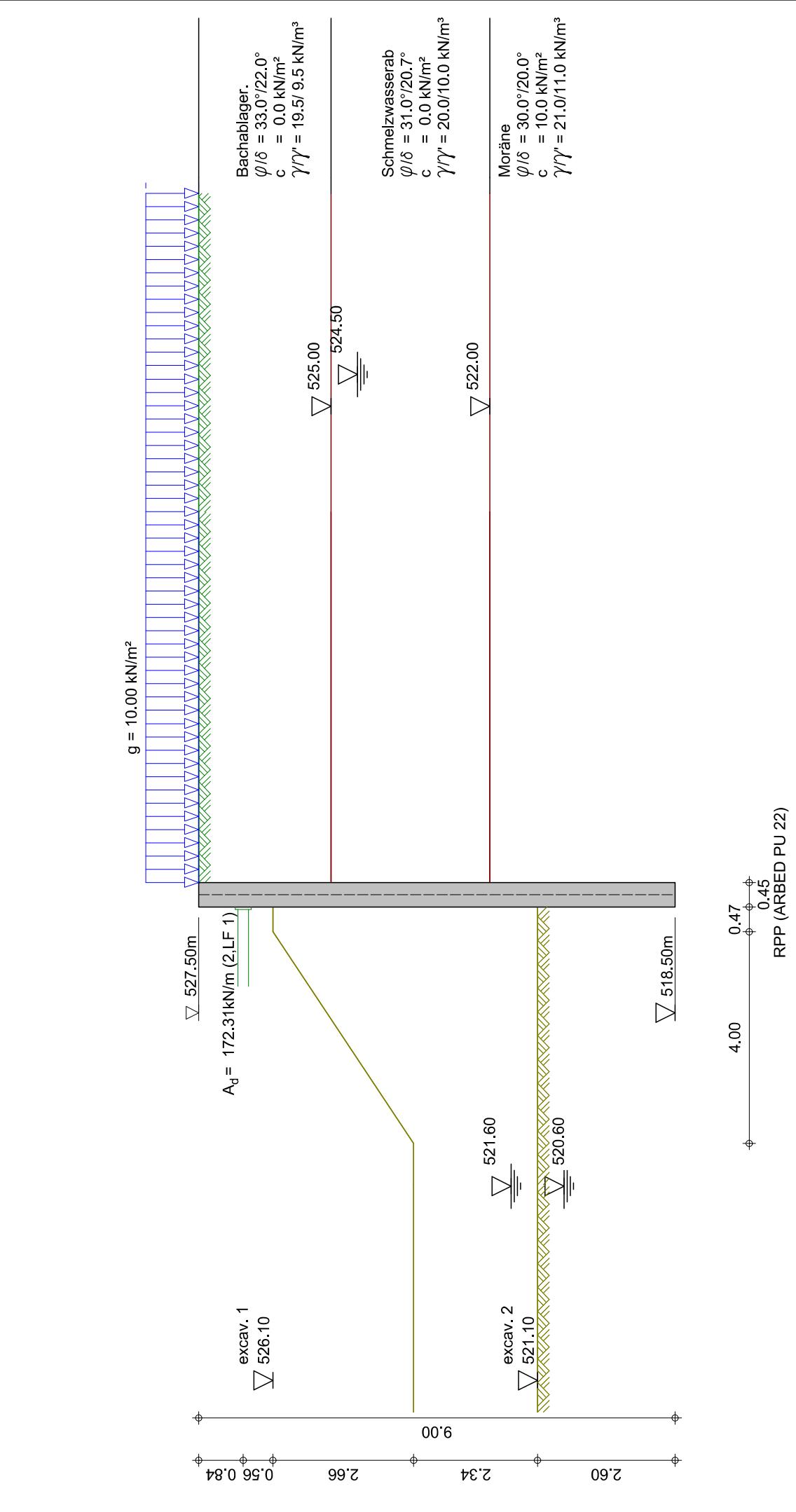
 $W_y = 910.00 \text{ cm}^3$ $A = 182.90 \text{ cm}^2$ $A_{\text{cisail}} = 69.33 \text{ cm}^2$ $EI = 30.59 \text{ MNm}^2$ Limite d'élasticité $f_{yk} = 355.00 \text{ MN/m}^2$

Résistances:

Contrainte de bord $\sigma_{rd} = 355.00 \text{ MN/m}^2$ Contrainte de cis. $\tau_{rd} = 204.96 \text{ MN/m}^2$ Contrainte de comp. $\sigma_{Vrd} = 355.00 \text{ MN/m}^2$ **Contrôles selon SIA 263:**

Dimensionnement élastique-élastique

Contrainte de flexion [MN/m ²]:	σ_d	=	σ_{Nd}	+	σ_{Md}	σ_d/σ_{rd}	Contrôle ok
M max. (z = 4.46)	342.84	=	2.63	+	340.21	0.97	Oui
M min. (z = 5.50)	75.91	=	0.64	+	75.27	0.21	Oui
Contrainte de cis. [MN/m ²]:	τ_d				τ_d/τ_{rd}	0.11	Contrôle ok
V max. (z = 0.84)	22.00						Oui
Contrainte de comp. [MN/m ²]:	σ_{Vd}	de	σ_d		τ_d	σ_{Vd}/σ_{Vrd}	Contrôle ok
(Contrôle à la section d'âme)	324.55		324.55		0.00	0.91	Oui



Seite	1
Sommaire	
Maßstab :	1: 100

Programm DC-Baugrube/Win Version 23.2.12
Wohnüberbauung am Gehrenbach. 2-2. Doppelbohle

Fichier entrée: C:\Users\ZimelsOle\Desktop\Diplom-Spundwand\Oberwil
2-2-DB.dbw

Calcul selon SIA 267

Information système

sommet paroi libre
poussée de terre active
sol non cohérent
cote sup. terrain à 527.50 m
niveau de la nappe 524.50 m
coefficients poussée de terre selon SIA 261

Construction paroi

Sec.	type paroi	x ₁ [m]	z ₁ [m]	E[MN/m ²]	A[cm ² /m]	g[kN/m ³]
	type profiles	x ₂ [m]	z ₂ [m]	I[cm ⁴ /m]	d[cm]	
1	Rideau de palp.	0.00	0.00	210000.00	182.90	78.50
	ARBED PU 22 (palpl.doubles)	0.00	9.00	4.9460E+04	45.00	
				103.87		

Valeurs couche de terre		Bachablage	Schmelzwas serab	Moräne
		r.		
hauteur couche	h	[m]	2.50	3.00
frottem. interne	φ'	[deg]	33.00	31.00
frottem. paroi actif	δ _a	[deg]	22.00	20.67
frottem. paroi passif	δ _p	[deg]	-16.50	-15.50
cohésion actif	c _a '	[kN/m ²]	0.0	0.0
cohésion passif	c _p '	[kN/m ²]	0.0	0.0
poids spé. sol		[kN/m ³]	19.5	20.0
poids spé. ss pous. Arch		[kN/m ³]	9.5	10.0
Frottement latéral		[MN/m ²]	0.00	0.00
Pression pointe		[MN/m ²]	0.00	0.00

Coefficients poussée de terre

coeff.p. terre	K _{agh}	(actif)	0.245	0.268	0.279
coeff.de cohésion	K _{ach}	(actif)	0.000	0.000	1.057
coeff.butée terre	K _{pgh}	(passif)	5.986	5.160	4.807
coeff.cohésion	K _{pch}	(passif)	0.000	0.000	4.385

Charges paroi et surcharges en coord.globales

Toutes charges et sollicit. se rapportent à 1 m largeur paroi

Charges linéaires sur le terrain

Cas charge	q	x _A	x _E	z _Q	Type
1 G	10.00	0.23	999.00	0.00	-

(G = permanent, Q = variable, B = de poids propre du sol)

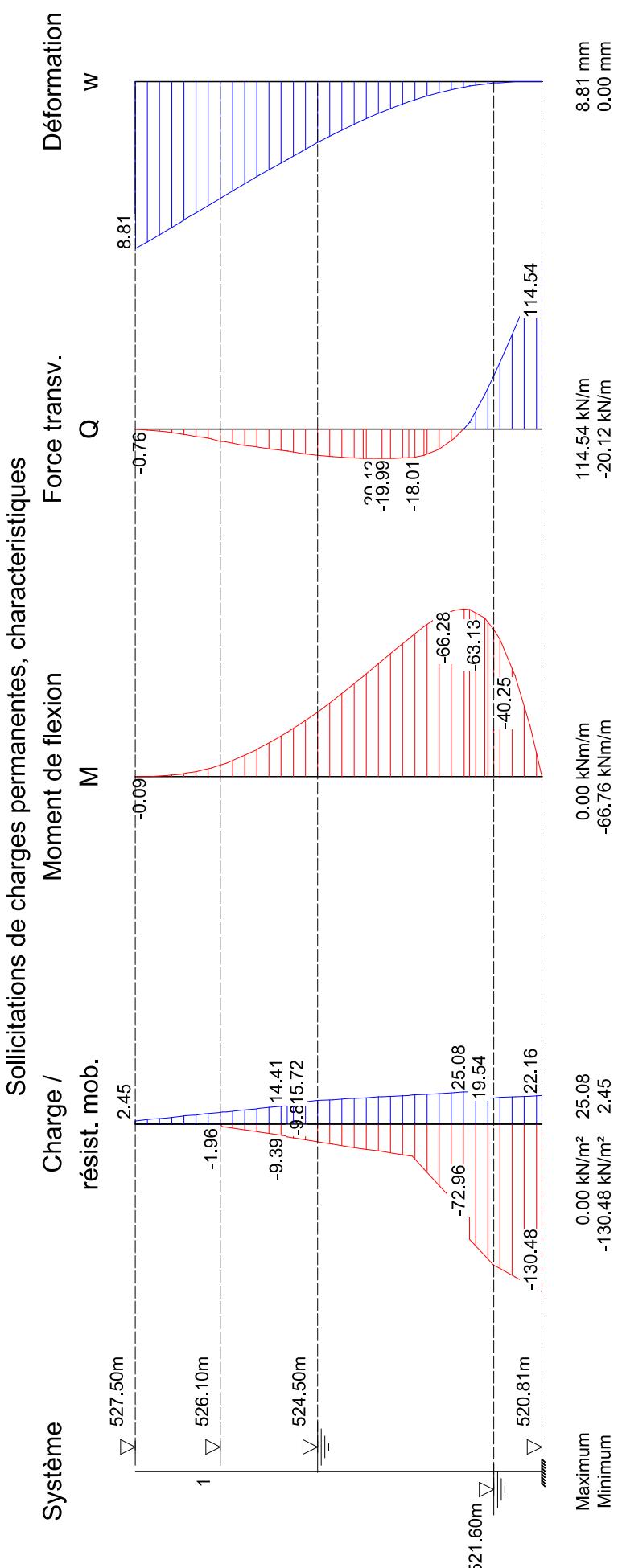
Coefficients sécu. partielle pour EL T.1 (renard hydr.)

γ-	G,sup	G,inf
	1.600	0.900

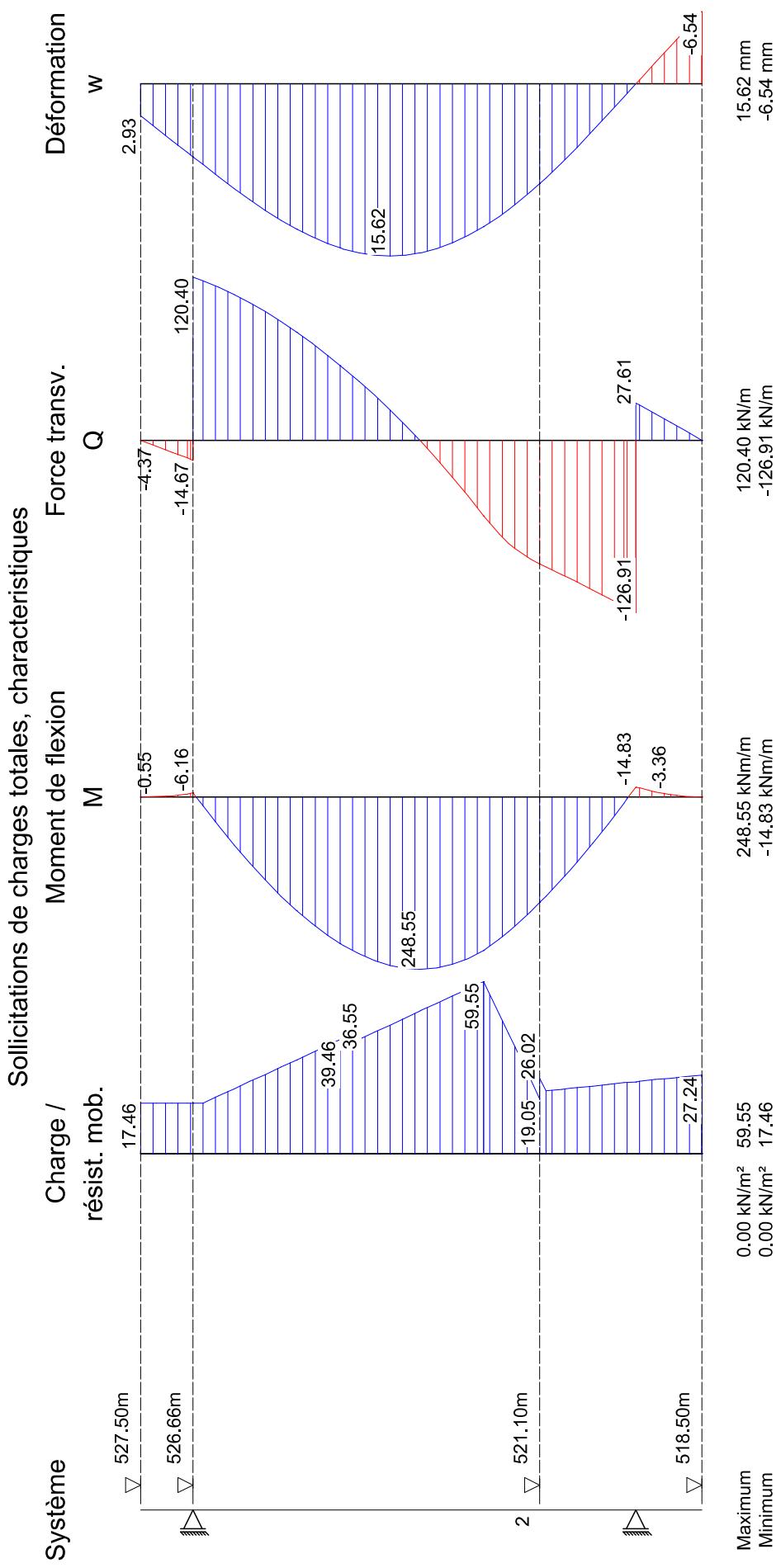
Détermination du longueur du paroi

Coeff. de sécurité partielles pour EL T.2

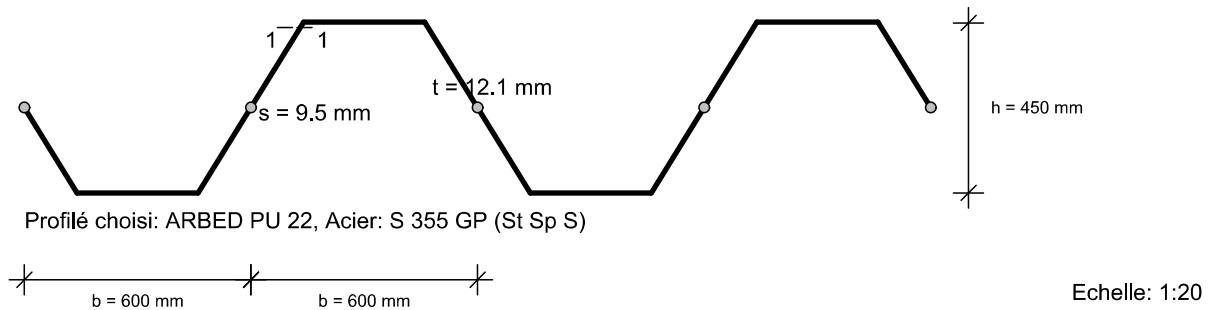
γ-	G	E0g	W	L	OI	Q	Qv
	1.350	1.350	1.200	1.350	1.350	1.500	1.450
γ-	Ep	Wg	γ	φ	c	cu	R,h
	1.400	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
					b		s
						1.300	1.300



Seite	11
Aushub	1
Lastfall	1
Maßstab :	1: 100



Seite	21
Aushub	2
Lastfall	1
Maßstab :	1 : 100

Dimensionnement du rideau de palplanches (jusqu'à 518.50 m)**Sollicitations déterminantes (par m' paroi):**

Coeff. sécurité

pour charges: γ_F selon EL Typ 2pour résistances: $\gamma_M = 1.00$ **Sollicitations de dimensionnement**Moment déterm. $M_{\text{max},d} = 309.56 \text{ kNm}$ dans l'excavation 2 $N_{\text{corresp},d} = -48.39 \text{ kN}$ $V_d = 2.15 \text{ kN}$

en z = 4.50 m

Moment déterm. $M_{\text{min},d} = -68.50 \text{ kNm}$ dans l'excavation 1 $N_{\text{corresp},d} = -11.65 \text{ kN}$ $V_d = 0.00 \text{ kN}$

en z = 5.50 m

Effort tranch. déterm. $V_{\text{max},d} = 152.51 \text{ kN}$ dans l'excavation 2 $M_{\text{corresp},d} = -8.32 \text{ kNm}$ $N_{\text{corresp},d} = -9.63 \text{ kN}$

en z = 0.84 m

Profilé choisi: ARBED PU 22 (palplanches doubles), Qualité d'acier: S 355 GP (St Sp S)

Valeurs de section du poutre:

Poids = 143.60 kg/m

 $W_y = 2200.00 \text{ cm}^3$ $A = 182.90 \text{ cm}^2$ $A_{\text{cisail}} = 69.33 \text{ cm}^2$ $EI = 103.87 \text{ MNm}^2$ Limite d'élasticité $f_{yk} = 355.00 \text{ MN/m}^2$

Résistances:

Contrainte de bord $\sigma_{rd} = 355.00 \text{ MN/m}^2$ Contrainte de cis. $\tau_{rd} = 204.96 \text{ MN/m}^2$ Contrainte de comp. $\sigma_{Vrd} = 355.00 \text{ MN/m}^2$ **Contrôles selon SIA 263:**

Dimensionnement élastique-élastique

Contrainte de flexion [MN/m ²]:	σ_d	=	σ_{Nd}	+	σ_{Md}	σ_d/σ_{rd}	Contrôle ok
M max. (z = 4.50)	143.35	=	2.65	+	140.71	0.40	Oui
M min. (z = 5.50)	31.77	=	0.64	+	31.14	0.09	Oui

Contrainte de cis. [MN/m ²]:	τ_d		τ_{rd}	τ_d/τ_{rd}	Contrôle ok
V max. (z = 0.84)	22.00			0.11	Oui

Contrainte de comp. [MN/m ²]:	σ_{Vd}	de	σ_d	τ_d	σ_{Vd}/σ_{Vrd}	Contrôle ok
(Contrôle à la section d'âme)	135.79	de	135.79	0.31	0.38	Oui