

**AZ sheet piles
in combined walls**

**Les palplanches AZ
dans les rideaux mixtes**

**AZ tussenplanken
in combiwanden**

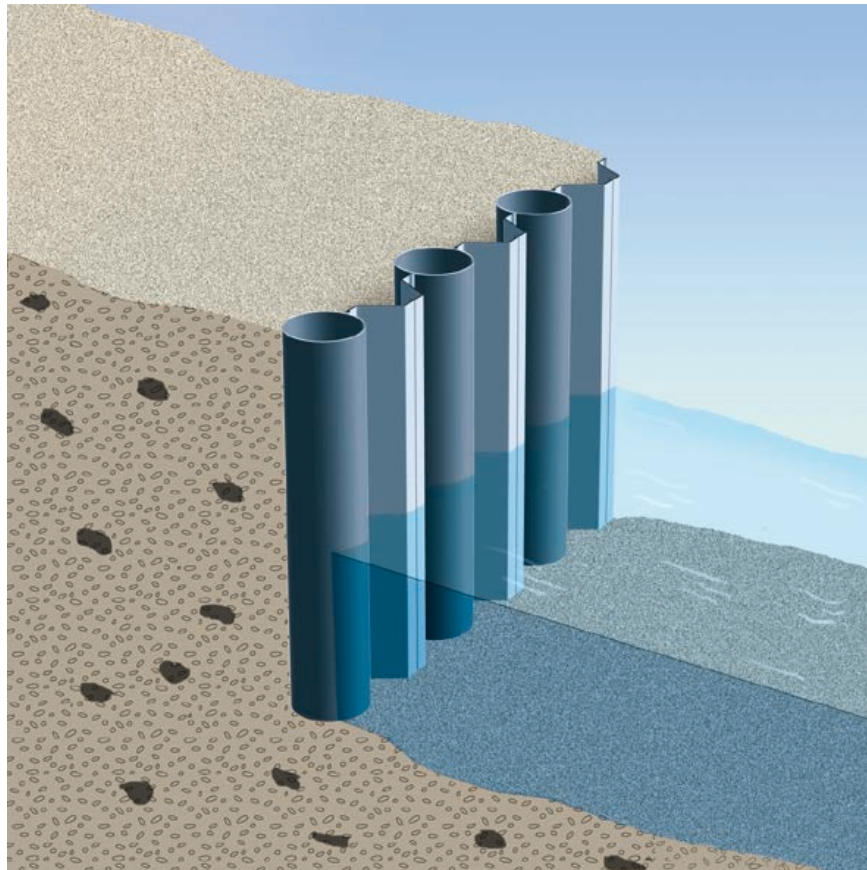


Figure 1:
Combined wall with
AZ intermediate
sheet piles

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

Figuur 1:
Combiwand met
AZ tussenplanken

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 tussenplanken in combiwanden

1. Inleiding

ProfilARBED heeft de universiteit van Luik (België), afdeling Staalbouw, een uitgebreid onderzoek laten uitvoeren met het doel het uitstekende gedrag van AZ tussenplanken in een combiwand aan te tonen (zie figuur 1). Dit onderzoek omvatte zowel laboratoriumtesten als numerieke simulaties. Het heeft aangetoond dat AZ tussenplanken een waterkolom van 50 meter kunnen weerstaan, voordat bezwijking optreedt. Het blijkt dat een methode om AZ tussenplanken te dimensioneren gebaseerd op de elasticiteitstheorie resulteert in een zeer oneconomisch ontwerp. (Volgens hoofdstuk 8.1.4.2 van EAU 1996 [1] is bij een waterdrukverschil van meer dan 40 kN/m² (= 4 meter waterkolom) een verificatie van de tussenplanken noodzakelijk).

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.

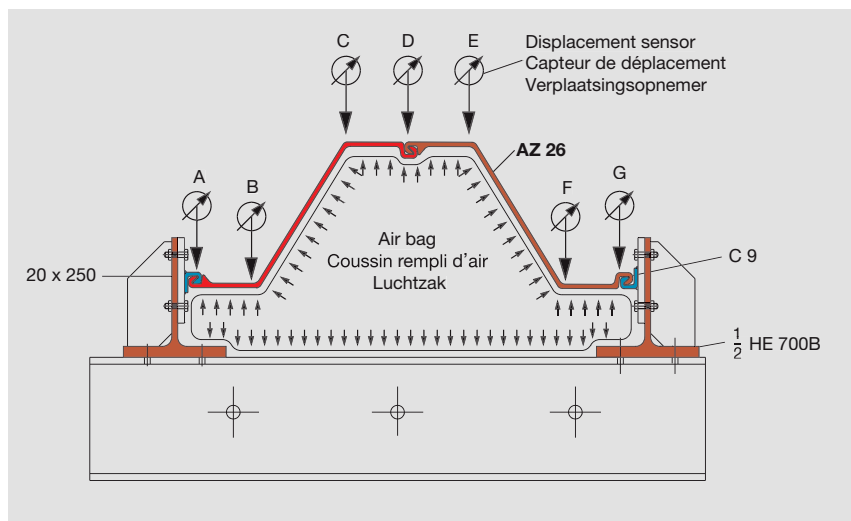
2. Laboratoriumonderzoek

In totaal zijn negen proeven op ware schaal uitgevoerd op dubbele AZ13, AZ18 en AZ26 profielen [2]. Figuur 2 laat de proefopstelling zien. De proefstukken hadden een lengte van 1 meter. De kopse wanden waren voorzien van Teflon zodat geen krachtoverdracht via de kopse wanden kon plaatsvinden. Dit is een veilige benadering aangezien in de praktijk altijd een deel van de krachtoverdracht in de lengterichting van de damwandplanken plaatsvindt. Er is gebruik gemaakt van een rubber luchtzak om de belasting op de damwandplanken zo realistisch mogelijk te laten aangrijpen. De bereikte maximale proefbelastingen zijn weergegeven in tabel 1. De staalkwaliteit was S355GP. Behalve in het geval van de AZ26-profielen is geen bezwijken van de damwandprofielen opgetreden (de luchtzak ging eerder kapot). Daarom kan aangenomen worden dat de werkelijke bezwijkbelasting voor de AZ13 en AZ18 profielen hoger is dan de maximale belasting uit de proeven.

Table 1: Test results
Tableau 1: Résultats des essais
Tabel 1: Proefresultaten

Test Essai Proef	Maximum pressure Pression maximale Maximale belasting [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
Figuur 2: Proefopstelling met luchtzak



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)

Figure 3:
Comparison of test results and simulations results

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

Figuur 3:
Vergelijking van proefresultaten met simulatiesresultaten

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'érouissage 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. Numerieke simulatie

Aan de hand van de resultaten heeft de afdeling Staalbouw een numeriek model, gebaseerd op het eindige elementen pakket FINEL-G, gekalibreerd [3]. Dit pakket is uitermate geschikt voor de modellering van niet-lineariteiten in geometrie en materiaal. Tevens zijn de rotatiestijfheid van de sloten en het hardingsgedrag van staal in rekening gebracht. In figuur 3 is de goede overeenkomst te zien tussen de simulatie en de resultaten van de proeven voor het meest gebruikelijke belastingsinterval (waterkolom ≤ 40 m). De resultaten van de numerieke simulatie laten het uitstekende gedrag van AZ profielen zien, veroorzaakt door de geometrie van deze profielen. In figuur 4 is te zien dat plastische vervorming zich hoofdzakelijk in de hoeken B en F concentreert en minder bij de sloten. Dit wordt bevestigd door de proeven, zie figuur 4 en 5. Met toenemende belasting neigt de geometrie van de het damwandprofiel naar een boog en de belastingafdracht vindt hier-

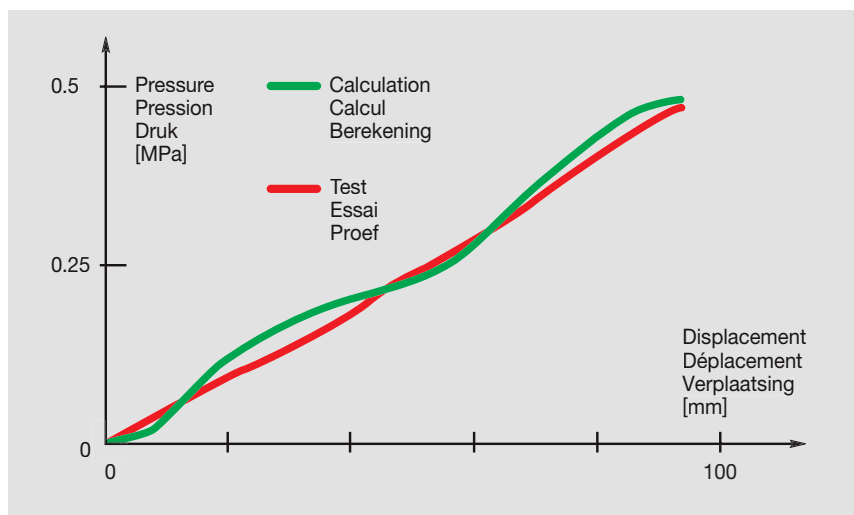
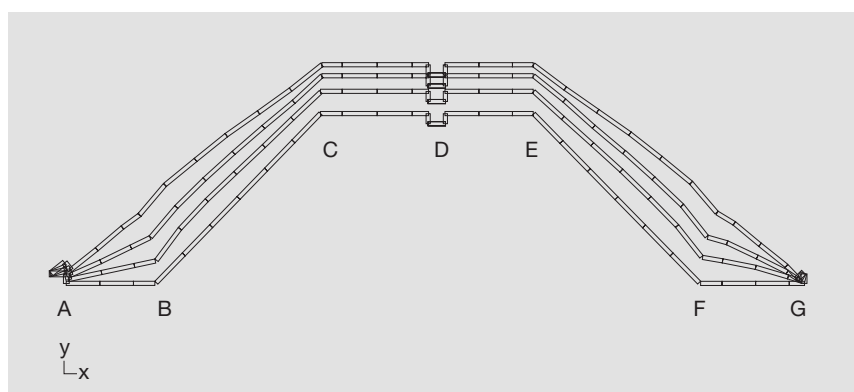


Figure 4:
Deformed structure for a pressure increase up to 0.5 MPa

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

Figuur 4:
Vervormde constructie bij een druktoename tot 0,5 MPa



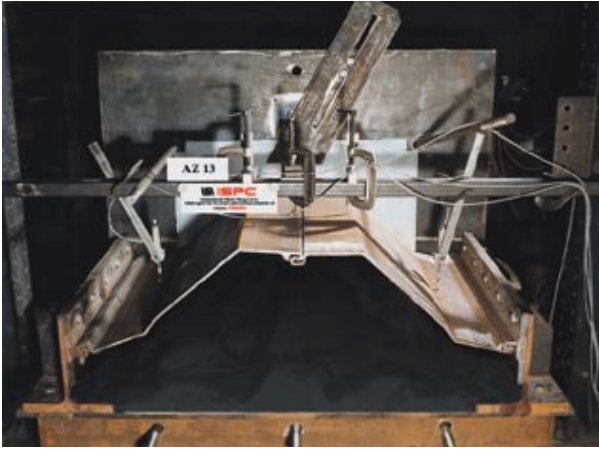


Figure 5a:
Deformed intermediate sheet pile after load test.

Figure 5a:
Palplanche intermédiaire déformée après mise sous charge.

Figuur 5a:
Vervormde tussenplank na de belastingsproef



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.

Figuur 5b:
Concentratie van de plastische vervorming in de hoek van het profiel

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).

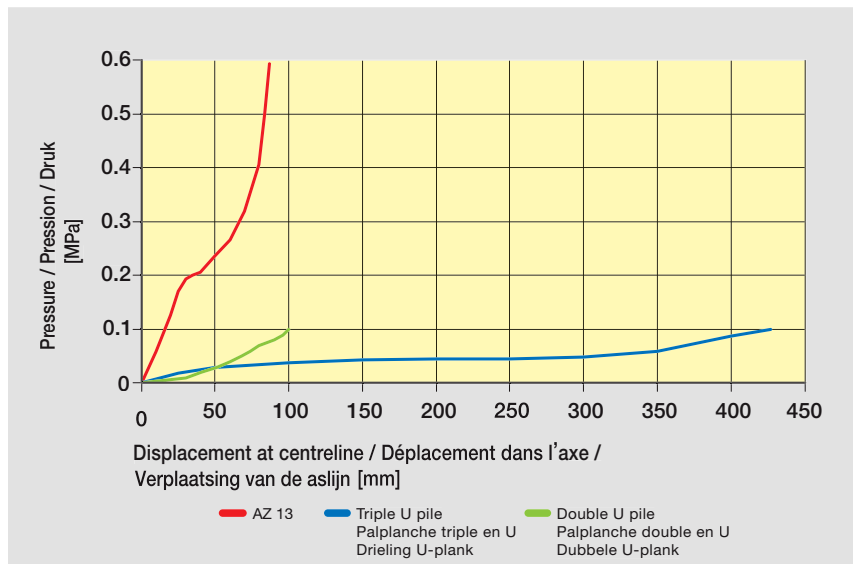
mé de manière remarquable par les essais, comme le montre les figures 4 et 5: les palplanches prennent la forme d'un arc de cercle à mesure que la pression augmente, se comportant alors comme une membrane (tension). Ceci conduit à une augmentation de la rigidité de la structure, voir figure 6. A titre 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-

door toenemend plaats door membraanwerking (trek). Dit resulteert in een stijver gedrag van de constructie, zie figuur 6. Ter vergelijking is in deze figuur tevens het belasting-vervormingsdiagram van een drieling U-tussenplank weergegeven [4]. Het verschil in gedrag van de tussenplanken is enorm. Het feit dat de vier sloten op één lijn liggen en dat sommige delen van de doorsnede altijd op druk en buiging belast zijn, veroorzaakt zelfs bij lage drukken grote vervormingen, onafhankelijk van de belastingsrichting. (Voor de volledigheid zijn ook proefresultaten voor dubbele U-planken opgenomen, zie [6], en gepresenteerd in de figuur). De numerieke simulaties toonden tevens aan dat de AZ tussenplanken, door hun geometrie (drie

Figure 6:
Comparison of the load-deformation behaviour.

Figure 6:
Comparaison du comportement charge-déformation.

Figuur 6:
Vergelijking van belasting-vervormingsgedrag



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].

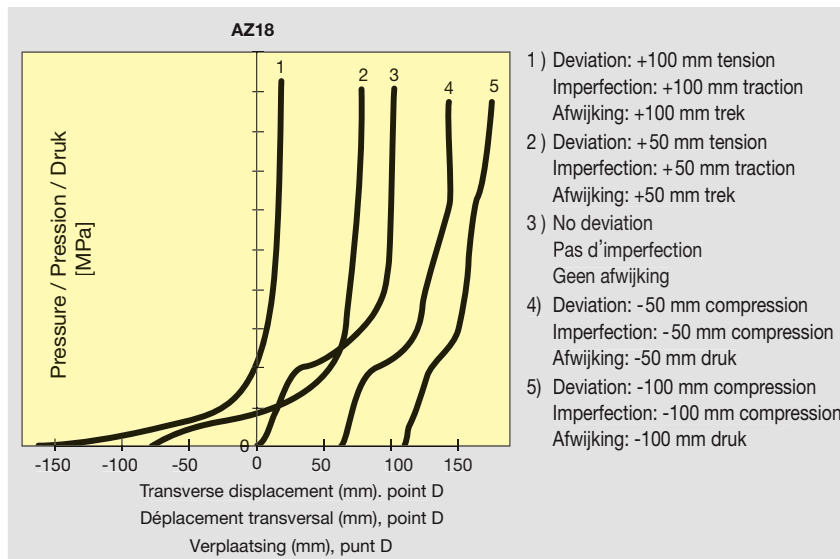
scharnierpunten), ongevoelig zijn voor geometrische afwijkingen (veroorzaakt door het heien), zie figuur 7 [5].

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].

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.

Figuur 7:
Invloed van hei-afwijkingen op het draagvermogen



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. Ontwerp

Karakteristieke waarden voor de draagkracht van de AZ-tussenplanken zijn in tabel 2 afhankelijk van de vloeigrens weergegeven. Deze waarden zijn gebaseerd op de proefresultaten. Om de waarden uit tabel 2 te kunnen gebruiken, dient voor een goede verbinding met de hoofd dragers gezorgd te worden en dient gebruik te worden gemaakt van een passende veiligheidsfactor.

Table 2:
Characteristic ultimate loads to be used for calculation

Tableau 2:
Charges ultimes utilisées pour calcul

Tabel 2:
Karakteristieke waarden van de draagkracht voor berekeningen

	Characteristic ultimate loads Charge ultime caractéristique Karakteristieke draagkracht [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. Samenvatting

De volgende conclusies kunnen worden getrokken uit het onderzoek naar AZ profielen als tussenplanken voor combiwanden uitgevoerd door de universiteit van Luik, afdeling Staalbouw:

- De laagste bezwijkbelasting bedroeg 0,36 MPa (= 36 m waterkolom).
- Het belasting-vervormingsgedrag is veel gunstiger dan bij dubbele en drieling U-planken, zie figuur 6. Dit betekent kleinere verplaatsingen (in de gebruikstoestand) en grotere veiligheid (geen gevaar voor de stabiliteit omdat de doorsnede nergens op druk is belast).
- Bij zeer hoge drukken treedt het grootste deel van de plastische vervorming op bij de damwandhoeken B en F en niet bij de sloten, zie figuur 5.
- Hoge drukken worden in toenemende mate afgedragen als treknormaalspanningen (membraanwerking).
- Door hun geometrie zijn AZ tussenplanken ongevoelig voor heil-afwijkingen met een grootte zoals die verwacht mag worden bij een goede uitvoering.
- Larssen sloten hebben een belangrijke bijdrage aan het uitzonderlijk goede gedrag van AZ tussenplanken.
- Het daadwerkelijke gedrag in ogen-schouw nemende, kan worden gerekend op een draagvermogen tot 0,57 MPa (= 57 m waterkolom).
- Combiwanden kunnen worden gedimensioneerd met behulp van tabel 2, mits een passende veiligheidsfactor wordt gehanteerd.

De genoemde voordelen van AZ tussenplanken maken deze planken uit zowel constructief (draagvermogen en vervormingsgedrag) als economisch (systeembreedte tot 1340 mm) oogpunt tot ideale tussenplanken in combiwanden.

Bibliography / Bibliographie / Bibliografie

- [1] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Uferinefassungen" 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.Munter: Simulation of waterpressure on the infill sheeting of the combi-wall, Testreport 6-87-6, TU Delft, 1987

Sheet Piling
66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette (Luxembourg)
Tel. (+352) 5313-3105
Fax (+352) 5313-3290
E-mail: sheet.piling@arcelor.com
Internet: www.alc.arcelor.com

ARBED
DAMWAND NEDERLAND

ARBED Damwand Nederland B.V.

Vlasweg 9, 4782 PW Moerdijk
Postbus 24, 4780 AA Moerdijk
Telefoon 0168 - 385 885, Fax 0168 - 385 888
E-mail: info@arcelorprojects.nl
<http://www.arbeddamwand.nl>

ARBED
DAMWAND BELGIE

ARBED Damwand België N.V.

Industrielaan 2, B-3900 Overpelt
Telefoon 011 - 800 890, Fax 011 - 800 895
E-mail: info@arcelorprojects.be
<http://www.arbeddamwand.be>