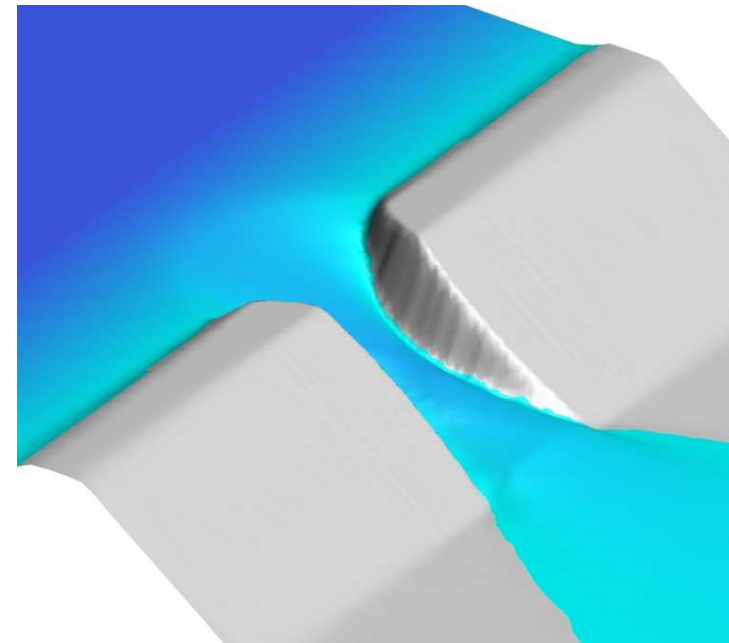


Calcul du débit à la brèche en cas de rupture progressive de petits ouvrages d'accumulation



Lukas Vonwiller, Samuel Peter, David Vetsch, Robert Boes
Berne, le 11 mars 2015

Contenu

1. Introduction
2. Modèle numérique *BASEMENT*
3. Modèle paramétrique *BASEbreach*
4. Développement de *BASEbreach*
5. Conclusions

Introduction

- Les petits ouvrages d'accumulation sont très nombreux en Suisse
 - Dans le seul canton de Zurich, il y en a environ 300, la plupart en terre homogène
- Champ d'application de la législation sur les ouvrages d'accumulation sur la base des critères géométriques et du critère du risque potentiel particulier



Fig. Petits ouvrages d'accumulation dans le canton de Zurich (photos: Pöyry 2009)

Critère du risque

Evaluation du risque sur la base de l'évaluation du risque potentiel particulier (OFEN 2014)¹ :

1. Calcul du débit maximum à la brèche resp. de l'hydrogramme
 - Hypothèse d'une rupture soudaine de la digue avec brèche de forme et de taille standardisées (brèche standard)
 - Hypothèse de la formation progressive d'une brèche, moyennant que cela repose sur des bases scientifiques
2. Calcul de la propagation de l'onde de submersion
3. Evaluation du risque pour les êtres humains et pour l'infrastructure

→ **La procédure illustrée ne concerne que la première étape**

¹ OFEN, Office fédéral de l'énergie (2014). *Directive sur les ouvrages d'accumulation*. Directive relative à la sécurité des ouvrages d'accumulation, partie B: risque potentiel particulier comme critère d'assujettissement, Berne.

Brèche standard

- Brèche de forme trapézoïdale dont la largeur de la base B_B correspond au double de la hauteur de retenue avec une pente des talus latéraux de 1:1
- Débit maximal à la brèche $Q_{B,max}$ dépendant exclusivement de la hauteur de retenue h_w

$$Q_{B,max} = 2.58 h_w^{2.5}$$

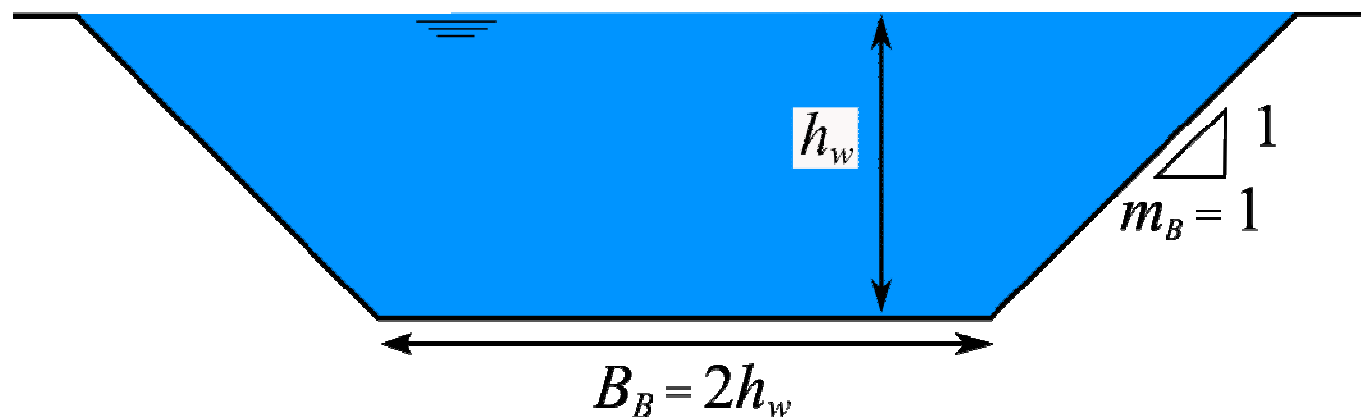
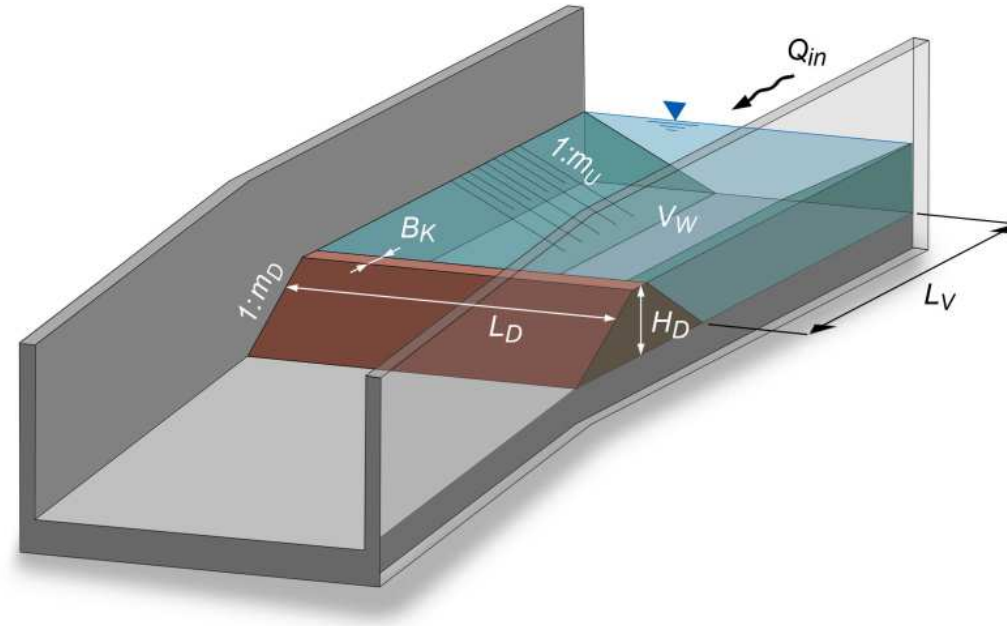


Fig. Définition de la brèche standard

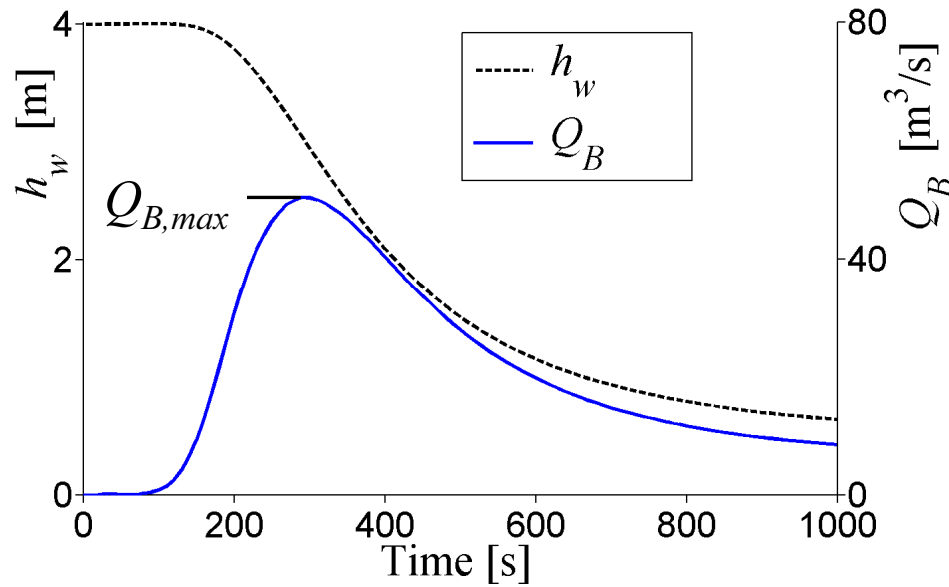
Modélisation numérique avec *BASEMENT*

Paramètres déterminants:

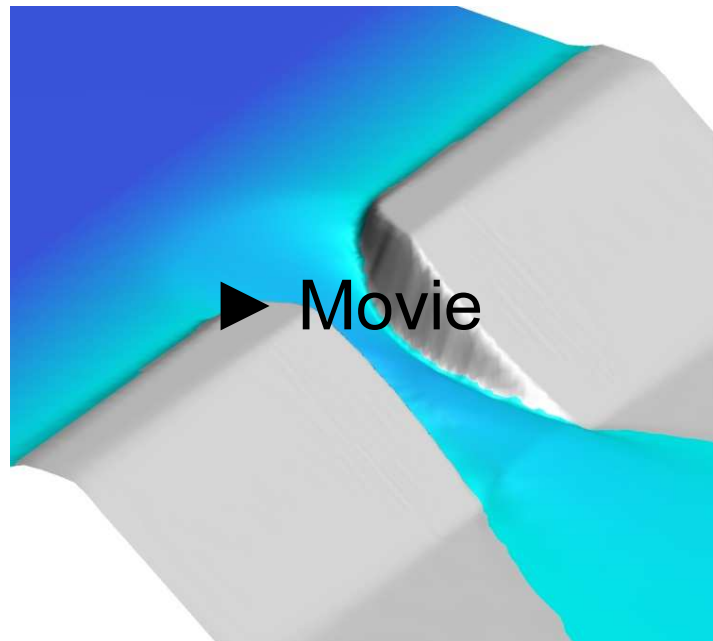
- Volume de retenue V_w
- Hauteur de l'ouvrage H_D
- Largeur du couronnement B_K
- Pente des talus m_D
- Forme de l'ouvrage $L_D:L_V$, m_U
- Débit entrant Q_{in}
- Matériau de l'ouvrage d_m
- Erosion du matériau de l'ouvrage



Modélisation numérique en 2D - exemple



- $V_w = 20'000 \text{ m}^3$
- $h_w = 4 \text{ m}$
- $B_K = 2 \text{ m}$
- $Q_{in} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$



Facteurs d'influence sensibles (I)

- Influence du volume de retenue V_w et de la hauteur de l'ouvrage H_D (hauteur de retenue en cas de déversement) sur le débit maximum à la brèche $Q_{B,max}$

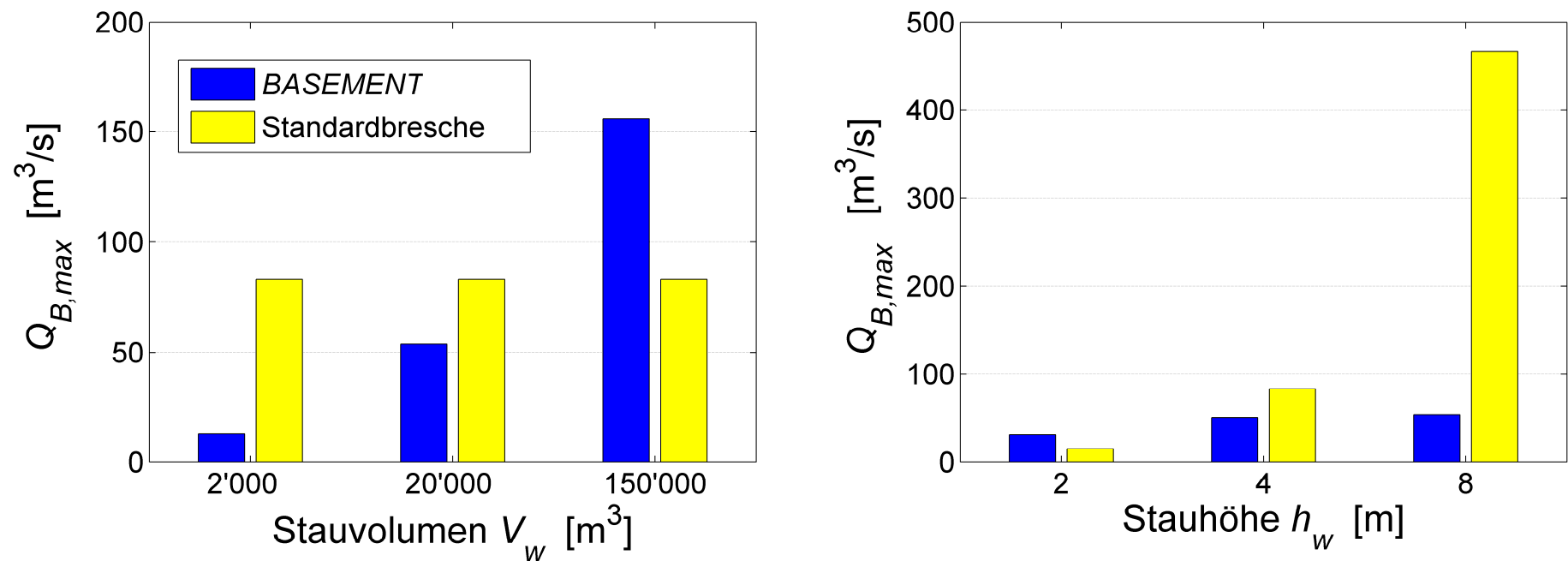


Fig. Influence du volume de retenue V_w (à gauche) et de la hauteur du barrage H_D (hauteur du barrage = hauteur de retenue h_w en cas de déversement) (à droite) sur le débit maximum à la brèche $Q_{B,max}$

Facteurs d'influence sensibles (II)

- Influence majeure du volume de retenue V_w
- Influence moyenne du volume du remblai (dépendant de H_D , B_K , m_D) et des talus à l'intérieur du réservoir

Tab. 1. Sensibilité des paramètres en comparaison avec le modèle numérique 2D dans l'hypothèse d'une brèche standard.

Influence majeure: groupe 1 (rouge), influence moyenne: groupe 2 (orange), influence faible: groupe 3 (blanc)

Paramètres	Modèle numérique 2D max. ($Q_{B,max,BM}$) / min. ($Q_{B,max,BM}$)	Brèche standard max. ($Q_{B,max,SB}$) / min. ($Q_{B,max,SB}$)
Volume de retenue V_w	15.2	1.0
Hauteur de la digue H_D	1.8	31.1
Largeur du couronnement de la digue B_K	1.6	1.0
Pente des talus m_D	1.55	1.0
Talus à l'intérieur du réservoir m_U	1.05-1.3	1.0
Dimensions des granulats d_m	1.08	1.0
Débit entrant Q_{in}	1.05	1.0
Angle de talus de la brèche β_u	1.03	1.0
Forme horizontale de la retenue $L_D:L_V$	1.02	1.0

Modèle paramétrique *BASEbreach*

- Basé sur Macchione (2008)²
- Paramètres du modèle:
 - Courbe hauteur-volume (rapport volume / hauteur de retenue):

$$V_w = b_0 z_w^{\alpha_0} \quad (1 \leq \alpha_0 \leq 4)$$
 - Angle de talus de la brèche β_o bzw. β_u
 - Vitesse d'érosion v_e (paramètre de calibrage)
- Calcul avec *BASEbreach* plus efficace qu'avec *BASEMENT*
- *BASEbreach* calibré sur la base des résultats *BASEMENT*

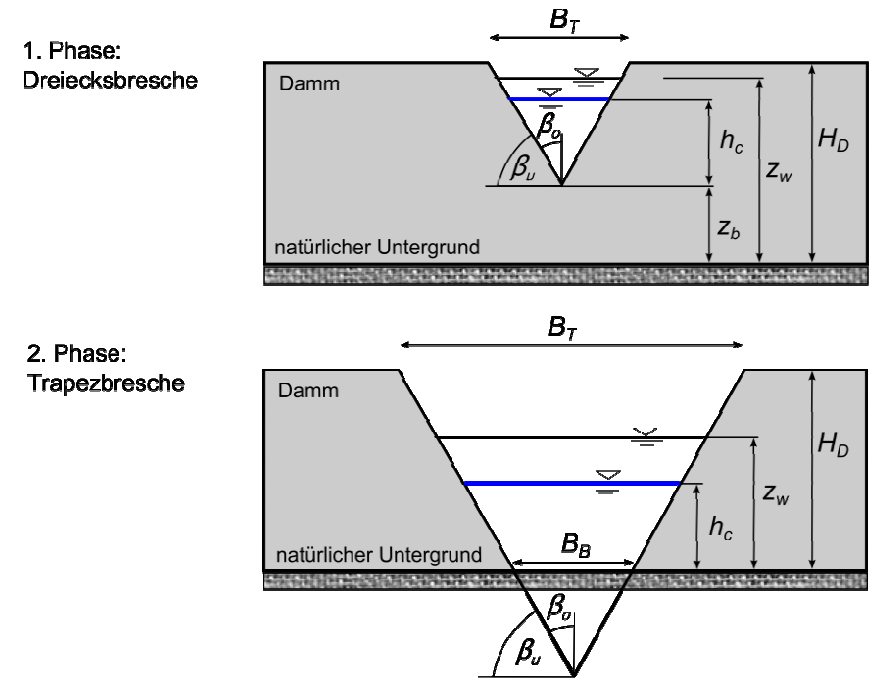


Fig. Evolution de la brèche dans *BASEbreach*, adaptée selon Macchione (2008)²

² Macchione, F. (2008). Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(12), 1688-1696.

Résultats de *BASEbreach*

Comparaison *BASEbreach* avec *BASEMENT* et brèche standard

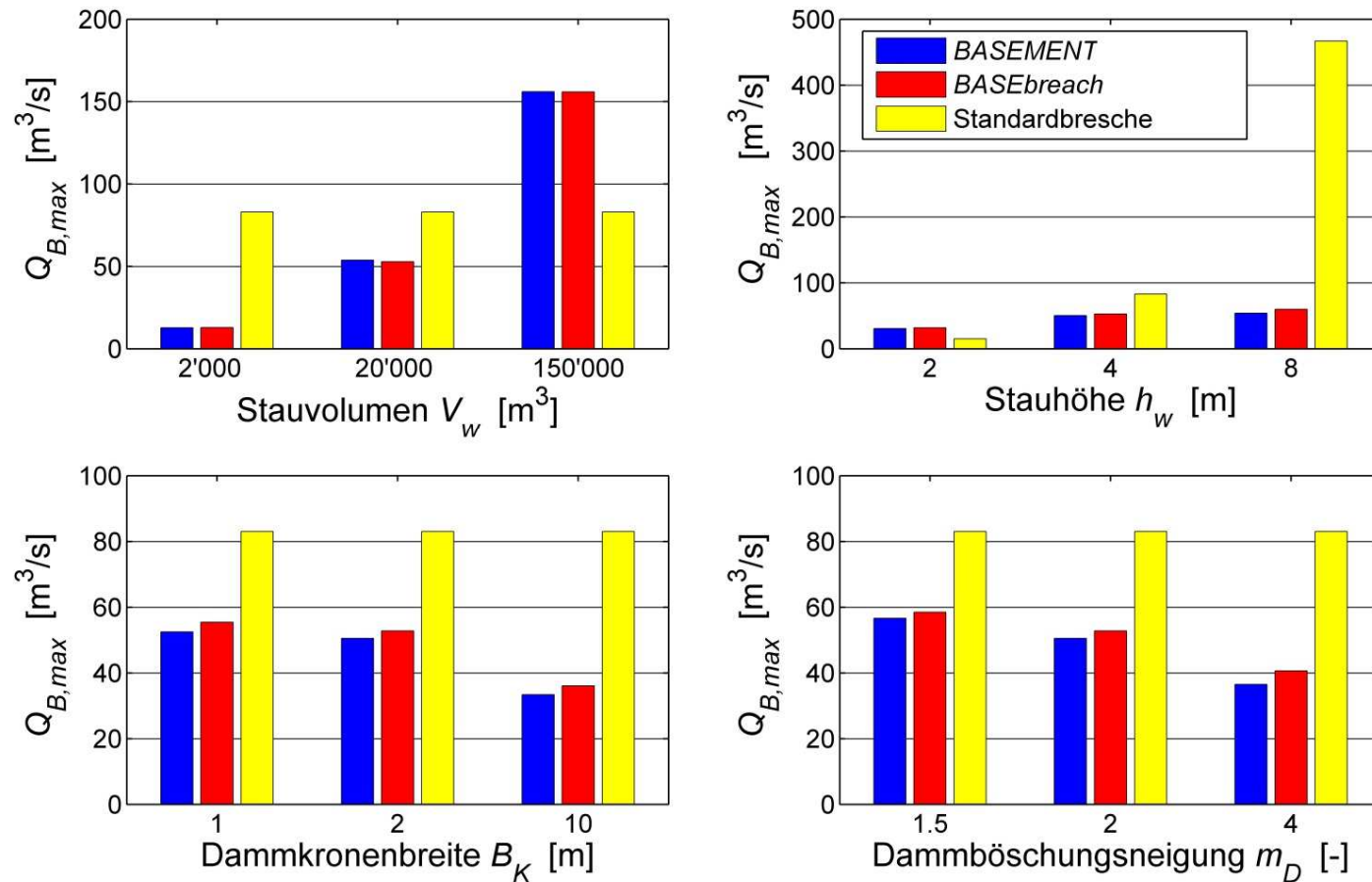
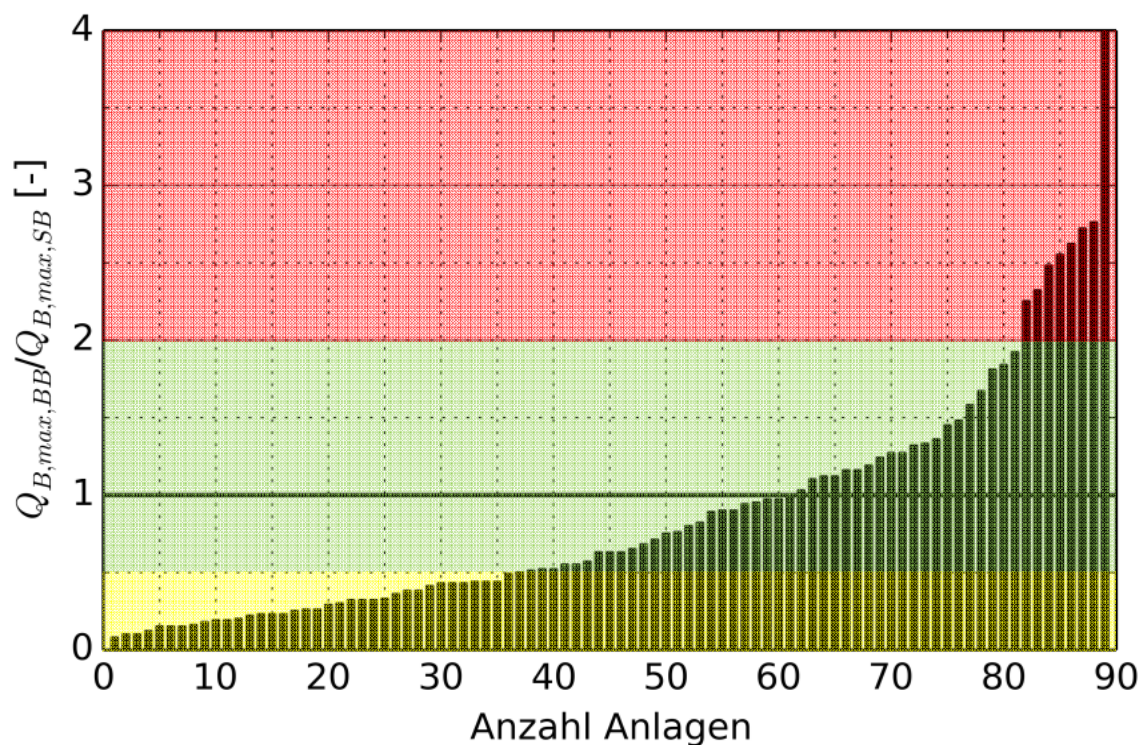


Fig. Comparaison *BASEMENT*, *BASEbreach* et brèche standard

Résultats de *BASEbreach*

Facteur de variation *BASEbreach*/brèche standard

- Variation du débit maximum à la brèche avec *BASEbreach* ($Q_{B,max,BB}$) en comparaison avec le débit maximum à la brèche avec une brèche standard ($Q_{B,max,SB}$)



BB >> SB

Résultats analogues

BB << SB

Fig. Facteur de variation ($Q_{B,max,BB}/Q_{B,max,SB}$) pour 89 installations pertinentes dans le canton de Zurich

Champ d'application de *BASEbreach*

- *BASEbreach* a été calibré pour les conditions du canton de Zurich et est valable pour certains domaines d'application définis

Tab. 2. Domaines d'application de *BASEbreach*

Paramètres	Champ d'application
Volume de retenue V_w	500 - 200'000 m ³
Hauteur de la digue H_D	1 - 10 m
Largeur du couronnement B_K	0.5 - 12 m
Pente des talus 1: m_D^*	1:1.2 - 1:4
Débit entrant en cas de crue Q_{in}	0 - 25 m ³ /s
Forme de la vallée (valeur α_0)	1 - 2

* Si les pentes en amont et en aval sont différentes, il convient de sélectionner la valeur moyenne

Développement de *BASEbreach* (I)

- **Formes de la vallée / de la retenue (valeur α_0)**
 - Actuellement: $1 \leq \alpha_0 \leq 2$ (prédéfini, dépend de V_w , H_D)
 - Extension: formes de la vallée $\alpha_0 > 2$ (p. ex. vallée en V)
 - Extension : α_0 à définir librement
- **Vitesse d'érosion v_e**
 - Actuellement prédéfini (paramètre de calibrage)
 - Extension : v_e librement choisi
- **Débit en cas de crue**
 - Actuellement: $Q_{in} \leq 25 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Extension : débit accru; élaborer des hypothèses applicables en cas de retenue pleine (p. ex. ajouter le débit excédentaire au débit à la brèche Q_B)

Evolution future de *BASEbreach* (II)

▪ Mécanisme de rupture

- Prise en compte des ruptures dues à un débordement (*overtopping*) et à une érosion interne (*piping*) (phases initiales différentes)
- Condition initiale au *piping*: brèche initiale plus importante, retenue partiellement remplie

▪ Matériau du remblai

- Erosion de barrages *cohésifs*: point d'inflexion vertical remontant de l'aval vers l'amont (*érosion régressive*)
- Limitation de l'érosion jusqu'à l'appui, c'est-à-dire limitation de l'étendue de l'érosion dans la largeur

▪ Incertitudes (recherche en cours)

- Quantifier les incertitudes relatives aux modèles ou aux paramètres
- Débits à la brèche résultants avec degré de probabilité
- Cartes d'inondation probabilistes pour l'évaluation du danger

Conclusions

- *BASEbreach* offre une alternative à l'approche de la brèche standard en cas de rupture progressive du remblai
- *BASEbreach* est actuellement limité à certains domaines d'application bien définis
- Evolution future de *BASEbreach*:
 - Extension du domaine d'application
 - Ouverture de certains paramètres (α_0 , v_e)
 - Augmentation de la convivialité (GUI)
 - Prise en compte des incertitudes (approche probabiliste)

Merci de votre attention

Pour en savoir plus sur le sujet:
Dr. David Vetsch, vetsch@vaw.baug.ethz.ch

Annexe

Formes de vallées idéalisées

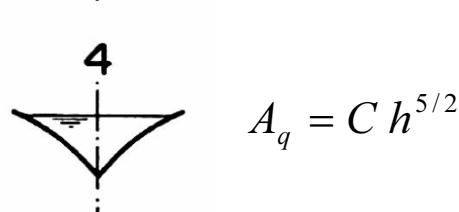
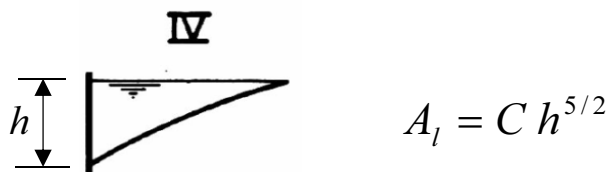
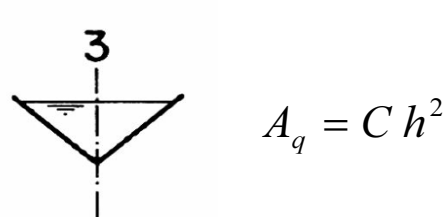
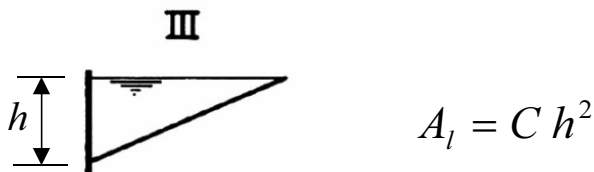
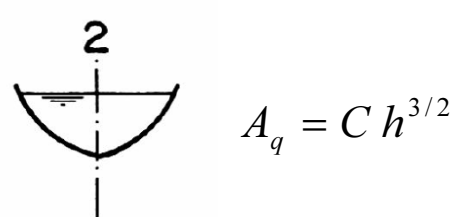
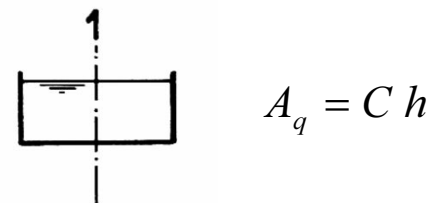
Profils longitudinaux et transversaux

$$A_l = C_1 h^l$$

$$A_q = C_2 h^q$$

Profil principal vers l'aval

Profil transversal de la vallée



La forme de la vallée
joue un rôle important
dans le calcul des ondes
de rupture des ouvrages
d'accumulation (p. ex. De
Lorenzo & Macchione
2014)!

Formes de vallées idéalisées

Paramètre morphologique α_0

$$V_w = b_0 z_w^{\alpha_0} \quad \text{mit} \quad \alpha_0 = l + q - 1$$

α_0	Profil longitudinal				
		I	II	III	IV
Profil transversal	1	1	1.5	2	2.5
	2	1.5	2*	2.5	3*
	3	2	2.5	3	3.5
	4	2.5	3*	3.5	4*

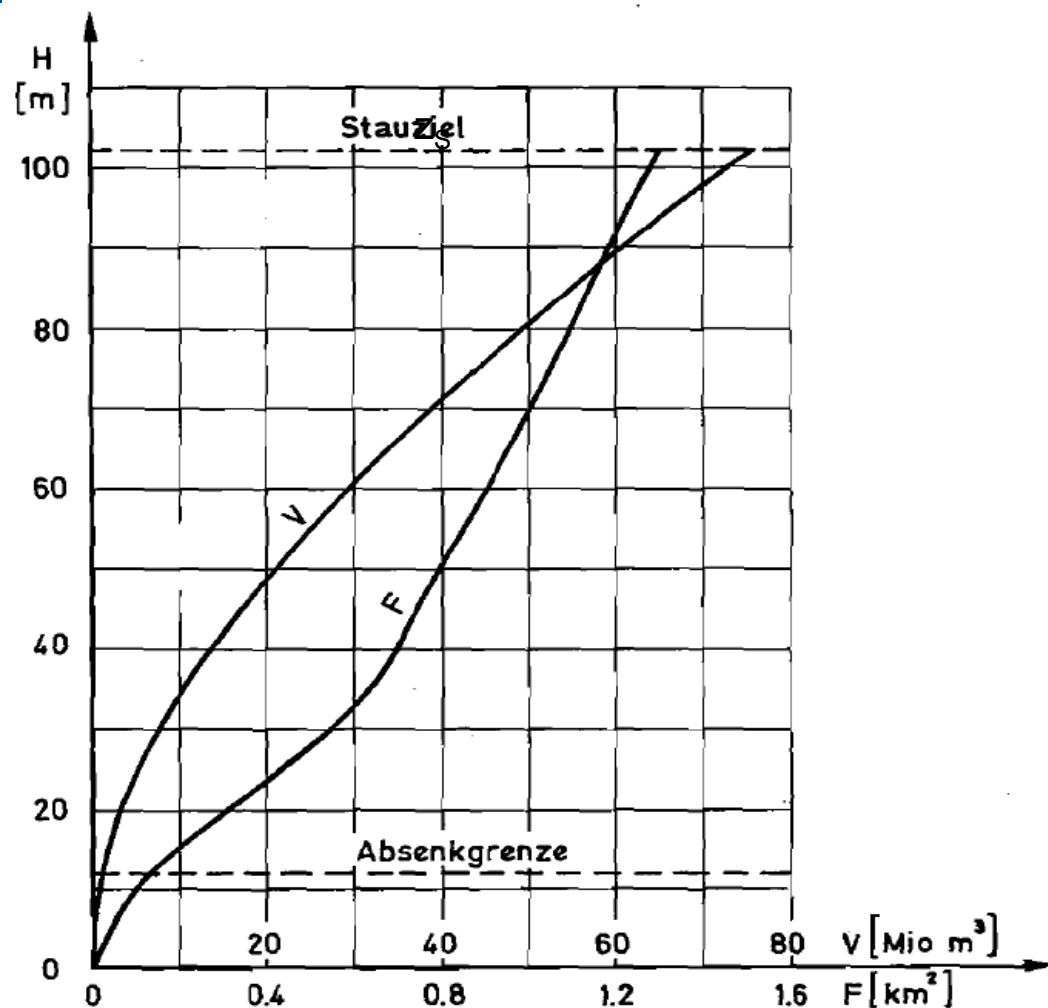
* Relation n'est qu'approximative

Utilisations principales

Source: Kühne, A. (1978). Charakteristische Kenngrößen Schweizerischer Speicherseen.
Geographica Helvetica, **33**(4), 191-199.

Courbe hauteur-volume, ligne du plan d'eau

Exemple: lac de Göscheneneralp



$$V(z_w) = \int_0^{z_s} A(z_w) dh$$

$$V(z_w) = a z_w^b$$

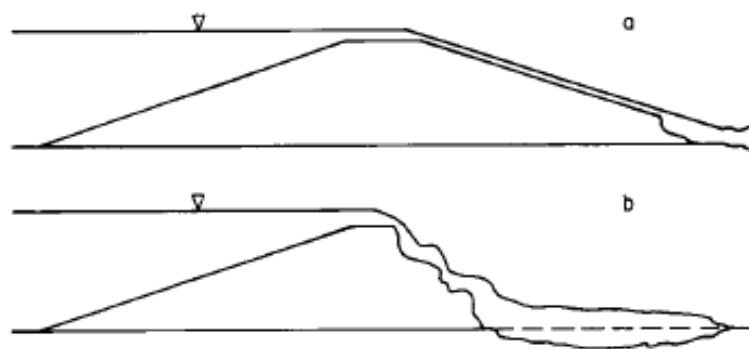
Speicher	V_{\max} (Mio m ³)	a (m ^{3-b})	b (-)
Lac de la Gruyère	200.0	$4.22 \cdot 10^1$	3.56
Grimseensee	101.0	$1.71 \cdot 10^2$	2.89
Schiffenensee	66.0	$5.91 \cdot 10^3$	2.56
Oberaarsee	60.7	$7.07 \cdot 10^2$	2.52
Lac de l'Hongrin	53.2	$2.44 \cdot 10^1$	3.13
Räterischsbodensee	26.3	$4.37 \cdot 10^3$	2.02
Göscheneneralpsee	76.0	$1.79 \cdot 10^4$	1.81
Lungernsee	65.0	$1.06 \cdot 10^4$	2.07
Lago di Lucendro	25.6	$2.01 \cdot 10^3$	2.07
Wägitalersee	153.0	$8.43 \cdot 10^4$	1.83
Sihlsee	96.5	$1.76 \cdot 10^5$	2.21
Limmerensee	93.0	$9.41 \cdot 10^3$	1.91
Klöntalersee	56.4	$2.70 \cdot 10^3$	2.59

Source: Kühne, A. (1978). Charakteristische Kenngrößen Schweizerischer Speicherseen. *Geographica Helvetica*, **33**(4), 191-199.

Erosion régressive vs. *érosion progressive*

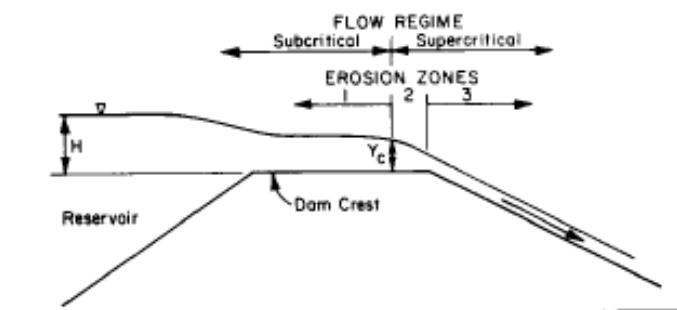
Erosion régressive

- Point d'inflexion vertical, remontant de l'aval vers l'amont
- Matériau du barrage cohésif



Erosion progressive

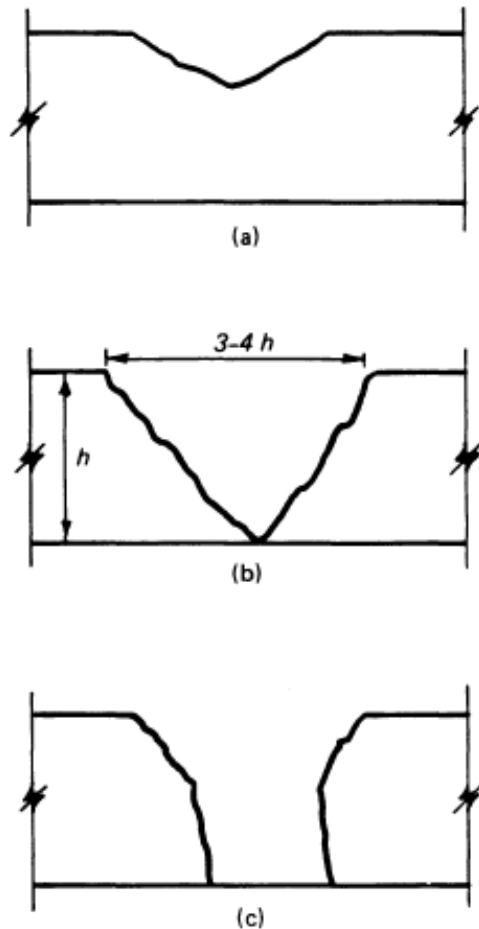
- Erosion progressive de la surface
- Matériau du barrage non cohésif



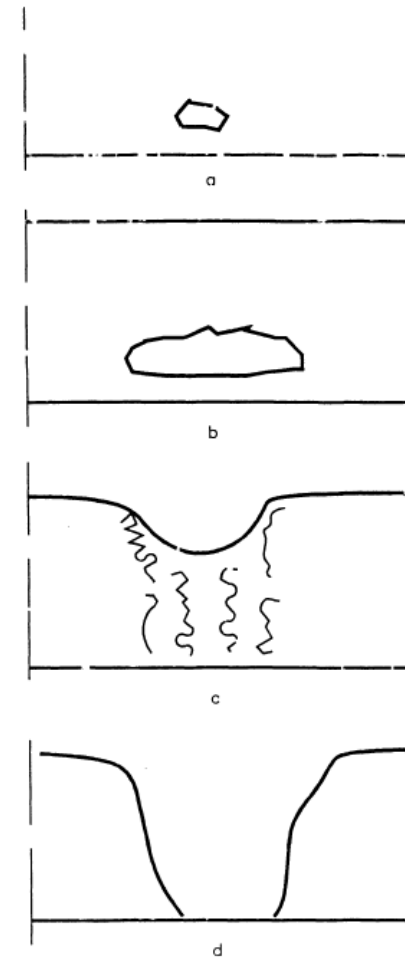
Source: Wahl T.L. (1998). Prediction of embankment dam breach parameters. A literature review and needs assessment. *Dam Safety Research Report DSO-98-004*, Water Resources Research Laboratory, Denver, USA.

Défaillance consécutive à un débordement et à une érosion interne

Formation d'une brèche due à un débordement



Formation d'une brèche due à une érosion interne (piping)



Source: Singh V.P. (1996). *Dam breach modeling technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.