

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Accepted Version

Gebhardt, Michael; Maisner, Matthias; Gabrys, Ulrike; Nestmann, Franz; Schweizerhof, Karl

Les barrages gonflables en Allemagne

Revue Technique Maritime et Fluviale

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100641>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gebhardt, Michael; Maisner, Matthias; Gabrys, Ulrike; Nestmann, Franz; Schweizerhof, Karl (2008): Les barrages gonflables en Allemagne. In: Revue Technique Maritime et Fluviale 1. S. 38-43.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

Erstveröffentlichung in Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht

S. 38

Les barrages gonflables en Allemagne

Domaines d'application et enseignements récents

Gebhardt, M.^a; Maisner, M.^a; Gabrys, U.^a; Nestmann, F.^b; Schweizerhof, K.^b

^a Institut Fédéral allemand d'Études et de Recherches des Voies Navigables (BAW), Karlsruhe;

^b Université de Karlsruhe

L'administration allemande des voies navigables et du transport par voie d'eau (WSV) gère 280 barrages, dont la moitié est âgée de plus de 50 ans. Nombre d'entre eux devront donc être modernisés prochainement, alors même que les budgets se réduisent. Bien que les bouchures métalliques ont une longue durée de vie, jusqu'à 70 ans, elles doivent être renouvelées tous les 15 ou 20 ans en moyenne. C'est dans ce contexte que les bouchures gonflables sont devenues de plus en plus intéressantes durant ces vingt dernières années.

Les économies dues à l'installation de bouchures souples sont si significatives que de plus en plus de gestionnaires publics et privés optent pour cette technologie. Outre les aspects économiques, les barrages gonflables présentent de nombreux avantages par rapport aux bouchures métalliques : la conception simple, l'absence de corrosion, l'étanchéité... Ils sont plus sûrs en cas de crue car la bouchure en caoutchouc peut toujours être dégonflée ou vidée pour laisser passer l'eau. Quelques autorités ont même levé l'obligation de respecter la contrainte $(n-1)$ de la norme DIN 19700 pour certains barrages [Gebhardt 2006]. Deux projets de la WSV, à Marklendorf sur la rivière Aller et à Bahnitz sur la Havel aval, dans lesquels des barrages gonflables sont actuellement installés dans le cadre d'une modernisation importante, ont permis au BAW d'initier un projet de recherche et développement. Le but de ce projet de R&D est de réunir les dernières innovations en matière d'ingénierie, de déterminer les domaines d'application des barrages gonflés à l'eau et à l'air et d'établir des principes de conception et de construction. Le remplacement des bouchures existantes à Marklendorf et à Bahnitz par des vannes gonflables au lieu de clapets métalliques permet des économies de 20 à 25% sur l'investissement et la maintenance.

Modèles hydrauliques, analytiques et numériques

Deux modèles physiques, une passe complète et une section de barrage gonflable, ont servi à étudier les problèmes hydrauliques (Figures 1a et 1b). De nombreuses séries d'essais ont permis d'étudier les effets de différentes conditions aux limites hydrauliques, de pressions internes et de types d'ancrage sur la capacité d'évacuation hydraulique, sur la géométrie du barrage gonflable, sur la sensibilité de la vessie gonflable aux oscillations et le fonctionnement de mesures réductrices, comme l'installation de déflecteurs ou de brise-lames. Les principes de base de la conception cou-

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

vrent non seulement le calcul de la résistance de la membrane mais aussi l'applicabilité des méthodes analytiques pour calculer la forme du barrage (Figure 2a). Plusieurs méthodes basées sur la théorie des membranes, dans



Figure 1: Modèles physiques au laboratoire du BAW a) barrage complet à l'échelle 1:12,5 ; b) section d'un barrage à l'échelle 1:5

laquelle seules les contraintes normales sont considérées tandis que les contraintes tangentielles et les flexions sont négligées, ont été publiées récemment. Cela implique que la tension est constante et le problème se réduit aux phénomènes

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof:
Les barrages gonflables en Allemagne.
Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

S. 39

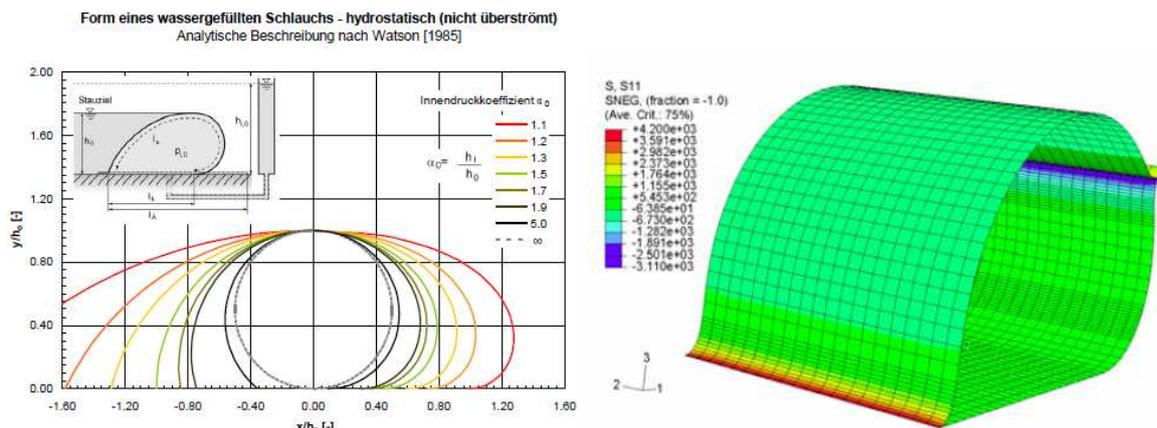


Figure 2: a) Formes de "barrages complets" gonflés à l'eau calculées par la solution analytique de [Watson 1985] b) Contraintes normales dans la membrane calculées par le logiciel aux éléments finis ABAQUS [Gebhardt 2006]

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

de tension de surface. Les formes calculées par trois méthodes analytiques ont été comparées aux formes mesurées sur les modèles physiques et les forces calculées dans la membrane ont été vérifiées par des modèles numériques. Pour cela, le barrage a été modélisé par une coque fine et isotrope composée de deux couches de caoutchouc dans le progiciel aux éléments finis ABAQUS [Gebhardt 2006]. La distribution des contraintes normales le long de la surface de la coque montre des zones au niveau de la ligne d'ancrage amont où des contraintes de compression apparaissent et des zones de traction près du déflecteur (Figure 2b). Dans le cas de l'étude des composants, c'est-à-dire sans déversement d'eau, on observe une bonne corrélation entre les résultats des calculs par les méthodes analytiques et numériques et les géométries mesurées sur le modèle physique.

Principes de conception hydraulique et structurelle

Caractéristiques du déversement

Une caractéristique des barrages gonflés à l'air est que le débit au dessus de la vessie en caoutchouc cesse d'être réparti uniformément lorsque la pression interne baisse. Le barrage gonflable s'abaisse alors en un point, habituellement proche d'une culée (Figure 3a). Ceci est dû au fait que la différence de pression à l'amont n'est pas constante,



Figure 3: a) «Flambement» du barrage Tuerkheim/Wertach gonflé à l'eau (phénomène de V-notch) b) Barrage de Kiebingen/Neckar gonflé à l'air avec déflecteur

comme c'est le cas pour des barrages gonflés à l'eau, mais varie avec la profondeur d'eau. Comme la membrane est une structure résistante bi-dimensionnelle très fine avec une raideur à la flexion relativement faible, une instabilité du système apparentée au flambement (réduction de la traction avec faible raideur en flexion) apparaît et la membrane se plie. Le barrage se comporte ainsi même si la lame déversante a une faible épaisseur ($h_u/h_o = 0.10$ to 0.15 , avec h_u épaisseur de la lame déversante et h_o charge hydraulique amont) [Gebhardt 2006]. La déflation en V (V-notch) résultante amène le flot à se déverser d'un seul côté causant un affouillement local du lit aval. Des tourbillons stationnaires peuvent se développer dans le bief aval et provoquer des érosions de berge. L'expérience montre que le phénomène de V-notch n'affecte pas négativement la régulation du niveau amont (Ittel & Heimerl 2001).

Occurrence des oscillations et efficacité des systèmes de contrôle des oscillations

Essais en laboratoire

Les oscillations peuvent causer l'abrasion de la membrane en

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof:
Les barrages gonflables en Allemagne.
Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

S. 40

caoutchouc sur le béton, induisant des fuites, comme des cas passés le montrent. Des oscillations persistantes doivent donc être évitées lors de l'exploitation. À cause de leur masse relativement faible, les barrages gonflés à l'air ont une plus grande tendance à osciller que ceux gonflés à l'eau. L'étude du comportement face aux oscillations des barrages gonflés à l'eau a été effectuée, grâce à une triangulation laser, en fonction de l'épaisseur de la lame déversante, de la hauteur d'eau aval et de la pression interne, et les résultats ont été analysés grâce à un algorithme de transformation de Fourier rapide (FFT). Des fréquences de deux types ont été identifiées : une oscillation fondamentale à basse fréquence et une composante harmonique à plus haute fréquence. Le niveau d'eau aval a un effet significatif sur l'apparition des oscillations. Les amplitudes les plus importantes apparaissent lorsque le niveau aval est à environ 70% du niveau amont (Figure 4). Cependant, les oscillations peuvent aussi être évitées ou réduites considérablement par des mesures telles que des déflecteurs (Figure 3b) ou des brise-lame [Gebhardt 2006].

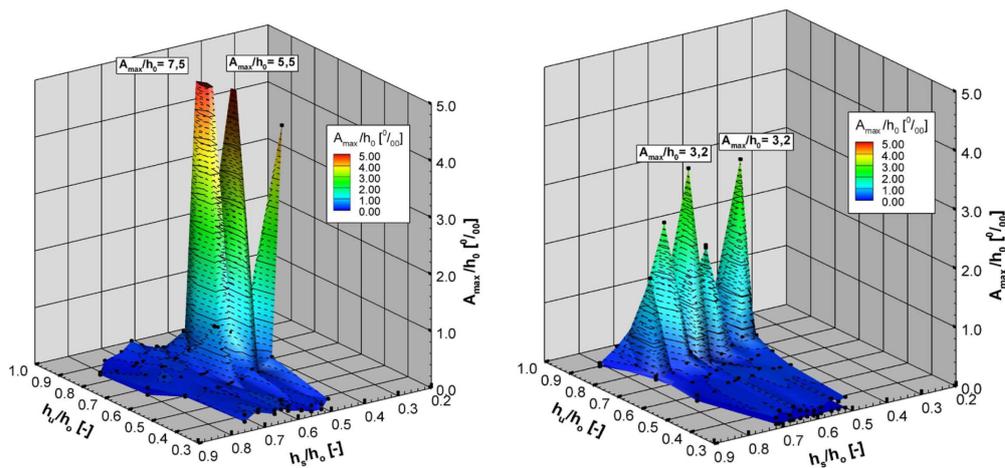


Figure 4: Oscillations de barrages gonflés à l'eau, amplitudes d'environ 60 tests avec niveau aval variable et niveau amont constant a) sans système réducteur b) avec déflecteur

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

Essais sur un barrage gonflable existant

Il a été prouvé qu'une rangée de brise-lame, étudiés de manière méthodique pour la première fois sur modèle physique, était une alternative efficace aux déflecteurs. L'effet positif n'est pas seulement limité aux faibles épaisseurs de lame déversante, comme dans le cas où les brise-lame sont installés sur les clapets pour séparer la nappe, mais aussi dans les cas où des fluctuations de pression et des forces de soulèvement apparaissent. La raison en est que la séparation aux brise-lame accroît la turbulence et que celle-ci, comme processus d'échange, a un effet sur l'apparition des oscillations. Plusieurs séries d'essais ont été effectuées sur un barrage gonflable existant près de Salzburg (Autriche) afin d'améliorer la forme, la localisation et la distance entre les brise-lame. Pendant les tests de juillet 2006, les résultats de laboratoire ont été confirmés de manière satisfaisante. Les oscillations apparaissent seulement dans la plage $0,60 \leq h_s/h_o \leq 0,70$ (h_s hauteur du barrage, h_o niveau d'eau amont). Lors de deux nouvelles séries d'essais, une rangée de briselame espacés respectivement de 2 m et d'1 m a été étudiée. Une réduction supplémentaire des amplitudes a été relevée, comme le montre la Figure 5. À partir de ces résultats, une rangée de brise-lame espacés d'1 m est recommandée pour les barrages gonflables. Calcul des efforts et de la géométrie de la membrane La bonne corrélation entre les résultats des calculs analytiques et ceux des modèles numériques et physiques montre que la géométrie et les efforts peuvent être calculés en fonction de la pression interne, de la circonférence de la vessie,

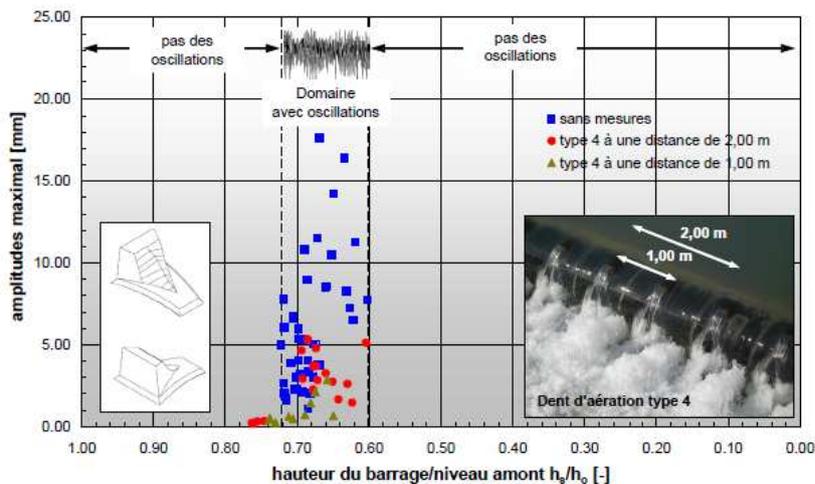


Figure 5: Oscillations d'un barrage gonflé à l'eau – Influence des brise-lame espacés d'1 m et 2 m sur les amplitudes

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof:
Les barrages gonflables en Allemagne.
Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

S. 41

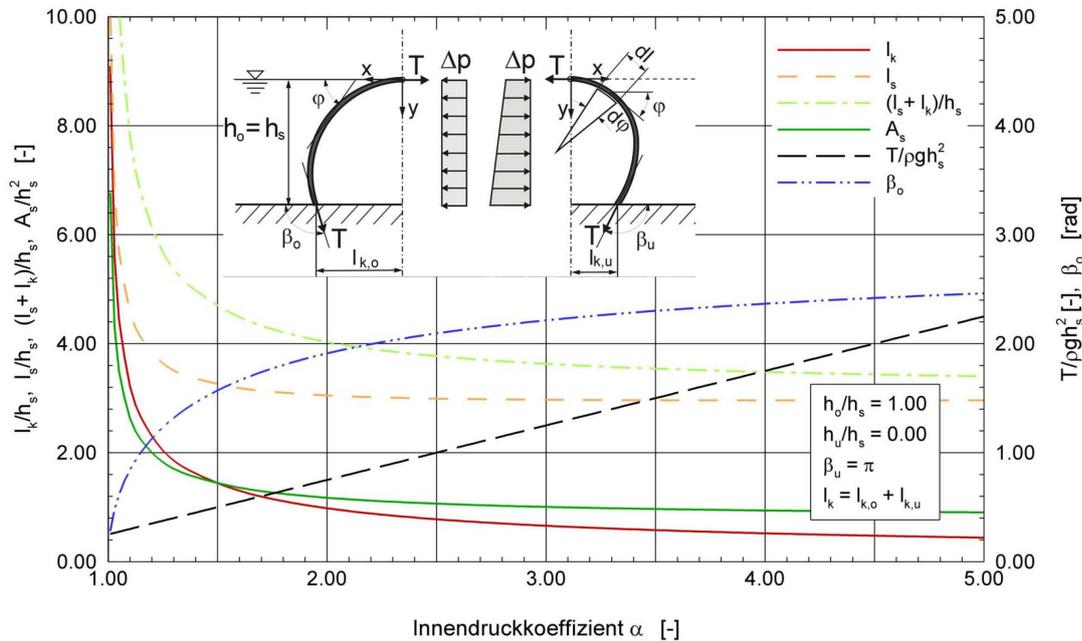


Figure 6: Diagramme de conception basé sur les solutions analytiques pour les barrages gonflés à l'eau sans déversement et sans effet du bief aval.

des niveaux amont et aval et de l'espacement des lignes d'ancrage. Les résultats peuvent être résumés dans un diagramme de conception comme celui de la Figure 6 pour un barrage gonflé à l'eau sans effet de l'eau aval. En revanche, lorsqu'on conçoit un barrage gonflable avec lame déversante, les différences entre les résultats calculés et ceux des modèles deviennent plus grandes à mesure que l'épaisseur de la lame déversante augmente. Cela est dû au fait que la déviation de la distribution hydrostatique des pressions s'accroît avec l'épaisseur de la lame déversante à cause de la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique. La relation entre niveau d'eau et débit (courbes de tarage) doit alors être déterminée par des modèles physiques, comme par le passé [Gebhardt 2006].

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

Essai sur les matériaux et étude de risque au vandalism

Afin de définir des spécifications sur les matériaux, des essais complets sur ceux utilisés dans les membranes du commerce ont été effectués. Des échantillons ont été testés en traction selon des essais basés sur ceux habituellement conduits sur les bandes transporteuses utilisées dans les mines, et leurs résistances à la traction transversale et longitudinales ont été étudiées. Sur la base des essais sur les matériaux et des normes adéquates, des valeurs limites concernant l'élastomère, comme la dureté Shore A, la résistance à la traction, l'élongation à la rupture et l'abrasion ont été définies. Ces exigences ont été introduites dans les cahiers des charges des marchés des barrages gonflables et leur respect a été contrôlé par des essais réguliers durant la production. Il était demandé une membrane à 2 plis de caoutchouc chloroprène (CR) ou de caoutchouc monomère d'éthylènepropylène diène (EPDM) d'une épaisseur minimale $d_s \geq 12$ mm. En réponse à l'inquiétude courante sur la sensibilité au vandalisme, l'autorité de contrôle des armes à feu à Ulm a conduit des essais de résistance aux balles sur des échantillons choisis de membranes. Plusieurs calibres du commerce ont été utilisés pour tirer sur les membranes depuis des distances variables. De plus, des essais de percement ont été effectués avec l'appareil à poinçon standard indiqué dans la directive technique des gilets pare-balles (Figure 7). Les échantillons n'ont pas résisté aux balles de calibres généralement utilisés dans les clubs de tirs. Cependant, la résistance était suffisante pour soutenir les tirs des carabines à air comprimé (calibre 4,5 mm), qui sont très courants. Les plombs tirés de 15 m n'ont pas non plus infligé d'importants dommages aux membranes. Grâce à l'élasticité de l'élastomère, les trous causés par des balles de calibre relativement important se referment, conduisant à de très faibles fuites. Aucun déchirement n'a été enregistré non

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof:
Les barrages gonflables en Allemagne.
Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

S. 42



Figure 7: Essais de résistance aux balles et au percement par l'Autorité de contrôle des Armes à Feu à Ulm

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

plus par la suite [Maisner, Gebhardt & Gabrys 2003]. Dans le cas des barrages gonflés à l'eau, l'énergie des balles est tellement réduite qu'il est très improbable que la balle traverse la membrane une seconde fois à l'arrière.

Expériences récentes en conception, construction et exploitation

Bien que la technologie des barrages gonflables date de presque 50 ans, la majorité des barrages souples en Allemagne a été construite dans les deux dernières décennies. L'expérience de vessies gonflables utilisées comme bouchures couvre donc une période relativement courte. L'étude inclut le plus ancien barrage en exploitation, la station hydroélectrique d'Erlangen sur la rivière Regnitz. Ce barrage gonflé à l'eau a une hauteur de 1,2 m et une largeur de 22,4 m, et fonctionne avec la membrane d'origine depuis 1981. Le retour d'expérience de ce dernier, comme d'autres barrages de ce type, est très positif. Pour tous ces barrages, le niveau d'eau est contrôlé automatiquement avec une marge de seulement quelques centimètres, qu'ils soient gonflés à l'air ou à l'eau. Malgré l'occurrence de très hauts niveaux d'eau, les membranes sont encore en général en très bon état, sans dommage important qui aurait pu dégrader l'exploitation. De petits dommages ont été causés principalement par des débris de verre cassé ou des clous. Il y a eu aussi quelques cas rares de vandalisme. Ces détériorations ont été réparées simplement par vulcanisation à froid de rustines. Aucun dommage important, ni abrasion ne sont apparus même sur des rivières à transport solide important, comme par exemple sur l'usine hydroélectrique de Tullau sur la rivière Kocher. Une passe du barrage de la retenue de l'usine hydroélectrique de Lechbruck sur la rivière Lech a même été utilisée pour la chasse régulière des sédiments du réservoir [Gebhardt 2006]. La première membrane caoutchouc du barrage de Marklendorf (rivière Aller) a été installée en Octobre 2005 (Figure 8). Depuis Octobre 2006, le barrage est en opération à la grande satisfaction de l'exploitant l'Autorité des Voies Navigables et du Transport par Voie d'Eau de Verden. Le barrage actuel de Bahnitz sur la Havel aval est actuellement aussi remplacé par un barrage gonflable. L'Autorité de Construction des Voies Navigables de Berlin prévoit d'installer la première vessie en mai 2006. Ce barrage gonflé à l'eau fait partie du «Projet 17», un des projets d'infrastructure planifiés après la réunification et qui permet de transformer la voie navigable actuelle reliant Hanovre, Magdebourg et Berlin en une voie navigable européenne efficace. Les deux barrages comportent chacun deux passes d'une largeur de 23,6 m (Marklendorf) et 36,5 m (Bahnitz) pour une hauteur d'environ 2,2 m et 2,4 m respectivement. Le BAW a optimisé la largeur des passes et la géométrie du seuil et des piles par des essais sur modèles physiques. Dans les deux cas, il a été possible de réduire la hauteur de la bouchure d'environ 1m grâce à un seuil hydrauliquement optimisé [Gebhardt & Kemnitz 2003, Kemnitz 2003]. Les deux barrages sont gonflés à l'eau car le déversement plus uniforme permet le maintien du niveau amont sur toute la gamme des débits, même lorsque les niveaux d'eau aval sont plus hauts que le seuil sur lequel est fixée la membrane. Dans la conception, la pression interne

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof:
Les barrages gonflables en Allemagne.
Revue Technique Maritime et Fluviale 1 (2008), S. 38-43.

S. 43

de la vessie est supérieure au niveau d'eau amont d'un facteur 0,6. La première partie du projet de recherche et développement «Utiliser des barrages gonflables sur les voies navigables allemandes» a été achevée fin 2007. Les résultats ont été publiés dans le «BAW-Mitteilungsblatt» (bulletin d'informations) N° 91 [BAW 2007] et ont été présentés dans un colloque le 19 Juin 2008 à Hanovre [<http://www.baw.de/vip/programm.php?veranstaltung=104>].



Figure 8: Barrage de Marklendorf sur la rivière Aller a) Génie civil, b) et c) Mise en place de la membrane d) Barrage en fonctionnement

[1] Bundesanstalt für Wasserbau, Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen, Mitteilungsblatt Nr. 91, Dezember 2007.

[2] Gebhardt, M., Hydraulic and Structural Design of Inflatable Dams, Dissertation, University Karlsruhe, 2006

Autorenfassung

Gebhardt, Maisner, Gabrys, Nestmann, Schweizerhof: Les barrages gonflables en Allemagne. Domaines d'application et enseignements récents, 2008

- [3] Gebhardt, M.; Maisner, M.; Gabrys, U. Inflatable dams - Prospects for the use of flexible gates. Advantages and application range - Hydraulic and structural design - Requirements for materials - Initial experience on Federal waterways, 31st PIANC CONGRESS, Estoril, 14-18 May 2006

- [4] Gebhardt, M.; Kemnitz, B.: Staustufe Bahnitz/Untere Havel – Gutachten über den Ersatz der Wehranlage durch ein Schlauchwehr, Bundesanstalt für Wasserbau, 2003 (non publié).

- [5] Imbertson, N.: Collapsible Dam aids Los Angeles water supply, Civil Engineering, S.42-44, 1960.

- [6] Ittel, G.; Heimerl, St., Innovative Sanierung der Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar, Wasserwirtschaft 91, Heft 9, 2001, S.434-442.

- [7] Kemnitz, B.: Staustufe Marklendorf/Aller - Gutachten über den Ersatz der Wehranlage durch ein Schlauchwehr, Bundesanstalt für Wasserbau, 2003 (non publié).

- [8] Maisner, M.; Gebhardt, M.; Gabrys, U., Inflatable Dams Made of Rubber Sheets for Navigable Waterways, KGK - Kautschuk Gummi Kunststoffe, 12/2003

- [9] Watson, R.: A note on the shapes of flexible dams, Journal of Hydraulic Research, Vol.23, No.2, S.179-194, 1985.