



AZ sheet piles in combined walls
Les palplanches AZ dans les rideaux mixtes
AZ-Zwischenbohlen in kombinierten Wänden



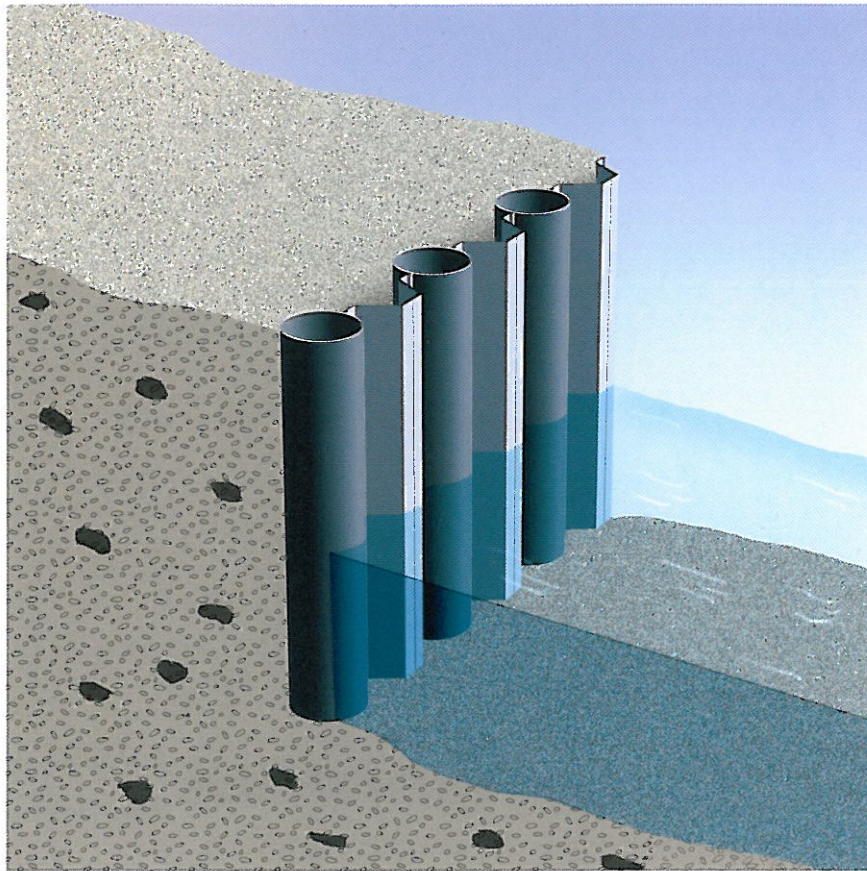


Figure 1:
Combined wall with
AZ intermediate
sheet piles

Figure 1:
Rideau mixte tubes-
palplanches avec
palplanches inter-
calaires AZ

Abbildung 1:
Kombinierte Rohr-
spundwand mit AZ-
Zwischenbohlen

AZ sheet piles in combined walls

1. Introduction

ProfilARBED appointed Liege University's Structural Steelwork Department to conduct a detailed study to demonstrate the excellent behaviour of AZ sheet piles when used as intermediate sheeting in combined walls (see Figure 1). This study included not only laboratory testing but also numerical simulations. It demonstrated that these sheet piles can in fact withstand a hydraulic head of more than 50 m without failing. It can therefore be said that a method for verifying AZ sheet piles based simply on the theory of elasticity can offer only a very uneconomic approximation of their actual behaviour.

(Section 8.1.4.2 of EAU1996 [1] calls for verification of intermediate sheeting for water heads exceeding 4 m!).

Palplanches AZ dans les rideaux mixtes

1. Introduction

ProfilARBED, souhaitant démontrer l'excellent comportement des palplanches AZ utilisées comme palplanches intercalaires dans les rideaux mixtes (figure 1), a chargé le Département MSM (Laboratoire de mécanique des structures) de l'Université de Liège (B) de réaliser une étude détaillée. Cette étude, qui comportait à la fois des essais en laboratoire et des simulations numériques, a permis de montrer que les palplanches résistaient sans problème à une pression hydrostatique correspondant à une colonne d'eau de plus de 50 m. Une méthode de vérification des palplanches AZ simplement basée sur la théorie de l'élasticité ne saurait donc fournir qu'une approximation fort peu économique de leur comportement réel. (On notera que le paragraphe 8.1.4.2 des recommandations EAU1996 [1] exige une vérification des palplanches intercalaires à partir d'une pression hydrostatique correspondant à une colonne d'eau de 4 m.)

AZ-Zwischenbohlen in kombinierten Wänden

1. Einleitung

Mit dem Ziel, das ausgezeichnete Verhalten der AZ als Zwischentafeln für kombinierte Rohrspundwände (siehe Abb.1) zu belegen ließ ProfilARBED am Stahlbaulehrstuhl der Universität Lüttich (B) eine umfangreiche Untersuchung durchführen. Diese Untersuchung umfasste sowohl Laborversuche als auch numerische Simulationen. Es konnte gezeigt werden, dass diese Bohlen problemlos einem Wasserdruck von über 50m widerstehen können, ohne dass es dabei zum Versagen kommt. Ein Nachweiskonzept für die AZ-Zwischenbohlen, welches auf der Elastizitätstheorie fußt, kann somit nur eine sehr unwirtschaftliche Näherung des tatsächlichen Tragverhaltens liefern. (Laut Abschn. 8.1.4.2 der EAU1996 [1] ist ab einem Wasserdruck von 4m ein Nachweis der Zwischentafeln erforderlich!).

2. Laboratory testing

In all, nine large scale tests were carried out on AZ13, AZ18 and AZ26 sections [2]. Figure 2 shows the test set-up. A sample sheet pile length of 1 metre was chosen. The inside face of the casing plates was PTFE-coated to ensure an in-plane displacement pattern of the sheet piles. Compared to site conditions, where some part of forces is always transmitted longitudinally, this arrangement provides a good safety margin. A rubber airbag was used to exert loading as realistically as possible. Maximum test pressures applied are shown in Table 1. S355GP grade steel was used for the tests. Except in the case of the AZ26 sections, no sheet pile failure was achieved in the tests (the airbag burst first). It may therefore be assumed that actual failure pressures for the AZ13 and AZ18 sections are even higher than the maximum test pressures.

2. Essais en laboratoire

Au total, 9 essais à grande échelle ont été réalisés; ils ont porté sur des palplanches AZ13, AZ18 et AZ26 [2]. Le montage expérimental apparaît sur la figure 2. Les palplanches avaient une longueur de 1m. Les faces internes du montage étaient recouvertes de téflon de manière à assurer un comportement plan. Comparée aux conditions réelles, pour lesquelles il se produit toujours une transmission des efforts dans le sens longitudinal, cette hypothèse se situe du côté de la sécurité. Par ailleurs, afin d'assurer une application des pressions aussi réaliste que possible, celle-ci a été réalisée au moyen d'un coussin en caoutchouc rempli d'air. Les pressions maximales obtenues lors des essais sont données dans le tableau 1. L'acier utilisé était un acier S355GP. Sauf dans le cas des AZ26, l'essai n'a pas permis d'atteindre la rupture des palplanches (le coussin éclatait avant). On peut donc admettre que dans le cas des palplanches AZ13 et AZ18, la pression à la rupture est supérieure aux valeurs maximales enregistrées.

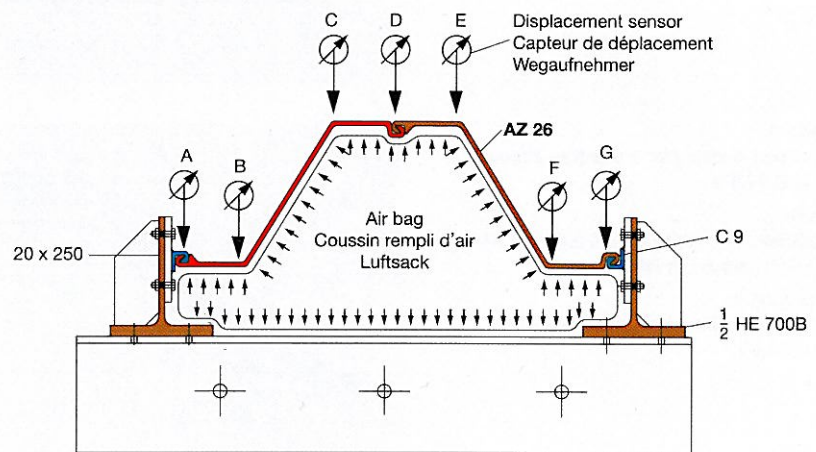
2. Laborversuche

Insgesamt wurden an der technischen Universität Lüttich 9 großmaßstäbliche Versuche an AZ13, AZ18 und AZ26 durchgeführt [2]. Der Versuchsaufbau ist in Abb.2 dargestellt. Die Länge der Bohlen betrug 1m. Die Stirnwände wurden mit Teflon beschichtet um ein ebenes Verhalten der Bohlen sicherzustellen. Diese Annahme befindet sich gegenüber den Verhältnissen bei einer tatsächlichen Wand, wo stets auch eine Längsabtragung stattfindet, auf der sicheren Seite. Um eine möglichst realistische Lasteinleitung zu gewährleisten erfolgte diese über einen Luftsack aus Kautschuk. Die in den Versuchen erzielten Maximallasten sind in Tabelle 1 angegeben. Bei dem verwendeten Stahl handelte es sich um einen S355GP. Außer bei den AZ26 konnte im Versuch kein Versagen der Bohlen (wohl aber des Luftsacks) erreicht werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Versagenslasten der AZ13 und AZ18 noch höher liegen.

Table 1: Test results
Tableau 1: Résultats des essais
Tabelle 1: Versuchsergebnisse

| Test Essai Versuch | Maximum pressure Pression maximale Maximale Belastung [MPa] |
|--------------------------|--|
| AZ13_A2 | 0,306 |
| AZ13_A3 | 0,422 |
| AZ13_V1 | 0,593 |
| AZ18_1 | 0,631 |
| AZ18_2 | 0,633 |
| AZ18_3 | 0,633 |
| AZ26_1 | 0,406 |
| AZ26_2 | 0,360 |
| AZ26_3 | 0,403 |

Figure 2: Test set-up with air bag
Figure 2: Montage expérimental avec coussin rempli d'air
Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Luftsack



3. Numerical simulation

Based on the test results, a numerical model was calibrated at the Structural Steelwork Department using FINEL-G finite element software [3]. This tool is particularly suited to the consideration of geometrical and material-related non-linearities. Similarly, interlock swing and strain hardening of the steel were taken into account. Figure 3 reveals the total agreement between the simulation and test results in the most usual load range (hydraulic head ≤ 40 m). Numerical simulation results provide an insight into the excellent behaviour of AZ sheet piles resulting from their geometry. Figure 4 shows that plastic deformation is chiefly concentrated in corners B and F of the sheet pile and is lesser at the interlock zones. This is notably confirmed by the test results; see figure 4 and 5. From a certain level, by an increase in pressure, the sheet pile sectional profile tends gradually towards a circular arc and the load transfer is therefore increasingly provided by a membrane (tension)

3. Simulation numérique

A partir des résultats expérimentaux, le département MSM (Laboratoire de Mécanique des Structures) de l'université de Liège a étalonné un modèle numérique en utilisant pour cela le programme aux éléments finis FINEL-G [3]. Celui-ci se prête particulièrement bien à la prise en compte des non-linéarités géométriques et matérielles. Il a également été tenu compte, dans le calcul, du jeu de rotation dans les serrures ainsi que de l'écroutissage de l'acier. La figure 3 montre l'excellente concordance entre les résultats de la simulation et les essais pour la partie de la courbe correspondant aux conditions rencontrées dans la pratique (pression hydrostatique ≤ 40 m). Les résultats de la simulation numérique mettent en évidence le comportement remarquable des palplanches AZ, dû à leur géométrie. La figure 4 montre que les déformations plastiques sont essentiellement concentrées dans les angles B et F de la palplanche, avec une déformation moindre au niveau des serrures. Ceci est confir-

3. Numerische Simulation

Anhand der Versuchsergebnisse wurde am Stahlbaulehrstuhl ein numerisches Modell kalibriert, wobei das Finite-Elemente-Programm FINEL-G zum Einsatz kam [3]. Dieses eignet sich besonders zur Berücksichtigung von geometrischen und materialmäßigen Nichtlinearitäten. Ebenfalls berücksichtigt wurde das Rotationsspiel in den Schlössern sowie die Verfestigung des Stahls. Abbildung 3 zeigt die ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Simulation und der Versuche im praxisrelevanten Bereich (Wasserdruck ≤ 40 m). Die Ergebnisse der numerischen Simulation geben einen Einblick in das ausgezeichnete Tragverhalten der AZ-Bohlen, dessen Ursache in der Geometrie dieser Spundbohlen liegt. Aus Abb. 4 ist ersichtlich, dass der maßgebliche Teil der plastischen Verformungen in den Profillecken B und F konzentriert ist und weniger im Bereich der Schlösser. Dies wird auf eindrucksvolle Art und Weise durch die Versuche be-

Figure 3:
Comparison of test results and simulations results

Figure 3:
Comparaison des résultats d'essais et de simulations

Abbildung 3:
Vergleich zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen

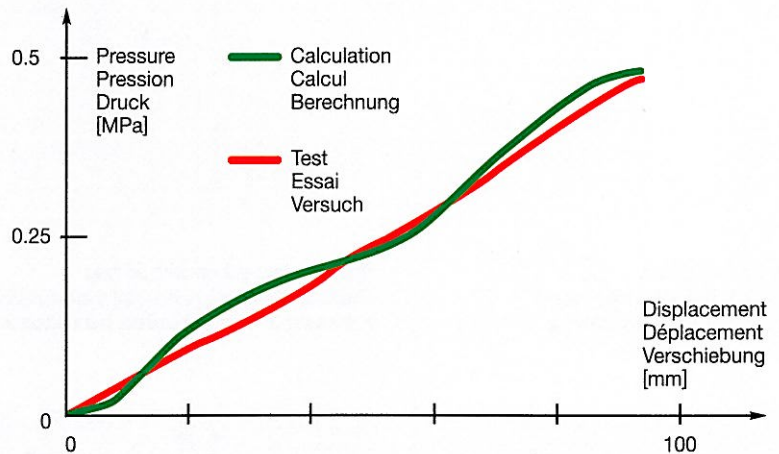
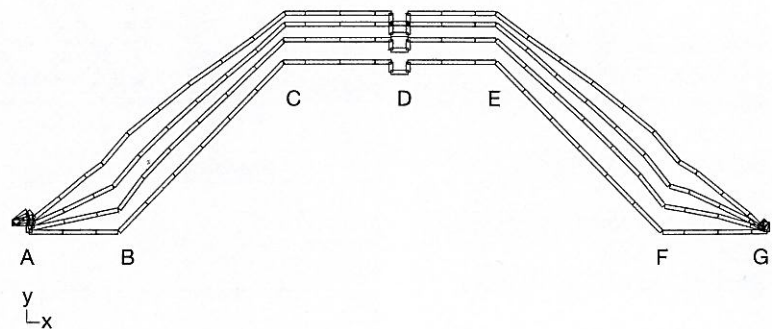


Figure 4:
Deformed structure for a pressure increase up to 0.5 MPa

Figure 4:
Structure déformée pour une augmentation de pression jusque 0,5 MPa

Abbildung 4:
Verformte Struktur bei Drucksteigerung bis 0,5 MPa



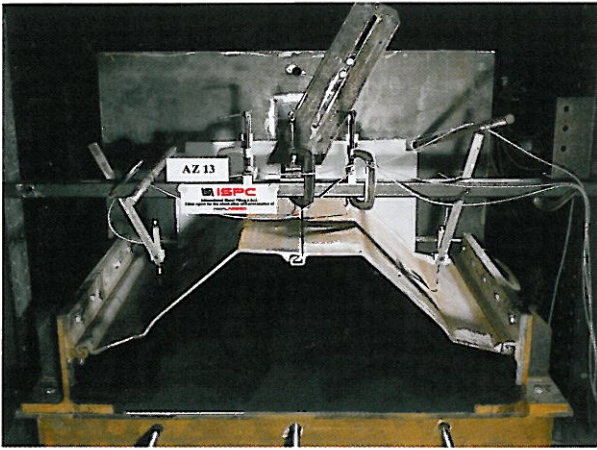


Figure 5a:
Deformed intermediate sheet pile after load test.

Figure 5a:
Palplanche intermédiaire déformée après mise sous charge.
Abbildung 5a:
Verformte Zwischenbohlen nach Belastungsversuch.



Figure 5b:
Concentration of the plastic deformations in the corner of the section angle.

Figure 5b:
Concentrations des déformations plastiques dans l'angle du profil.
Abbildung 5b:
Konzentration der plastischen Verformung in der Bohlenecke

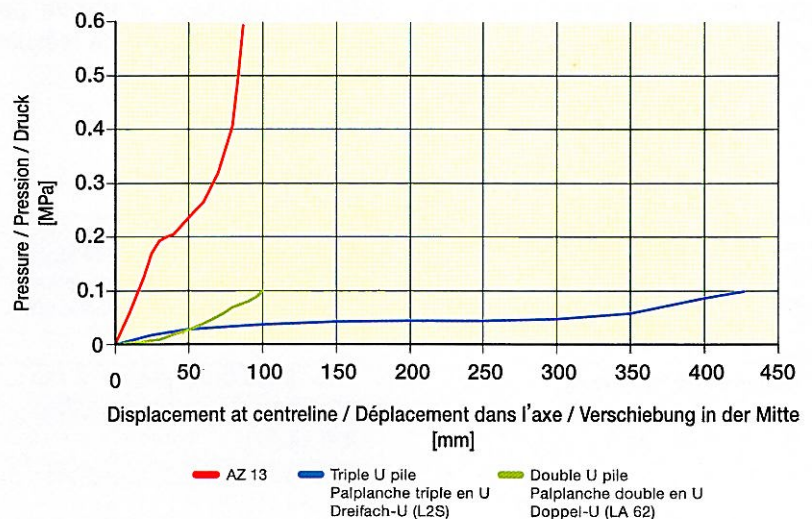
effect. This leads to a stiffening of the structure; see Figure 6. For comparison purposes, load-displacement behaviour has also been represented in this figure for an intermediate sheeting comprising three U sheet piles [4]. The difference is striking: the fact that the four interlocks are aligned and that some parts of the cross-section are invariably subjected to compression and to bending causes large deformations, even at low pressure, independently of the direction of loading. (Test results obtained for the double U-piles, see [6], have also been included on this diagram).

mé de manière remarquable par les essais, comme le montre les figures 4 et 5: les palplanches prennent la forme d'un arc de cercle à mesure que la pression augmente, se comportant alors comme une membrane (tension). Ceci conduit à une augmentation de la rigidité de la structure, voir figure 6. A titre de comparaison, on a également reporté sur cette figure le comportement effort-déformation d'un panneau intercalaire constitué de trois palplanches en U [4]. La différence est saisissante: le fait que les quatre serrures soient alignées et que les parties de la section soient toujours sollicitées en compression et en flexion conduit, pour une très faible pression déjà, à des déformations importantes, indépendamment de la direc-

stättigt, siehe Abb. 4 und 5. Mit zunehmender Belastung geht die Geometrie der Bohlen immer mehr zum Kreisbogen über und die Lastabtragung erfolgt dadurch stärker über die Membrantragwirkung (Zug). Dies führt zu einer Versteifung des Tragwerks, siehe Abb. 6. Zum Vergleich wurde das Last-Verformungsverhalten einer Zwischentafel aus drei U-Bohlen ebenfalls in dieser Abbildung aufgetragen [4]. Der Unterschied im Verhalten der beiden Zwischentafeln ist dramatisch. Die Tatsachen, dass die vier Schlösser auf einer Linie liegen und daß immer Querschnittsteile auf Druck und Biegung beansprucht sind, führen schon bei sehr geringer Druckbelastung zu erheblichen Verformungen, unabhängig von der Belastungsrichtung. (Zur Vervollständigung,

Figure 6:
Comparison of the load-deformation behaviour.

Figure 6:
Comparaison du comportement charge-déformation.
Abbildung 6:
Vergleich des Last-Verformungsverhalten.



The numerical simulations also demonstrated that AZ sheet pile behaviour remains unaffected by driving deviations due to its sectional geometry (three-hinged arch); see Figure 7 [5].

tion de la charge. (A titre de complément, on a également reporté sur ce schéma les résultats d'essai obtenus pour des palplanches doubles en U, voir [6].

gung wurden ebenfalls die Versuchsergebnisse für U-Doppelbohlen aus [6] übernommen und in dieses Diagramm aufgetragen).

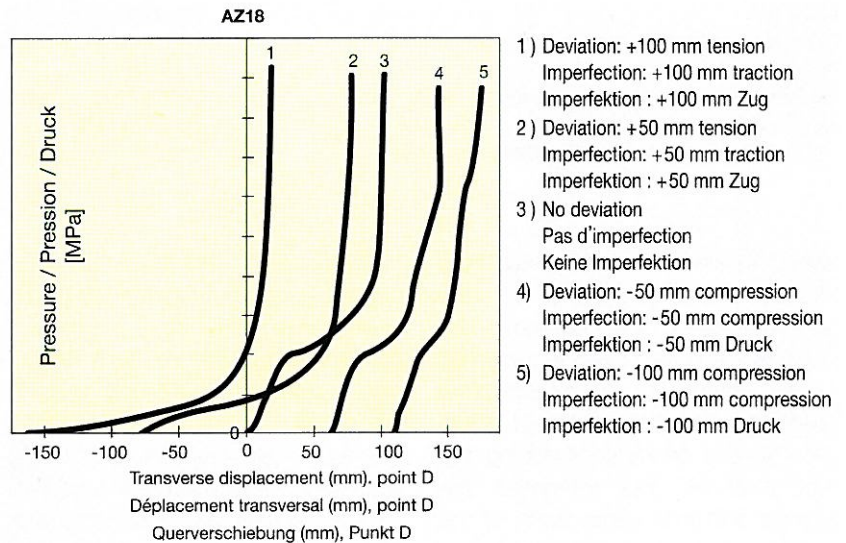
Les simulations numériques ont permis également de montrer que les palplanches intercalaires AZ, du fait de leur géométrie (arc à trois articulations), sont insensibles aux imperfections géométriques (écarts à la mise en œuvre), voir figure 7 [5].

Im Rahmen der numerischen Simulationen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die AZ-Zwischenbohlen, bedingt durch ihre Geometrie (Dreigelenkbogen), unempfindlich gegenüber geometrischen Imperfektionen (Rammabweichungen) sind, siehe Abb. 7 [5].

Figure 7: Influence of driving deviations out of the wall axes on the load carrying behaviour.

Figure 7: Influence de déviation de battage hors de l'axe du rideau sur le comportement sous charge.

Abbildung 7: Einfluß der Rammimperfektionen in der Wandachse auf das Tragverhalten.



4. Design

Characteristic ultimate loads for AZ intermediate sheet piles with different yield strengths are given in Table 2. These are based on the test results. For the capacities shown in the tables to be applicable, the connection with the primary supporting elements must be in accordance with good practice and there must be a suitable safety factor.

4. Dimensionnement

La charge ultime caractéristique des palplanches intercalaires AZ, obtenue à partir des résultats expérimentaux, est donnée dans le tableau 2 en fonction de la limite d'élasticité. Pour pouvoir utiliser ces valeurs, il faut d'une part veiller à réaliser une liaison parfaite avec les éléments porteurs principaux et d'autre part choisir un coefficient de sécurité adapté.

4. Bemessung

Charakteristische Werte für die Tragfähigkeiten der AZ-Zwischenbohlen in Abhängigkeit von deren Streckgrenze sind in der Tabelle 2 angegeben. Diese beruhen auf einer Auswertung der Versuchsergebnisse. Bei der Anwendung der Tabellenwerte sollte Wert gelegt werden einerseits auf eine stahlbaumäßig einwandfreie Ausbildung der Verbindung mit den Haupttragelementen und andererseits auf die Berücksichtigung eines angepassten Sicherheitsbeiwertes.

Table 2: Characteristic ultimate loads to be used for calculation

Tableau 2: Charges ultimes utilisées pour calcul

Tabelle 2: Traglasten für die Berechnung

| | Characteristic ultimate loads Charge ultime caractéristique Charakteristische Traglasten [MPa] | | |
|------|---|----------|----------|
| | S 240 GP | S 355 GP | S 430 GP |
| AZ13 | 0,22 | 0,33 | 0,39 |
| AZ18 | 0,33 | 0,48 | 0,57 |
| AZ26 | 0,19 | 0,28 | 0,35 |

5. Summary

The following conclusions can be drawn from the study carried out by Liege University's Structural Steelwork Department on AZ sheet piles intended for combined sheet pile walls:

- The lowest failure pressure was 0.36 MPa (= 36 m hydraulic head).
- Load-displacement behaviour is far better than that of double and triple U-piles; see Figure 6. This leads to smaller displacements (in service state) and greater safety (no risk to stability because no part of the section is subjected to compression).
- Under very high pressures, the majority of the plastic deformation is concentrated at sheet pile corners B and F and not at the interlocks; see Figure 5.
- High pressures are increasingly transferred as normal tensile stresses (membrane effect).
- Because of their geometry, AZ intermediate sheet piles remain unaffected by driving deviations of a magnitude corresponding to good construction performance.
- Larssen-type interlocks of the AZ sheet piles contribute significantly to the exceptionally high performance of the intermediate sheeting.
- For the purposes of calculation, ultimate loads up to 0.57 MPa (=57 m hydraulic head) can be assumed, given the actual behaviour observed.
- If a suitable safety factor is incorporated, combined pile systems can be designed on the basis of Table 2.

The above-mentioned advantages of AZ sheet piles make them ideal intermediate elements for combined walls not only for structural (load-bearing capacity and deformation behaviour) but also for economic reasons (system width up to 1340 mm).

5. Conclusion

L'étude réalisée au Département MSM de l'Université de Liège sur des palplanches intercalaires AZ pour rideaux mixtes tubes-palplanches a permis de dégager les conclusions suivantes:

- La plus faible valeur de la pression à la rupture obtenue lors des essais était de 0,36 MPa (colonne d'eau de 36m).
- Comparé au comportement effort-déformation des palplanches doubles ou triples en U, celui des palplanches AZ est nettement plus avantageux, voir figure 6. Ceci se traduit par des déplacements plus faibles (à l'état de service) et par une sécurité accrue (pas de risque d'instabilité puisque aucune partie n'est sollicitée en compression).
- La déformation plastique qui apparaît pour des pressions très élevées est essentiellement concentrée aux angles B et F des palplanches et non dans les serrures, figure 5.
- A mesure que la pression augmente, elle est transmise sous forme de contraintes normales de traction (effet de membrane).
- Du fait de leur géométrie, les panneaux intercalaires en palplanches AZ sont insensibles aux imperfections de mise en œuvre dès lors que celles-ci restent de l'ordre de celles rencontrées dans le cas d'une exécution correcte.
- Les serrures Larssen des palplanches AZ contribuent de manière importante au comportement exceptionnel des panneaux intercalaires ainsi réalisés.
- Compte tenu du comportement réel observé, on peut admettre, pour le calcul, des charges ultimes allant jusqu'à 0,57 MPa (J colonne d'eau de 57m).
- Le calcul des rideaux mixtes peut être réalisé à l'aide du Tableau 2, moyennant l'utilisation d'un coefficient de sécurité adapté.

Les avantages des palplanches AZ indiqués ci-dessus en font, tant du point de vue statique (résistance et déformation) qu'économique (largeur utile allant jusqu'à 1340 mm), des éléments intermédiaires parfaits pour rideaux mixtes tubes-palplanches.

5. Zusammenfassung

Aus der am Stahlbaulehrstuhl der Universität Lüttich durchgeführten Untersuchung an AZ-Zwischenbohlen für kombinierte Spundwände können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die kleinste im Versuch erhaltene Versagenslast betrug 0,36 MPa (36m Wasserdruck).
- Im Vergleich zu U-Doppel- oder Dreifachbohlen ist das Last-Verformungsverhalten viel günstiger, siehe Abb. 6. Geringere Verschiebungen (Gebrauchszustand) und höhere Sicherheit (keine Stabilitätsgefährdung, da kein Querschnittsteil auf Druck beansprucht ist) sind die Folge.
- Der überwiegende Teil der plastischen Verformung bei sehr hohen Drücken ist in den Bohlenecken B und F konzentriert und nicht in den Schlössern, siehe Abb. 5.
- Sehr hohe Drücke werden zunehmend über Zugnormalspannungen abgetragen (Membranwirkung).
- Bedingt durch ihre Geometrie sind AZ-Zwischentafeln unempfindlicher gegenüber Rammimperfektionen in einer Größenordnung wie sie einer guten Bauausführung entsprechen.
- Die Larssen-Schlösser der AZ-Bohlen leisten einen wichtigen Beitrag zu dem außergewöhnlich guten Verhalten der Zwischentafeln.
- Unter Berücksichtigung des tatsächlichen Tragverhaltens können Traglasten bis zu 0,57 MPa (57m Wasserdruck) in Rechnung gestellt werden.

– Die Bemessung kann nach der Tabelle 2 erfolgen in Kombination mit einem dem Nachweisverfahren angepassten Sicherheitsbeiwert.

Die o.a. Vorteile der AZ-Bohlen machen diese sowohl aus statischen (Tragfähigkeit und Verformungsverhalten) als auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Systembreite von bis zu 1340 mm) zu den idealen Elementen für Zwischentafeln von kombinierten Rohrspundwänden.

Bibliography / Bibliographie / Schrifttum

- [1] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Uferneinrichtungen" Häfen und Wasserstraßen EAU 1996, 9. Auflage, Berlin, 1997
- [2] P. Boeraeve, A. Godinas: Calculs et essais de palplanches de type AZ utilisées dans les rideaux mixtes, 2ème partie: Tests mécaniques en laboratoire, Institut MSM, Liège, Rapport N° 94/284, 1995
- [3] P. Boeraeve, A. Godinas: Calculs et essais de palplanches de type AZ utilisées dans les rideaux mixtes, 1ère partie: Simulations numériques, Institut MSM, Liège, 1995
- [4] A. Godinas: Etude numérique du comportement de palplanches en U utilisées dans les rideaux mixtes, Institut MSM, Liège, 1996
- [5] H. Degée: Simulation numérique de l'effet de la déviation des griffes sur le comportement de palplanches de type AZ utilisées dans les rideaux mixtes, Institut MSM, Liège, 1996
- [6] L.P.Bouwman, H.L.N.Munier: Simulation of waterpressure on the infill sheeting of the combi-wall, Testreport 6-87-6, TU Delft, 1987

