

Sécurité des ouvrages d'accumulation

Documentation de base relative aux critères d'assujettissement

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, série Eaux -
Rapporti dell'UFAG, serie Acqua
Bienne, 2002

Version 1.0 (Juin 2002)



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Bischof, Roland	Ingenieurbüro für bauliche Anlagen der Stadt Zürich (IBA), Zürich
Hauenstein, Walter Dr Kalt, Leo	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden Baudepartement des Kantons St. Gallen, Fachstelle Talsperrensicherheit, Tiefbau- und Strassenverwaltung, St. Gallen
Müller, Rudolf W. (secrétaire)	Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel
Pougatsch, Henri (président)	Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Raboud, Pierre-Benoît Dr	Département de la santé, des affaires sociales et de l'énergie, Service des forces hydrauliques, (DSSE – SFH), Sion
Vetterli, Willy	Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Zürich



TABLE DE MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION	3
1. IDENTIFICATION DES OUVRAGES D'ACCUMULATION	
1.1 Définition d'un ouvrage d'accumulation et de ses composantes	5
1.2 Hauteur déterminante d'assujettissement	7
1.3 Volume déterminant d'assujettissement	14
1.4 Cas spécial : évacuateur de crue avec risque d'obstruction	15
2. NOTION DE DANGER PARTICULIER	
2.1 Définition générale du danger particulier	16
2.2 Types de constructions et de lieux concernés	17
2.3 Analyse des conséquences de la rupture de barrage	18
2.4 Valeurs seuils pour la mesure du danger particulier	21
2.5 Cas des aménagements en cascade	23
2.6 Situations sans danger particulier	23
3. DÉTERMINATION DES OUVRAGES D'ACCUMULATION À ASSUJETTIR	
3.1 Organes de décision d'assujettissement	24
3.2 Processus d'évaluation et de décision	24
3.3 Levée de l'assujettissement	24
4. BIBLIOGRAPHIE	27
5. ANNEXES	28



DOCUMENTATION DE BASE RELATIVE AUX CRITÈRES D'ASSUJETISSEMENT À L'ORDONNANCE SUR LA SECURITE DES OUVRAGES D'ACCUMULATION (OSOA)

INTRODUCTION

Bases légales

Les bases légales relatives à la sécurité des ouvrages d'accumulation sont constituées par l'article 3^{bis} de la loi fédérale du 22 juin 1877 sur la police des eaux (RS 721.10), ainsi que l'ordonnance du 7 décembre 1998 sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) (RS 721.102).

Le champ d'application de l'OSOA est donné par son article 1. Il indique que l'OSOA s'applique automatiquement aux ouvrages d'accumulation dont la hauteur de retenue au-dessus du niveau d'étiage du cours d'eau ou du niveau du thalweg est de 10 m au moins, ou, si cette hauteur est de 5 m au moins, à ceux dont la capacité de retenue est supérieure à 50'000 m³ (Figure 1). Elle est aussi appliquée aux ouvrages d'accumulation de moindres dimensions lorsqu'ils représentent un danger particulier pour les biens et les personnes. Elle n'est par contre pas appliquée s'il l'on établit que les ouvrages d'accumulation ne constituent aucun danger particulier pour les biens et les personnes. L'OSOA confie la surveillance des petites retenues aux cantons (Art.22 OSOA).

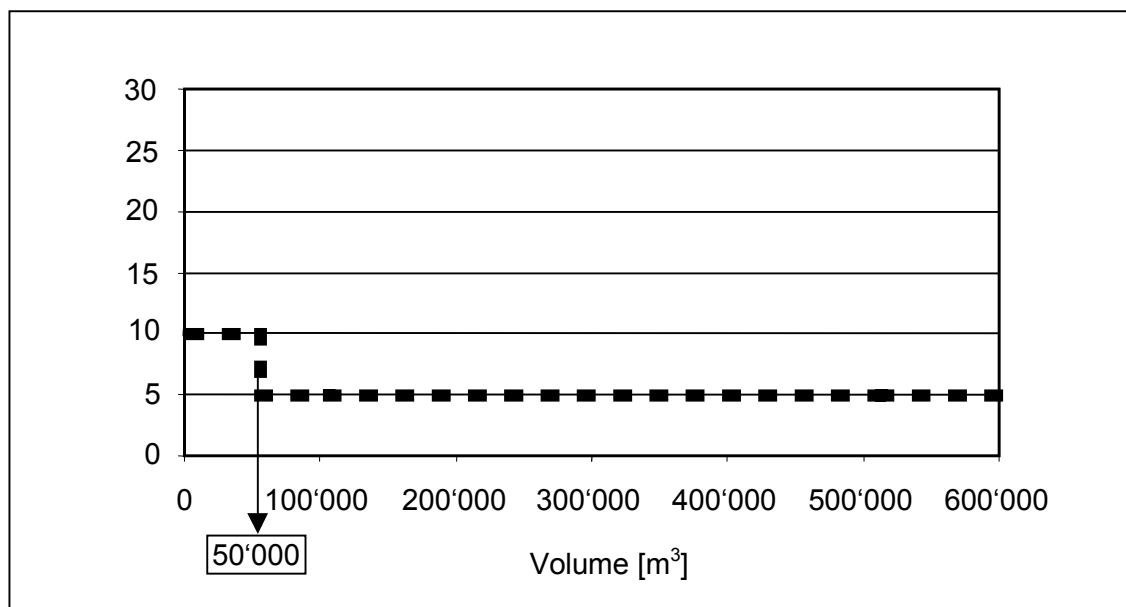


Figure 1: Critères d'assujettissement à une autorité de surveillance selon l'ordonnance sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA)

Les ouvrages d'accumulation géométriques qui se situent au-dessus de la ligne pointillée répondent en raison de leurs dimensions aux critères OSOA; ceux qui se situent en-dessous ne seront pris en compte que s'ils répondent aux critères du danger particulier.

Objectif de la documentation de base relative aux critères d'assujettissement

En vertu de l'article 26 OSOA, l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) peut préparer des directives en collaboration avec des représentants des autorités cantonales, des milieux scientifiques, des organisations professionnelles et de l'économie. Afin de préciser dans les directives les critères de décision en vue d'un assujettissement ou non d'un ouvrage d'accumulation au contrôle d'une autorité de surveillance fédérale ou cantonale, l'OFEG a formé un groupe de travail. Ce dernier a préparé le présent rapport qui a servi de documentation de base pour la rédaction des directives. Cette documentation de base peut être employée comme document explicatif et complémentaire aux directives.

Les critères d'assujettissement qui ont été définis sont applicables à tous les types d'ouvrages d'accumulation susceptibles, de manière temporaire ou permanente, de relever un plan d'eau ou d'accumuler de l'eau ou des boues (cf. Art. 2 alinéa 1 OSOA). Il faut relever qu'outre des critères géométriques (hauteur, volume), les critères se basent aussi sur les effets dommageables consécutifs à une rupture éventuelle d'un ouvrage d'accumulation. Les conséquences d'une telle rupture sont analysées sans introduction d'une probabilité d'occurrence.

Le présent rapport s'attache

- à définir les notions de base nécessaires,
- à fournir toutes les indications utiles pour déterminer la hauteur et le volume déterminants de la retenue en vue d'un assujettissement à une autorité de surveillance (Art. 1 alinéa 1 OSOA) et pour fixer la répartition des tâches entre la Confédération et cantons (Art. 21, alinéa 2 OSOA),
- à préciser la notion de danger particulier,
- à indiquer le mode d'évaluation des conséquences d'une rupture,
- à préciser les critères de décision et les règles d'assujettissement.

Dans le cadre de ce travail, un mandat a été confié à un bureau spécialisé afin de mettre au point une méthode simple permettant d'évaluer la propagation à 2 dimensions d'une onde de submersion suite à la rupture d'un ouvrage de retenue. Cette méthode est limitée aux ouvrages d'accumulation de petite hauteur de retenue et peut être utile pour déterminer si les critères de danger particulier sont atteints. Sa description, ainsi que des diagrammes, sont donnée en annexe.



1. IDENTIFICATION DES OUVRAGES D'ACCUMULATION

1.1 Définition d'un ouvrage d'accumulation et de ses composantes

Ouvrages d'accumulation pouvant faire l'objet d'un assujettissement

Les ouvrages d'accumulation sont constitués d'un ouvrage de retenue (barrage) et d'une zone de retenue (ou bassin d'accumulation).

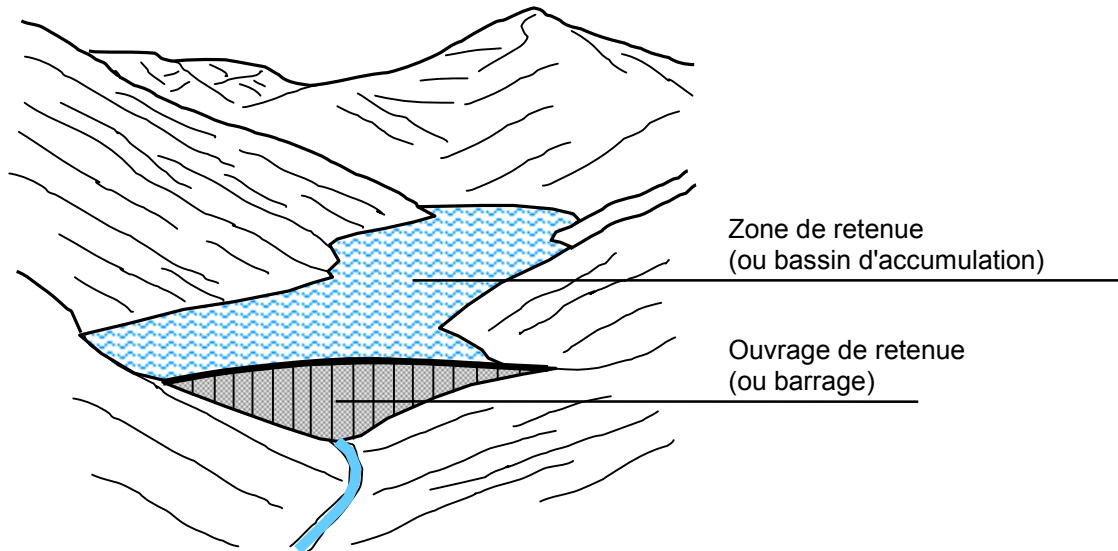


Figure 2 : Schéma d'un ouvrage d'accumulation et de ses composantes

Comme l'indique l'article 2, alinéa 1 OSOA, ils sont destinés à relever un plan d'eau ou à accumuler de l'eau, des sédiments ou des boues. On entend par boues, un mélange d'eau et de fines particules.

En stockant de l'eau, ils peuvent avoir comme fonction principale la production d'électricité, l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la production de neige artificielle, la pisciculture, la constitution d'une réserve incendie, ainsi que la régularisation des lacs. Ils servent encore à d'autres buts tels que biotopes, réservoirs subsistant d'anciens aménagements, loisirs.

Les ouvrages d'accumulation remplissent aussi des fonctions accessoires telles que par exemple la navigation, la pêche, la baignade, etc. L'ouvrage de retenue peut aussi servir de support à une voie de communication ou au passage de conduites industrielles.

Entrent dans une catégorie d'ouvrages d'accumulation spéciaux, les ouvrages d'accumulation de protection, pour autant qu'ils soient susceptibles de retenir des eaux, des sédiments ou des boues de manière temporaire ou permanente. Il s'agit d'aménagements servant notamment de bassins de protection contre les crues ou les avalanches, de barrages de rétention de sédiments et de laves torrentielles.

Des ouvrages peuvent avoir des fonctions combinées.

Aménagements n'entrant pas dans la catégorie des ouvrages d'accumulation

Ne sont pas considérés comme ouvrages d'accumulation, les seuils construits en vue de la stabilisation des lits des torrents ainsi que les endiguements qui font partie des mesures de protection contre les crues. Ces constructions relèvent de la compétence des cantons dans le cadre de la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (LACE).

Les réservoirs d'eau potable en béton armé, de même que les piscines ne sont également pas considérées comme ouvrages d'accumulation.

Types d'ouvrages de retenue (barrages)

- Barrages en béton (barrage-poids, barrage voûte, barrage à contreforts, barrage à voûtes multiples)
- Barrages en remblai (digue en terre ou en enrochement)
- Barrages mobiles et digues latérales
Par digue latérale, on entend un ouvrage intégré à un aménagement en rivière qui comportenotamment un barrage mobile. Les digues latérales permettent donc de surélever le plan d'eau au-dessus du terrain naturel et de créer une zone de retenue permanente. L'aménagement doit être considéré comme un tout (Figure 3).

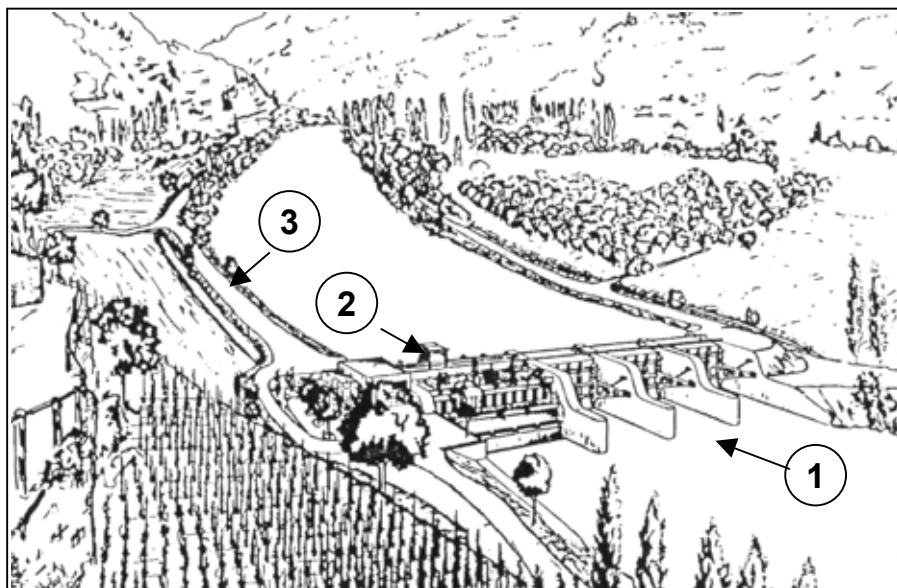


Figure 3: Schéma d'un barrage mobile et de ses composantes
Légende : 1 Partie mobile ; 2 Usine ; 3 Digues latérales

Mode d'implantation des ouvrages

On distingue les cas d'implantation des ouvrages suivants:

- Ouvrages sur un cours d'eau (barrages mobiles inclus)
- Ouvrages hors d'un cours d'eau (bassin artificiel sur terrain naturel)
- Ouvrages en vue de la surélévation d'un lac naturel



Zone de retenue (ou bassin d'accumulation)

La zone de retenue (ou bassin d'accumulation) est un lac ou bassin artificiel dans lequel une grande quantité d'eau, de sédiments ou de boues peut être accumulée. De la glace et/ou de la neige sont aussi susceptibles de s'accumuler dans la zone de retenue (ou bassin d'accumulation).

L'exploitation de la retenue ou du bassin peut conduire à des variations du plan d'eau. Dans le cadre des critères d'assujettissement, le niveau normal d'exploitation (de retenue) est un paramètre principal.

La longueur et la surface de la retenue sont déterminées au niveau normal d'exploitation. Le point le plus éloigné (queue de retenue) se situe où la rivière principale pénètre dans la retenue. Pour les barrages en rivière, la retenue s'arrête où la courbe de remous rejoint le niveau d'étiage (Q_{347}) dans le cours d'eau à l'amont.

Le volume total de la retenue est compté du fond du lit jusqu'à son niveau normal d'exploitation. Comme on le verra plus loin, le volume total de la retenue ne correspond pas forcément au volume déterminant pour l'assujettissement.

1.2 Hauteur déterminante d'assujettissement

Définition de la hauteur déterminante d'assujettissement

La hauteur déterminante d'assujettissement est définie par la différence entre le niveau normal d'exploitation et un point bas de référence qui correspond, selon l'article 1 alinéa 1 OSOA, soit au niveau d'étiage du cours d'eau soit au niveau du thalweg.¹

Remarque importante:

La hauteur d'assujettissement ne correspond pas à la hauteur du barrage.

¹ Cette hauteur peut être assimilée à la hauteur de la lame d'eau au site en cas de rupture soudaine de l'ouvrage de retenue (barrage) en exploitation normale.

Niveau normal d'exploitation (de retenue)

Le niveau normal de retenue correspond au niveau du seuil fixe d'un déversoir non vanné. Pour une retenue dont le débit excédentaire est évacué en totalité ou en partie par des vannes mobiles, c'est le niveau maximal auquel le plan d'eau peut monter en exploitation normale (Figure 4). En règle général, on ne tient pas compte de la surélévation occasionnée par une crue. Dans le cas d'aménagement hydroélectrique, le niveau normal de retenue peut aussi être fixé dans la concession.

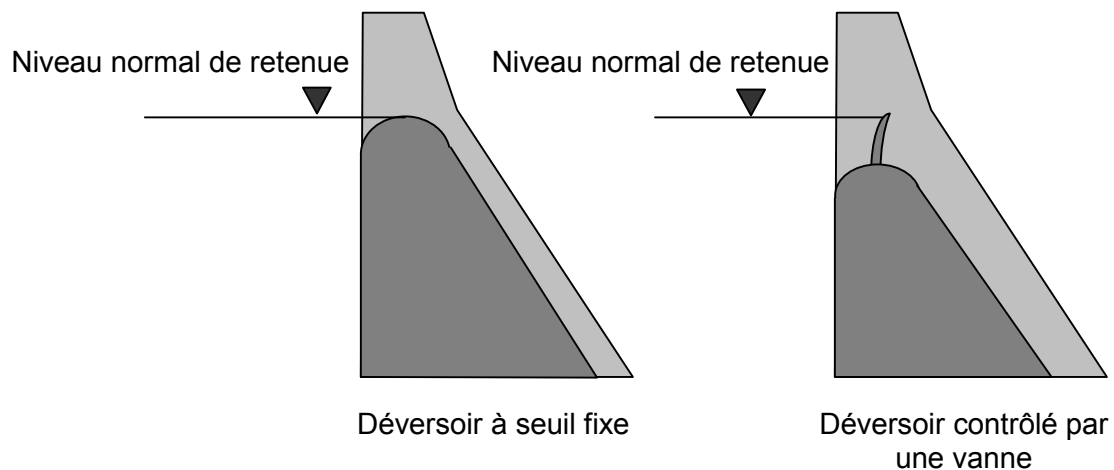


Figure 4: Situation possible du niveau normal d'exploitation

En ce qui concerne les bassins de protection contre les crues, le niveau normal correspond au niveau du seuil de l'évacuateur de crue. Quant aux barrages de rétention de sédiments et de laves torrentielles, la limite supérieure possible d'accumulation des matériaux est prise en compte. Le niveau normal correspond, selon le type d'ouvrage (barrage en béton ou en remblai avec ou sans pertuis sur la hauteur du barrage), au niveau du seuil d'un déversoir pour un barrage en béton avec ou sans "barbacanes" ou au niveau supérieur de l'ouverture verticale; dans le cas où cette ouverture est munie d'une grille ou de madriers horizontaux, le niveau supérieur de ces éléments sera pris en compte en raison du risque d'obstruction (Figure 5). Ces considérations s'appliquent aussi au cas des barrages de protection contre les avalanches.

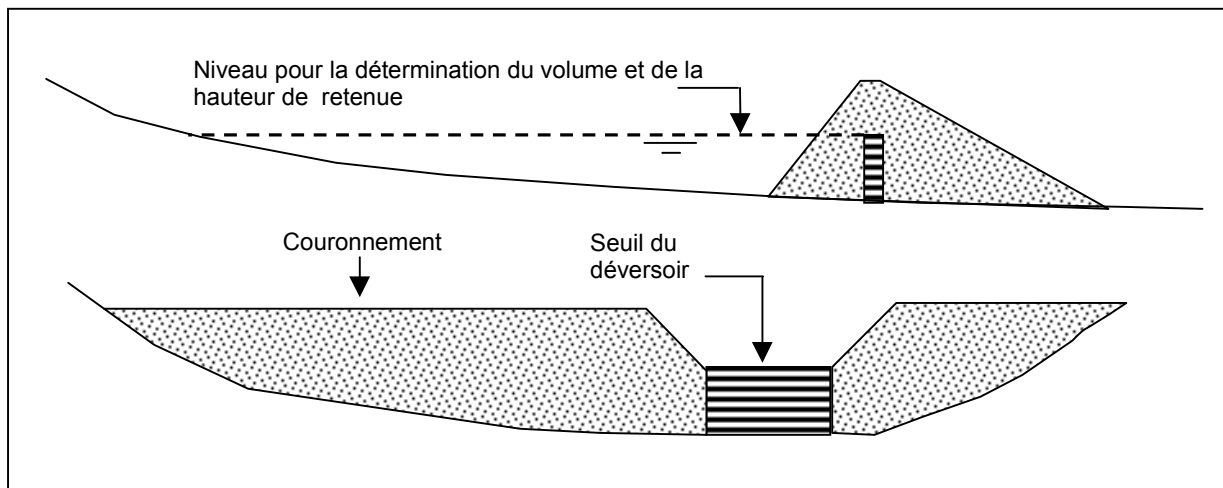


Figure 5: Bassin de protection contre les avalanches avec ou sans dispositif pour retenir les sédiments (par exemple sous forme de lave torrentielle): en haut: profil le long de la retenue avec coupe de la digue; en bas: élévation de la digue avec pertuis et déversoir

Définition du point bas de référence

Par "niveau du thalweg", il faut entendre le niveau de référence du terrain naturel qui peut être situé soit à l'amont soit à l'aval de l'ouvrage de retenue. Cette définition s'applique aux ouvrages de retenue et aux digues latérales.

Par "niveau d'étiage", il faut prendre en compte le niveau correspondant à Q_{347} . Cette définition s'applique aux barrages en rivière.

On distingue les cas suivants:

Pour les ouvrages d'accumulation sur cours d'eau:

Le thalweg correspond au niveau du terrain naturel défini par le lit de la rivière directement à l'amont de l'ouvrage (Figure 6). La présence d'une éventuelle décharge à l'aval du barrage n'entre pas en ligne de compte.

Cette définition s'applique aussi au cas des aménagements servant de bassins de protection contre les crues ou les avalanches, de barrages de rétention de sédiments et de laves torrentielles.

Dans le cas des barrages en rivière, le niveau d'étiage Q_{347} par rapport à l'état naturel est admis comme point bas de référence (Figure 7).

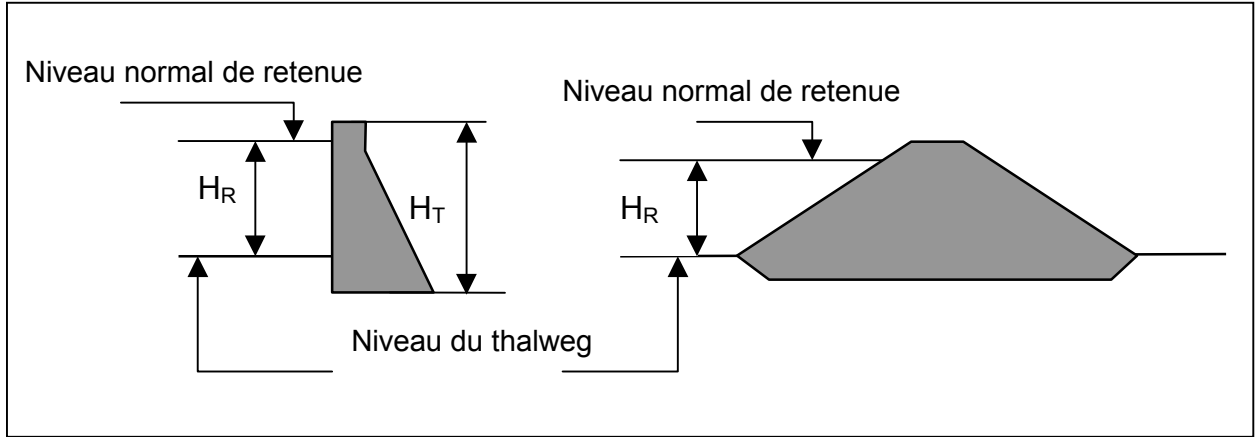


Figure 6: Définition de la hauteur de retenue (H_R) d'un ouvrage sur un cours d'eau (H_T = hauteur de l'ouvrage de retenue)

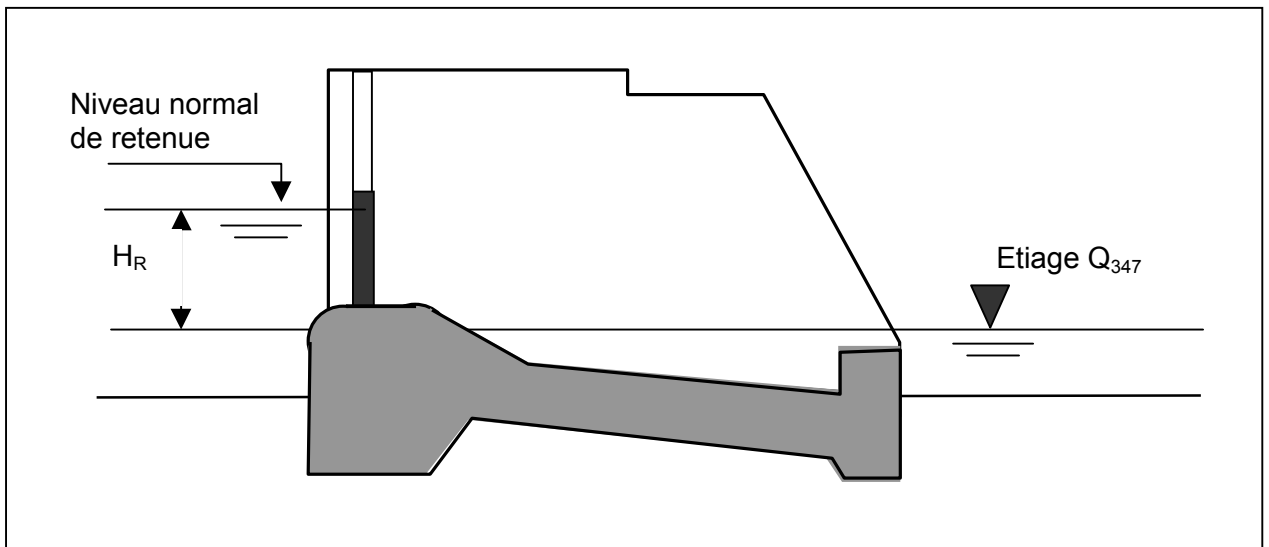


Figure 7: Définition de la hauteur de retenue (H_R) d'un barrage en rivière

Pour les ouvrages d'accumulation hors cours d'eau:

Selon le cas, sont admis comme point bas de référence (Figure 8) :

- a) le fond du bassin, si son niveau est identique à celui du terrain à l'aval;
- b) le fond du bassin, si son niveau est supérieur à celui du terrain à l'aval;
- c) le niveau du terrain à l'aval, si son niveau est supérieur à celui du niveau du fond du bassin;
- d) dans le cas où le bassin est en grande partie en déblai, le fond du bassin si son niveau est identique ou supérieur à celui du terrain naturel à l'aval et qu'il existe un risque d'érosion du terrain naturel;
- e) le niveau du terrain naturel à l'amont, pour autant qu'il n'existe pas de risque d'érosion du terrain naturel (présence de rocher).

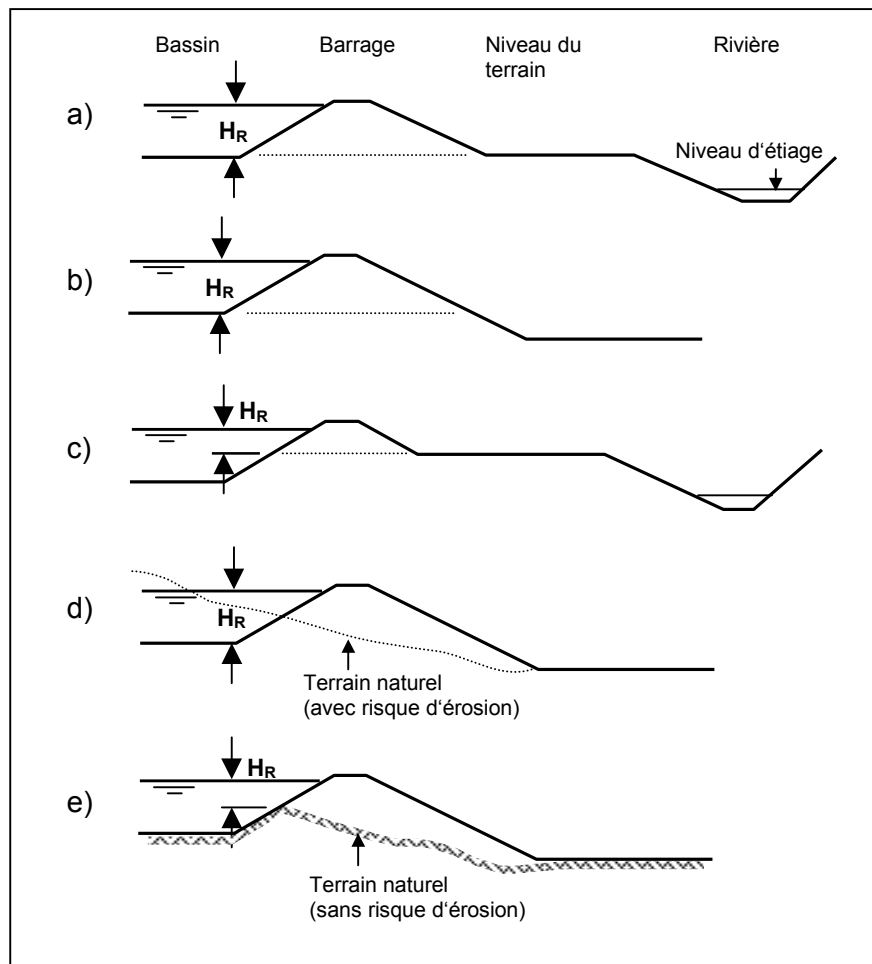


Figure 8 : Définition de la hauteur de retenue (H_R) d'un ouvrage hors d'un cours d'eau

Lors de surélévation d'un lac naturel :

Le niveau du lac naturel avant surélévation est admis comme point bas de référence (Figure 9). En cas de fluctuation prononcée de ce niveau, le niveau moyen sur 10 ans est pris en compte.

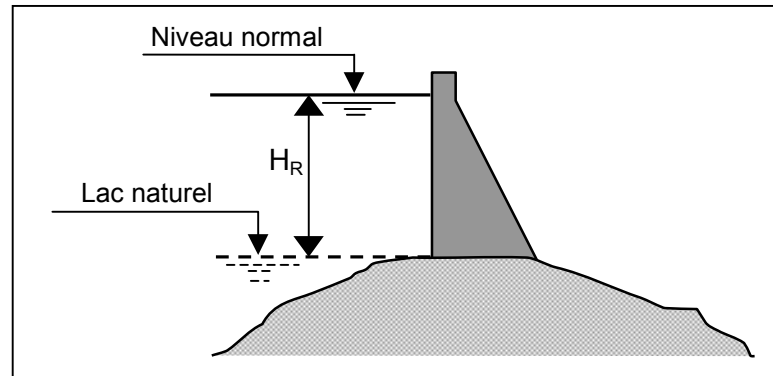


Figure 9: Définition de la hauteur de retenue suite à une surélévation d'un lac naturel

Ouvrages d'accumulation avec dépôt important de matériaux solides

Lors de la détermination de la hauteur déterminante pour l'assujettissement, des dépôts de matériaux solides peuvent être pris en compte pour autant que des essais confirment qu'ils sont consolidés. Si de tels essais font défaut, la hauteur sera déterminée sans déduction de la hauteur des dépôts (Figure 10).

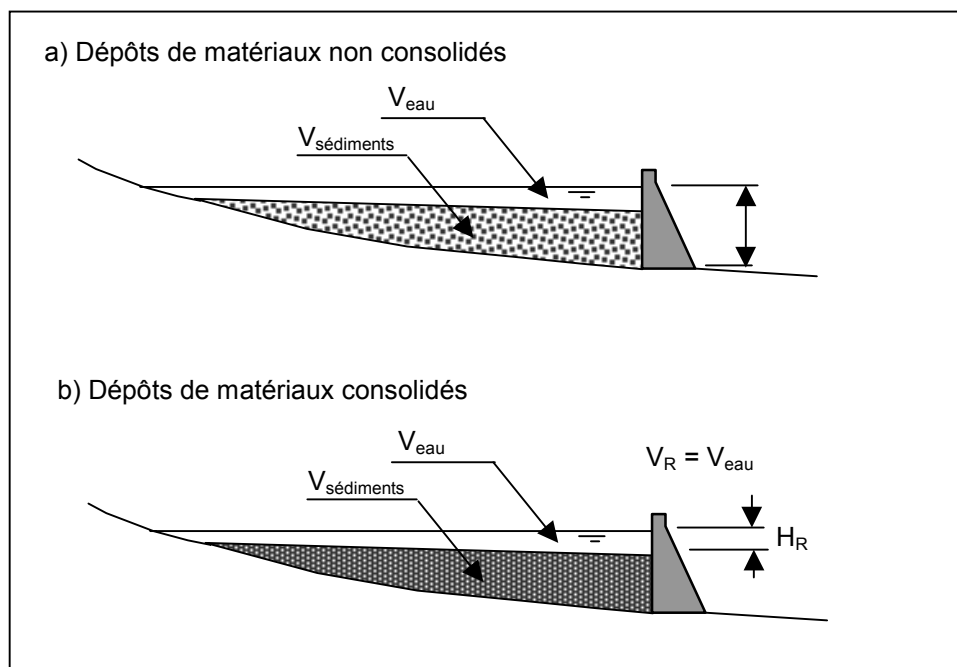


Figure 10 : Définition de la hauteur de retenue H_R et du volume accumulé V_R pour un ouvrage d'accumulation avec dépôts de matériaux solides

V_{eau} = Volume d'eau au-dessus du dépôt des sédiments, $V_{sédiments}$ = Volume du dépôt des sédiments,
 H_R = Hauteur de retenue.



1.3 Volume déterminant d'assujettissement

Définition du volume déterminant d'assujettissement

Le volume déterminant d'assujettissement considéré est celui qui peut s'échapper de la retenue en cas de rupture soudaine de l'ouvrage de retenue en exploitation normale. Il est calculé entre le niveau normal d'exploitation et une ligne de fond partant du point bas de référence considéré pour le calcul de la hauteur.

Remarque importante:

Le volume d'assujettissement ne correspond pas forcément au volume utile ou total de la retenue

Mode de détermination des volumes

Pour les ouvrages d'accumulation sur cours d'eau:

Pour les ouvrages de retenue, le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le niveau du point bas de référence du thalweg:

Pour les barrages en rivière, le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le niveau d'étiage par rapport à l'état naturel correspondant à Q_{347} .

En ce qui concerne les ouvrages d'accumulation dont la fonction principale est la rétention de sédiments et de laves torrentielles, le volume est calculé en admettant le plan des matériaux sédiments horizontal au niveau normal de retenue.

Dans le cas de petits et moyens ouvrages de retenue pour lesquels un haut risque d'obstruction de l'évacuateur de crue par des corps flottants est possible, un volume supérieur au volume déterminant pour l'assujettissement sera pris en compte pour le calcul de l'onde de submersion (voir 2.3 "Analyse de conséquence d'une rupture de barrage").

Pour les ouvrages d'accumulation hors cours d'eau:

Le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le fond du bassin, si son niveau est égal ou supérieur à celui du terrain à l'aval;

Le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le niveau du terrain à l'aval, si son niveau est supérieur à celui du niveau du fond du bassin;

Le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le niveau du terrain à l'amont, si son niveau est supérieur à celui du niveau du fond du bassin et qu'il n'y a pas de risque d'érosion du terrain naturel jusqu'au niveau du fond du bassin.

Lors de surélévation d'un lac naturel:

Le volume est calculé entre le niveau normal de retenue et le niveau du lac naturel admis avant sa surélévation.



Ouvrages d'accumulation avec dépôt important de matériaux solides (Figure 10)

Lors de la détermination du volume déterminant pour la assujettissement, des dépôts de matériaux solides peuvent être pris en compte pour autant que des essais confirment qu'ils sont consolidés. Si de tels essais font défaut, le volume sera déterminé en considérant la hauteur déterminante (selon chapitre 1.2) sans déduire les dépôts.

1.4 Cas spécial: évacuateur de crue avec risque d'obstruction

S'il existe pour un ouvrage d'accumulation de petite hauteur de retenue une possibilité d'obstruction de l'évacuateur de crue par des corps flottants (par exemple, en raison de la présence d'une grille fine ou d'un organe de décharge de faibles dimensions), la hauteur de retenue sera comprise entre le niveau du couronnement et le point bas de référence. Cela signifie que la zone de retenue est considérée pleine jusqu'au niveau du couronnement.



2. NOTION DE DANGER PARTICULIER

2.1 Définition générale du danger particulier

Un danger particulier existe si, en cas de rupture soudaine d'un ouvrage de retenue, au moins une habitation ou un lieu de travail ou un bâtiment public ou un camping public ou une voie de communication très fréquentée est touché.

Ces critères se basent sur la hauteur d'eau, ainsi que sur le produit de la hauteur d'eau par la vitesse d'écoulement de l'onde de submersion lorsqu'un des éléments décrits plus haut est concerné (habitation, lieu de travail, bâtiment public, une place de camping publique, une voie de communication très fréquentée).

Afin de définir l'importance de l'effet dommageable des ondes de submersion, les critères d'intensité lors d'inondation qui figurent dans la publication "Prise en compte des dangers naturels dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire" (Publication de l'OFEE, OFAT, OFEFP - 1997) servent de référence. Il a aussi été tenu compte d'indications tirées de la publication "Downstream Hazard Classification Guidelines, ACER Technical Memorandum No 11", USBR, Denver, Colorado (December 1988).

Il faut noter ici que, comparé à une crue naturelle, le passage d'une onde de submersion consécutif à une rupture de barrage est un événement de durée relativement courte, particulièrement s'il s'agit d'une petite retenue. De ce fait, les valeurs retenues comme critères de d'assujettissement représentent les limites à partir desquelles il existe un danger particulier marqué pour la construction et le lieu considéré. Il va de soi que pour des valeurs inférieures aux seuils fixés, des dégâts à des constructions ne peuvent pas être exclus. Selon l'importance de la zone touchée et des conséquences d'une onde de submersion, un assujettissement de l'ouvrage d'accumulation peut être envisagé pour des valeurs inférieures aux limites proposées.

2.2 Types de constructions et de lieux concernés

Habitations ²	On prend en compte une habitation isolée ou plusieurs habitations (chalets, maisons individuelles, immeubles, fermes...) occupées à l'année ou temporairement (week-end, mois, saison) par une ou plusieurs personnes
Lieux de travail ²	Atelier, bureau, importantes installations de loisirs, etc. Occupation permanente ou au moins 2 heures quotidiennement. On prend en compte un atelier ou une usine isolée ou une zone industrielle (particulièrement celles comportant des risques de pollution: chimie, stockage d'hydrocarbure, station d'épuration). Par contre, les zones agricoles (champs cultivés, pâturage, etc.) ne sont pas prises en compte.
Bâtiments publics	Bâtiments administratifs Ecoles Hôpitaux
Place de camping	Camping public
Voies de communication très fréquentées	Routes nationales Routes cantonales Chemins de fer N'entrent pas en ligne de compte: Sentiers pédestres, routes forestières, routes secondaires

² Une distinction est faite entre les constructions en dur et les constructions légères (maisons en bois, baraquements)



2.3 Analyse des conséquences de la rupture de barrage

Calcul de l'onde de submersion

Pour déterminer si un danger particulier existe, le calcul de l'extension de l'onde de submersion suite à la rupture d'un ouvrage de retenue est requis.

Modèle de calcul

L'onde de submersion qui se produit suite à une rupture d'un barrage est déterminée par les équations des écoulements non stationnaires déduites de celles de B. De Saint-Venant.

Selon le problème posé, les possibilités de calcul vont des calculs à la main par un modèle unidimensionnel jusqu'à la résolution par ordinateur d'un modèle bidimensionnel. Pour fixer de façon simple le débit en un endroit déterminé à l'aval du barrage, les valeurs estimées par un calcul à la main suffisent.

Méthodes de calcul	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Calculs à la main:</i> Le débit au site du barrage, de même que son atténuation en divers points caractéristiques situés à l'aval peuvent être déterminés à l'aide de formules simples et de diagrammes. ▪ <i>Modèle 1D:</i> Cette méthode est particulièrement bien adaptée le long de tronçons de bassins étendus et bien limités dans lesquels l'écoulement progresse selon une direction déterminée. Le tronçon considéré est modélisé par une série de profils en travers le long de l'axe du bassin. Il existe divers logiciels développés en Europe et aux USA (le bulletin ICOLD 111 Etude d'onde de rupture de barrages, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 1998, fournit un résumé de différents programmes disponibles) ▪ <i>Modèle 2D:</i> Ce modèle peut s'appliquer à toutes formes de bassin; il est particulièrement bien adapté aux régions de plaine, où l'écoulement peut prendre plusieurs directions. La région considérée est discrétisée en plusieurs éléments. La résolution numérique s'effectue par pas de temps et par l'intégration successive d'éléments d'un système d'équations différentielles. L'écoulement dans chaque cellule est déterminé dans 2 directions. La répartition spatiale et dans le temps de l'onde de submersion peut être faite pour n'importe quel relief de terrain.
Scénario de rupture	<p>La rupture survient soudainement (rupture)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour les barrages voûte: rupture totale de l'ensemble du barrage ▪ Pour les barrages poids: rupture totale de l'ensemble du barrages (éventuellement sur une largeur équivalente à plusieurs plots) ▪ Pour les digues: formation d'une brèche (en règle générale, de forme trapézoïdale, de base égale à 2 fois la hauteur hydrostatique et avec une pente des talus latéraux de 1:1; la surface ne doit pas être plus grande que celle de la digue elle-même). ▪ Pour les aménagements avec barrages mobiles: Barrage mobile: rupture totale ou partielle du barrage (sans la partie usine) en fonction du concept de construction (radier continu, piles indépendantes, passes indépendantes) Digues latérales: formation d'une brèche (comme dans le cas des digues)
Conditions initiales	<p>Le niveau normal de retenue est admis comme niveau initial (ouvrage d'accumulation en exploitation normale).</p> <p>Pour certains petits ouvrages, pour lesquels l'obstruction de l'évacuateur de crue par des corps flottants est possible, le niveau du plan d'eau de départ sera admis identique à celui du couronnement.</p>

<p>Documents topographiques nécessaires</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans le cas d'un modèle simple de calcul, les données sont tirées de cartes avec courbes de niveau (1 : 25'000 ou, pour plus de précision, 1 : 10'000). Ces cartes permettent de dresser des profils en travers en vue du calcul. ▪ Modèle numérique topographique (par ex. le modèle de base MNT25 de l'Office fédéral de la topographie) se prête bien aux calculs 2D. Selon les besoins, des indications topographiques supplémentaires doivent être ajoutées au modèle numérique (par ex. remblais routiers et des chemins de fer ou autres obstacles, de même que les limites des accidents de terrain).
<p>Topographie de la zone examinée</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Méthode simple à la main et modèle 1D</i> <p>La forme du bassin doit être telle que la zone d'écoulement soit clairement définie et peut être définie par une série de profils en travers.</p> <p>Normalement, les profils en travers doivent avoir, si possible, une forme régulière et ne pas contenir d'îlots.</p> <p>De larges zones de rétention et des possibilités d'extension latérales de l'onde de submersion (par ex. départ d'une vallée latérale) limitent l'application et la fiabilité des calculs 1D.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Modèle 2D</i> <p>La topographie est définie par un grand nombre de points (coordonnées et altitudes). Ceux-ci sont reliés de façon à former des triangles et représenter la surface du terrain. De cette façon on obtient une très bonne modélisation du terrain.</p> <p>La préparation de bases topographiques peut selon les conditions devenir onéreuse, si l'on doit prendre en compte un secteur topographique superflu ce qui peut entraîner une sensible augmentation du temps de calcul.</p>
<p>Résultats de calcul (Sans tenir compte du fond mobile)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Méthode simple à la main et modèle 1D:</i> <p>Une méthode simple de calcul à la main permet de manière aisée une détermination facile de l'extension de la submersion en des points caractéristiques à l'aval du barrage.</p> <p>Les débits, les vitesses et les profondeurs de l'onde sont les résultats qui doivent être déterminés dans les différents profils en travers. Il est ensuite possible d'établir des cartes d'inondation qui donnent les limites de la zone inondée ainsi que celles de la ligne d'énergie.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Modèle 2D</i> <p>Les débits, les vitesses et les profondeurs de l'onde sont donnés dans 2 directions pour chaque cellule. L'extension spatiale et dans le temps de l'onde peut être suivie pour n'importe quel bassin avec relief.</p> <p>La représentation des résultats est un peu plus compliquée que celle du modèle 1D, car la surface de l'eau n'est pas plane, mais peut fortement varier d'une cellule à l'autre. C'est aussi la raison pour laquelle la ligne d'énergie dans un profil en travers n'est pas plane, mais irrégulière et fortement incurvée (ce qui correspond à la réalité).</p>

Représentation des résultats

Les résultats des calculs de l'onde de submersion permettent d'établir une carte indiquant les limites du champ d'inondation (Figure 11). Les limites d'inondation sont définies par la ligne d'énergie (Hauteur d'eau h_w + hauteur de vitesse $v^2/2g$). Si l'écoulement de l'onde de submersion reste confiné dans le lit du cours d'eau, seule le plan d'eau est considéré.



Calcul unidimensionnel:	Calcul bidimensionnel:
<p>Calcul du débit pour différents profils en travers (A-A, etc.) situés à intervalles définis. Les calculs fourniront la hauteur de la lame d'eau h_w et la vitesse d'écoulement v, ce qui permet de déterminer la ligne d'énergie. Les limites d'inondation sont définies par l'intersection de la ligne d'énergie avec le terrain naturel. Le temps d'arrivée du front de l'onde et l'altitude maximum de la ligne d'énergie sont indiqués dans les cartes d'inondation.</p>	<p>Calcul effectué dans les directions longitudinales et transversales sur la base d'un réseau dense de cellules. Les calculs permettent de connaître au droit de chaque cellule, la vitesse d'écoulement de l'onde dans les 2 directions et la hauteur de la lame d'eau. Le plan de l'eau n'est plus horizontal dans un profil en travers (par exemple B-B) et la ligne d'énergie n'est plus représentée par une droite, mais par une courbe irrégulière. Le temps d'arrivée du front de l'onde, de même que les limites d'inondation et l'altitude maximum de la ligne d'énergie sont indiquées dans les cartes d'inondation.</p>

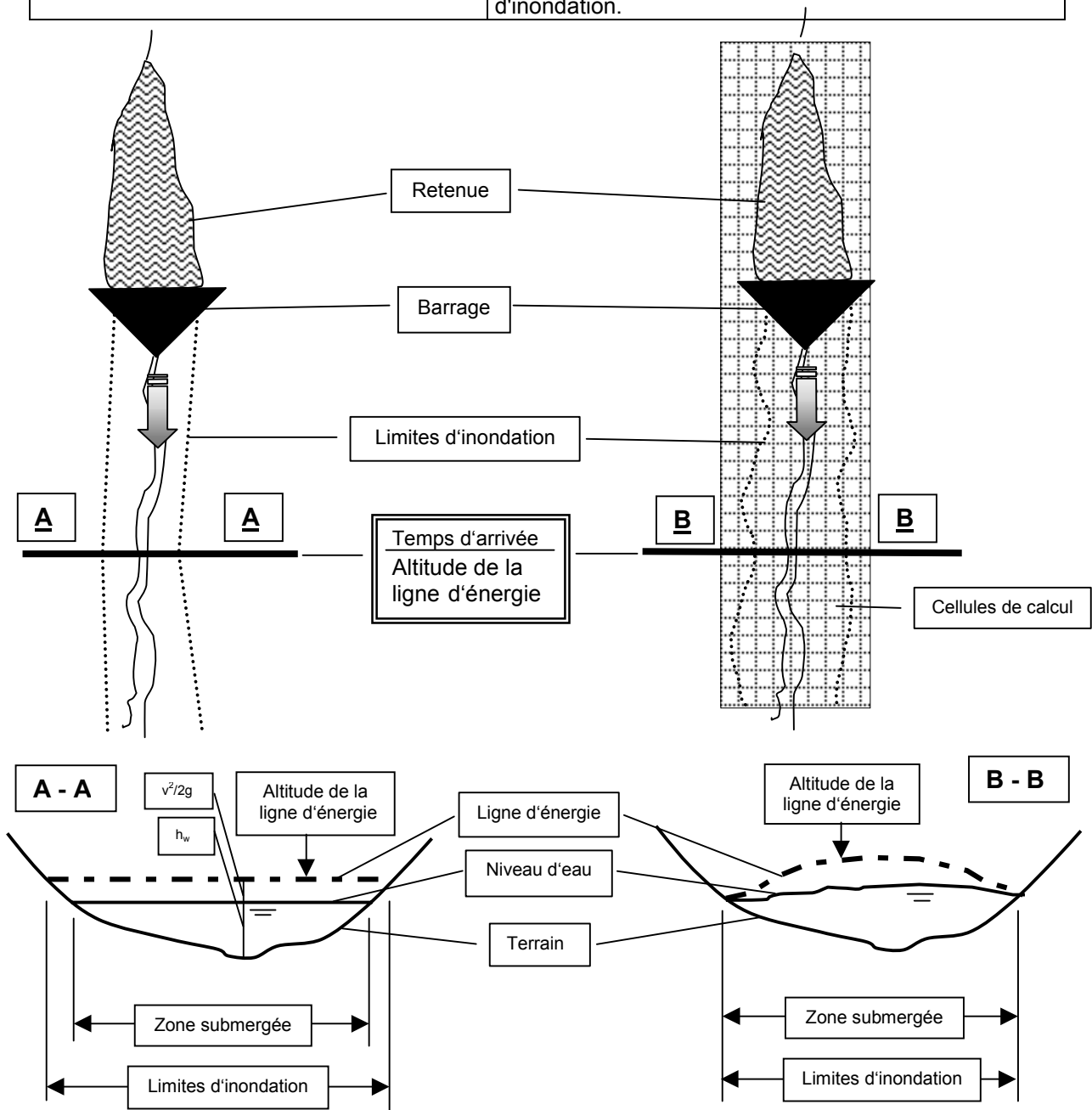


Figure 11: Représentation de la zone de submersion

2.4 Valeurs seuils pour la mesure du danger particulier (voir Tableau 1 et figure 12)

Valeurs seuils	Effets	Règle d'assujettissement
<p>Danger élevé</p> <p>$h > 2 \text{ m}$ ou $v \cdot h > 2 \text{ m}^2/\text{s}$</p>	<p>Les personnes sont en danger même à l'intérieur des bâtiments. En cas d'érosion des berges, il y a aussi menace d'effondrement de constructions situées à proximité. Les laves torrentielles par l'effet de pression peuvent aussi conduire à la destruction de bâtiments.</p>	<p>L'ouvrage d'accumulation est soumis si au moins une habitation, un lieu de travail, un bâtiment public, une place de camping publique, une route très fréquentée ou une ligne de chemin de fer est touchée</p>
<p>Danger moyen</p> <p>$2 \text{ m} \geq h > 1 \text{ m}$ ou $2 \text{ m}^2/\text{s} \geq v \cdot h > 1 \text{ m}^2/\text{s}$</p>	<p>Les personnes à l'extérieur et dans les véhicules sont menacées. La retraite vers les étages supérieurs des bâtiments est la plupart du temps possible. Des bâtiments, selon leur mode de construction, peuvent subir des dégâts</p>	<p>L'ouvrage d'accumulation est soumis si une habitation (de construction légère), un lieu de travail (construction légère), une place de camping publique ou si une route très fréquentée est touchée.</p>
<p>Danger modéré</p> <p>$1 \text{ m} \geq h > 0.5 \text{ m}$ ou $1 \text{ m}^2/\text{s} \geq v \cdot h > 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$</p>	<p>Les personnes sont peu menacées tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments. Des véhicules peuvent être emportés.</p>	<p>L'ouvrage d'accumulation est soumis si une place de camping publique ou une route très fréquentée est touchée</p>
<p>Danger faible</p> <p>$h \leq 0,5 \text{ m}$ ou $v \cdot h \leq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$</p>	<p>Les personnes ne sont pratiquement pas menacées tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.</p>	<p>L'ouvrage d'accumulation n'est pas assujetti.</p>

Tableau 1 : Valeurs seuils pour la mesure du danger particulier basées sur des critères lors d'inondation [2]

v = vitesse d'écoulement [m/s]; h = hauteur d'eau [m]; $v \cdot h$ = intensité de submersion [m^2/s]

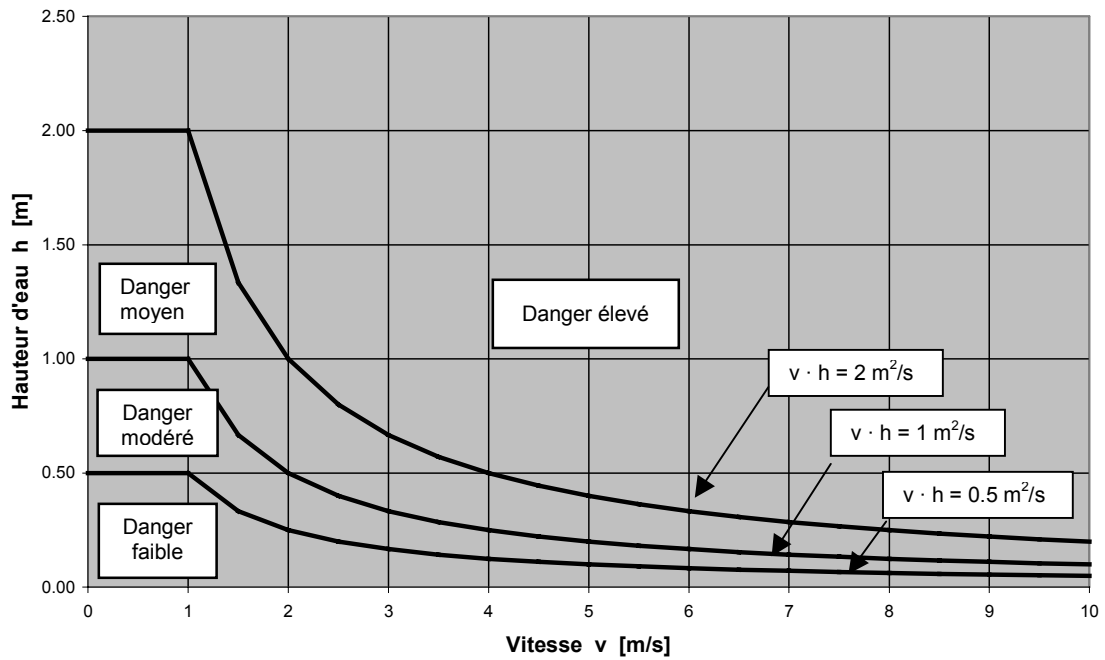


Figure 12 : Répartition des plages de dangers selon l'intensité de submersion

2.5 Cas des aménagements en cascade

Les conséquences de la rupture de chaque ouvrage sont successivement évaluées. Il faut admettre le principe que l'onde de submersion provoquée par la rupture d'un ouvrage d'accumulation peut conduire à celle d'un ou de plusieurs ouvrages d'accumulation situés en aval (effet domino).

2.6 Situations sans danger particulier

Les points suivants correspondent à des situations sans danger particulier, pour lesquelles il est possible de renoncer à un assujettissement des ouvrages d'accumulation concernés. Les situations a) et b) s'appliquent notamment dans le cadre d'une mise hors service ou d'une levée de l'assujettissement.

- a) L'existence d'une brèche rend impossible toute rétention d'eau, de sédiments ou de boue et l'ouvrage d'accumulation peut être laissé sans surveillance et entretien particuliers. On veillera à ce que les dimensions de la brèche soient telles qu'aucune obstruction par un charriage de matériaux et de troncs d'arbres ne soit possible.
- b) Dans le cas des petits ouvrages d'accumulation, des mesures de protection ponctuelles ou particulières sont prises pour éviter, en cas de rupture de l'ouvrage de retenue, que l'onde de submersion ne touche aucune habitation, aucun lieu de travail, aucun bâtiment public, aucun camping public ou aucune voie de communication très fréquentée.
- c) En cas de rupture, la totalité du volume peut être emmagasinée dans une autre zone de retenue ou dans une retenue naturelle, sans entraîner de débordement touchant, entre les 2 ouvrages, une construction et un lieu mentionnés sous point b).
- d) Dans le cas des barrages mobiles ou des petits ouvrages d'accumulation, la capacité hydraulique est suffisante pour que l'onde de submersion s'écoule dans le lit du cours d'eau en tolérant des débordements dans des zones agricoles et dans les zones de divagation prévues dans le cadre de l'aménagement des cours d'eau.

Remarque: En raison du développement possible de la région située à l'aval des ouvrages d'accumulation, il est indiqué d'évaluer régulièrement la situation. Dans le cas de futures constructions dans la zone de submersion d'un ouvrage d'accumulation non assujetti, les conditions relatives au danger particulier doivent être examinées.



3. DÉTERMINATION DES OUVRAGES D'ACCUMULATION A ASSUJETTIR

3.1 Organes de décision pour l'assujettissement

Dans tous les cas, il appartient à l'autorité de surveillance compétente, fédérale ou cantonale, de juger et de décider si un ouvrage d'accumulation doit être ou non soumis à l'OSOA. Selon les règles appliquées sur la procédure administrative, l'autorité de surveillance est en mesure de demander au propriétaire d'ouvrages d'accumulation de lui fournir les données qui lui sont nécessaires (notamment, des plans généraux de l'ouvrage, les calculs de l'onde de submersion, une carte de la zone inondée avec indication des hauteurs et vitesses de l'onde de submersion aux endroits critiques) pour évaluer dans quelle mesure une rupture soudaine de l'ouvrage peut représenter, selon la définition donnée en 2.1, un danger particulier pour au moins une habitation ou un lieu de travail ou un bâtiment public ou une place de camping officielle ou une voie de communication très fréquentée. L'autorité de surveillance compétente établit la décision correspondante, selon le droit administratif fédéral et cantonal.

3.2 Processus d'évaluation et de décision

Le déroulement des différentes étapes qui doivent permettre de motiver l'assujettissement d'un ouvrage d'accumulation à l'OSOA est donné par les schéma des figures 13 et 14.

Dans le cas des retenues répondant aux critères géométriques de l'article 1 alinéa 1 OSOA, il appartient à l'exploitant de l'aménagement de fournir directement à l'autorité de surveillance les indications nécessaires relatives aux conséquences d'une rupture du barrage.

Dans le cas des retenues qui ne répondent pas aux critères géométriques, l'autorité de surveillance procède elle-même à une première évaluation (par exemple sur la base de calculs simplifiés de l'onde de submersion). En cas de besoin, elle demandera des informations supplémentaires à l'exploitant de l'aménagement.

3.3 Levée de l'assujettissement

Pour une demande de levée de l'assujettissement, il appartient à l'exploitant de fournir à l'autorité de surveillance les preuves que l'ouvrage d'accumulation ne représente aucun ou plus de danger particulier pour les personnes et les biens. L'autorité de surveillance a toutefois la possibilité de demander que l'on procède à la surveillance et à l'entretien de l'ouvrage.

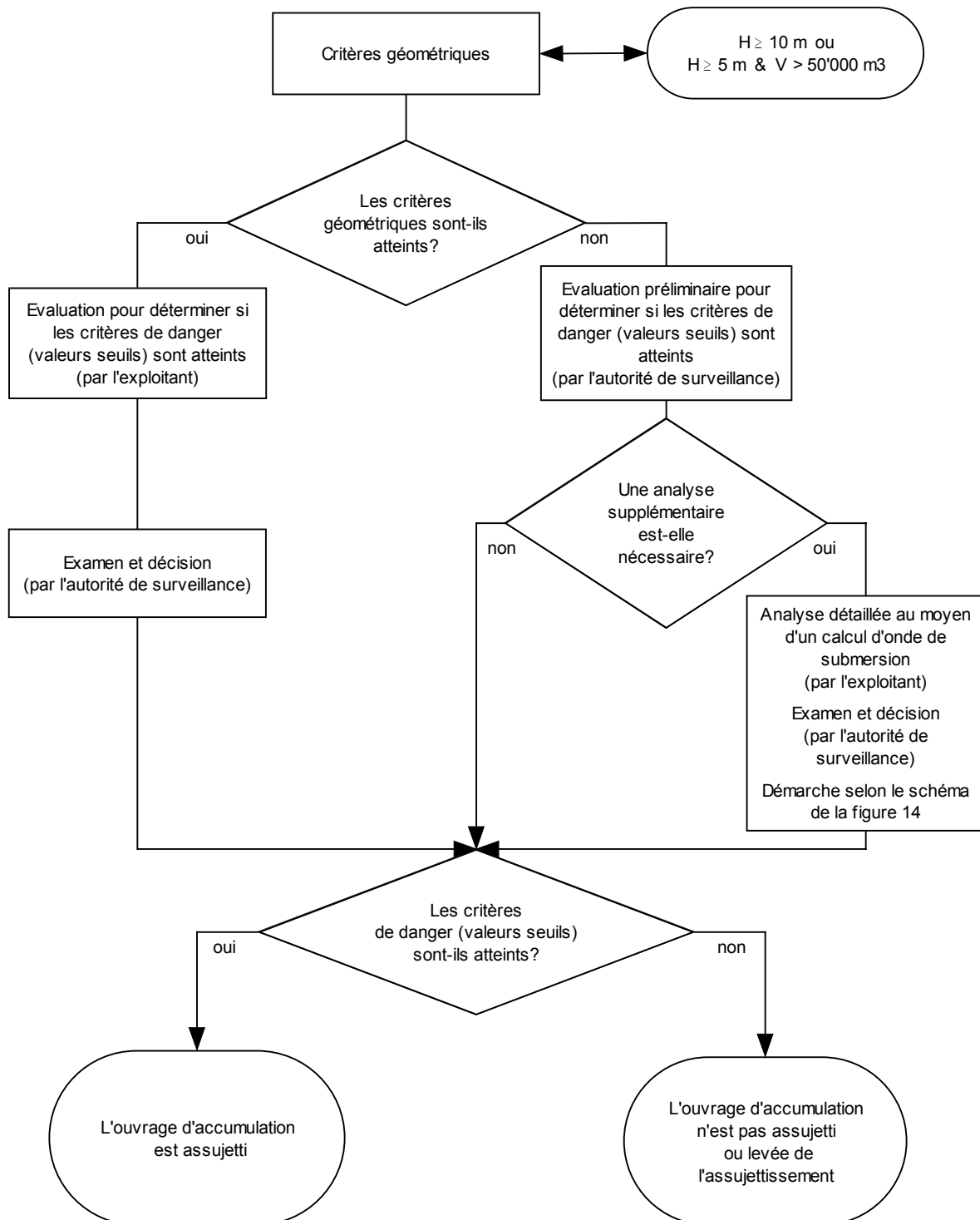


Figure 13 : Processus d'évaluation et de décision en vue d'un assujettissement

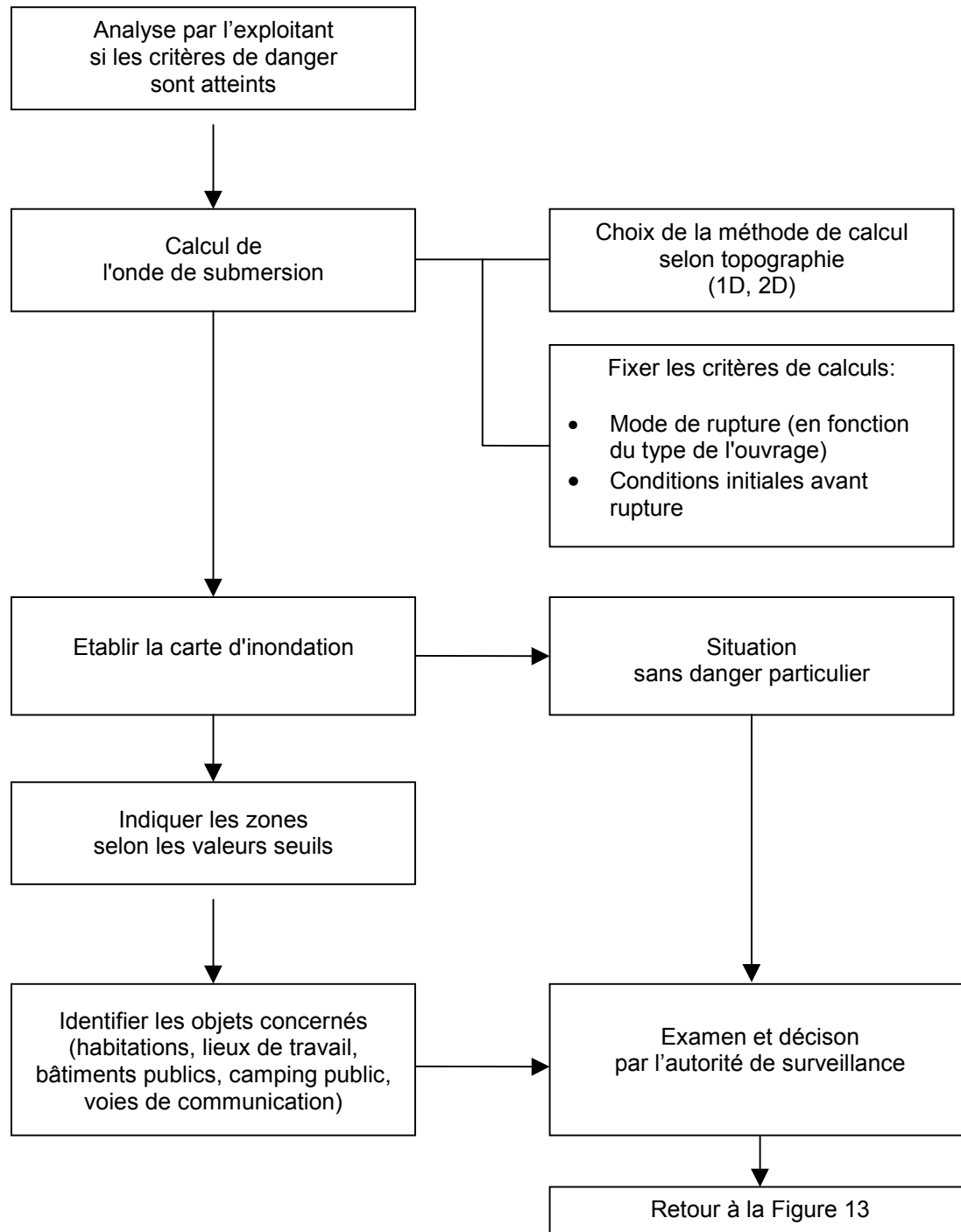


Figure 14 : Résumé de la démarche de l'évaluation des critères de danger (complément à la Figure 13)

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ordonnance du 7 décembre 1998 sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA, RS 721.102)
- [2] Prise en compte des dangers dues aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, OFEE, OFAT, OFEFP, (1997)
- [3] Bulletin ICOLD 111 Etude d'onde de rupture de barrages; *Dam-Break Flood Analysis*, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, (1998)
- [4] Downstream Hazard Classification Guidelines, ACER Technical Memorandum No 11, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado (December 1988)
- [5] Appréciation globale des difficultés et des risques entraînés par la construction des barrages, note technique No 5, CTGREF (juin 1978)
- [6] Paquier, A., Calcul simplifié des ondes de rupture de barrages; informations techniques du CEMAGREF; décembre 1994, note 1
- [7] Beffa, C., Ein Parameterverfahren zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen; Oktober 2000

5. ANNEXES

- I.** Diagrammes pour l'évaluation des ondes de submersion sur surface plane (selon [7]) (Version allemande disponible sous forme électronique)
- II.** Méthode simplifiée pour le calcul de l'onde de submersion suite à une rupture de barrage (selon [5]) (Cette annexe n'est pas disponible sous forme électronique)

DIAGRAMME ZUR BESTIMMUNG DER FLÄCHIGEN AUSBREITUNG VON BRESCHENABFLÜSSEN

1. Problemdefinition

1.1 Ein- und zweidimensionale Flutwellenabflüsse

Nach dem Bruch einer Stauanlage (Staumauer oder Staudamm) fliesst der Speicherinhalt als Flutwelle durch die Bresche ab. Weist das Abflussgebiet eine deutliche Talform auf, so erfolgt die Wellenausbreitung primär eindimensional. Die Abflussmengen, Abflusshöhen und Eintreffzeiten lassen sich mit Abschätzverfahren oder eindimensionaler Modellberechnungen bestimmen.

Bei einer Ausbreitung der Flutwelle auf einer Fläche ist der Abflussvorgang zweidimensional und die Abnahme der Abflussintensität erfolgt schneller als im eindimensionalen Fall. Zur Simulation solcher Flutwellen werden üblicherweise zweidimensionale Abflussmodelle eingesetzt.

Im Falle des Abflusses in eine horizontale Ebene ohne Längs- und Quergefälle breitet sich die Flutwelle näherungsweise radial aus. Massgebende Parameter sind dabei die Stauhöhe, die Breschenbreite, das Speichervolumen und die Rauigkeit der Oberfläche. Ab einem bestimmten Abstand von der Bresche tritt ein Wechsel von schiessendem zu strömendem Abfluss auf (Wassersprung). Für einen Abfluss auf einer geneigten Fläche kommt als weiterer Parameter das Längsgefälle der Sohle hinzu. Für Gefälle grösser als ca. 0.5% bleibt der Abfluss überkritisch (schiessend) und wird von den hydraulischen Randbedingungen der Überflutungsfläche nicht beeinflusst.

1.2 Parameterverfahren

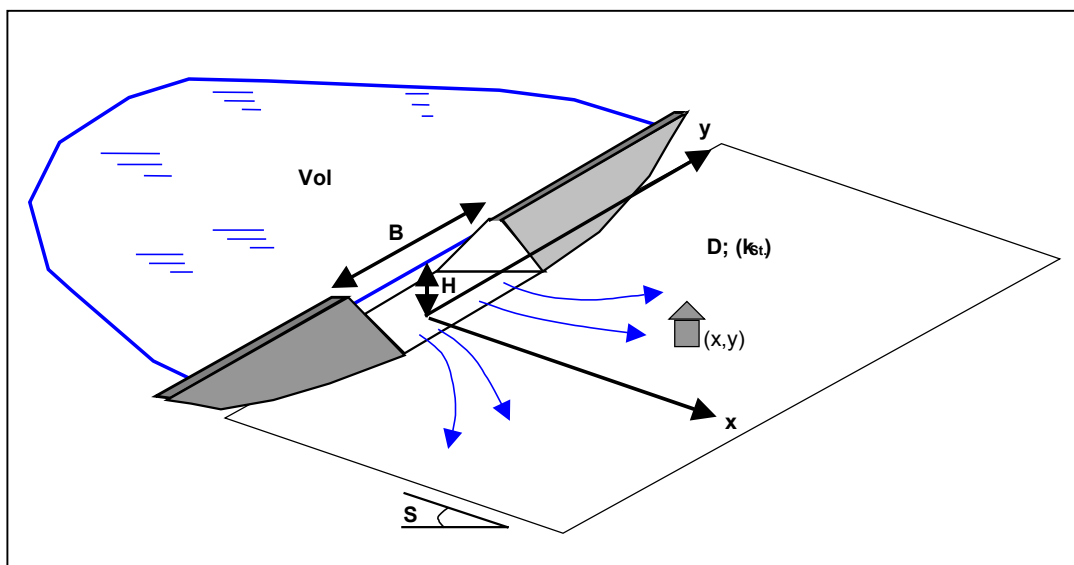


Abbildung 1: Abfluss aus einer Bresche auf einer geneigten Fläche. Lage der Koordinatenachsen x , y und massgebende Parameter: Stauhöhe H , Breschenbreite B , Sohlengefälle S , Rauigkeit als mittlerer Korndurchmesser D , Speichervolumen Vol .



Das hier vorgestellte Parameterverfahren erlaubt auf einfache Weise mit Hilfe von Diagrammen die rasche Abschätzung der Intensität der Überflutung an einem vorgegebenen Standort infolge des Bruchs einer kleineren Stauanlage, wenn die Flutwelle sich zweidimensional auf einer Fläche ausbreitet. Die dabei ermittelten Grössen betreffen die Abnahme von Abflusshöhe und Abflussintensität (Fliessgeschwindigkeit, spezifischer Abfluss, Energiehöhe) in Funktion der Distanz von der Bresche, sowie die flächige Ausbreitung des Abflusstrahls für ebene und geneigte Flächen. Die massgebenden Parameter und die Lage der Koordinatenachsen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Berechnung müssen Annahmen über die Bresche gemacht werden. Das Verfahren rechnet mit einer Rechteckbresche mit frei wählbarer Breite B und Höhe H. Als Bruchszszenarien und Anfangsbedingungen werden im Allgemeinen dabei angenommen:

Typ der Stauanlage	Erddamm	Gewichtsmauer	Bogenmauer
Bruch	Momentanbruch (plötzlicher Bruch in sehr kurzer Zeit)		
Wassertiefe in der Bresche H	Stauhöhe bei voll gefülltem See (Seespiegel auf Stauziel, oder bei hohem Verstopfungsrisiko der Hochwasserentlastung gegebenenfalls auf Kronenhöhe)		
Breschenbreite B	B = 2H Rechteckbresche	gesamte Mauer, gegebenenfalls Mehrfaches der Blockbreite	gesamte Mauer

Abbildung 2: Bruchszszenarien und Anfangsbedingungen für die Bresche

Bei der Durchführung des Verfahrens werden, ausgehend von den in Abbildung 1 dargestellten freien Parametern (Stauhöhe H, Breschenbreite B, Sohlgefälle S, Rauigkeit als mittlerer Korndurchmesser D, Speichervolumen Vol) sowie den Standortkoordinaten (x,y), in einem ersten Schritt einige charakteristische Grössen berechnet. Mit Hilfe der Diagramme werden die für den gesuchten Standort massgebenden dimensionslosen Werte des spezifischen Abflusses (q/Q) und der Fliessgeschwindigkeit (v/V) sowie der lateralen Ausbreitung (Y_{max} , Y_{rel}) ermittelt und die Beträge des effektiven spezifischen Abflusses q, der effektiven Fliessgeschwindigkeit v, der Abflusshöhe h und der Energiehöhe h_e berechnet.

Für die Umrechnung des in der Ingenieurpraxis mehrheitlich gebräuchlichen Strickler-k-Wertes in den im Verfahren verwendeten mittleren Korndurchmesser D dient die in Abbildung 3 dargestellte Tabelle. Die Beziehung erfolgt nach der Formel $D = \{21/k_{St}\}^6$.

$k_{st} [m^{1/3}/s]$	20	25	30	35	40	45
D [m]	1.34	0.35	0.12	0.05	0.02	0.01

Abbildung 3: Umrechnung von Strickler-k-Werten in mittlere Korndurchmesser D

Zur Beschreibung des Einflusses der Speichergrösse werden zwei Hilfsgrössen definiert:

Vol_{max} - dimensionslose Grösse eines Speichers, welcher im Untersuchungsperimeter zu keiner relevanten Reduktion der Abflussintensitäten führt,

X_{min} - dimensionsloser Abstand von der Bresche, wo ein Speichervolumen kleiner als Vol_{max} zu einer Reduktion der Abflussintensitäten führt.



Der Multiplikationsfaktor k zur Ermittlung von X_{\min} hängt vom Sohlengefälle ab und ist in Abbildung 4 aufgeführt. Für Gefälle, welche nicht tabelliert sind, kann linear interpoliert werden.

Gefälle	0.25%	2%	4%	8%	16%
Koeffizient für spezifischen Abfluss	2.5	2.5	3.0	4.0	5.0
Koeffizient für Fliessgeschwindigkeit	3.0	3.0	3.0	4.0	5.0

Abbildung 4: Multiplikationsfaktoren k zur Ermittlung der Distanz X_{\min}

2. Grenzen des Verfahrens

Das Parameterverfahren stellt unter folgenden Bedingungen eine zuverlässige Methode dar:

- Eine sachlich korrekte Schätzung der freien Parameter ist möglich.
- Es herrschen mittlere bis grosse Sohlengefälle (ab ca. 0.5%).
- Quergefälle und Variationen im Längsgefälle sind gering.

Bei kleinem Gefälle ist die Wellenausbreitung in Breschennähe primär radial, was die laterale Verteilung der Intensitäten beeinflusst. Die Anwendung des Verfahrens ist jedoch auch für Gefälle $<0.5\%$ zulässig, sofern:

- die Werte entlang der Strahlachse verwendet werden
- oder die Distanz von der Bresche genügend gross ist ($X > 20$).

Wie weit die verschiedenen Fehlereinflüsse die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen, ist schwierig zu bestimmen und hängt zudem von der Fragestellung ab. Weist die Sensitivitätsanalyse darauf hin, dass die Resultate nicht in der geforderten Genauigkeit bestimmt werden können, so ist der Einsatz eines Simulationsmodelles zu prüfen.

3. Anwendung des Verfahrens

3.1 Einsatzmöglichkeiten

Das Verfahren bietet grundsätzlich zwei Einsatzmöglichkeiten:

- 1.) Intensitätssuche: Bestimmen der Intensitäten für einen vorgegebenen Standort.
- 2.) Standortsuche: Bestimmen des Abstandes von der Bresche, ab welchem die Intensitäten einen vorgegebenen Wert erreicht bzw. unterschreitet.

Liegen die gegebenen oder gesuchten Standorte auf der Strahlachse, so wird für die Suche das Diagramm A verwendet. Für Standorte fern der Strahlachse sind auch die Diagramme B und C einzusetzen. Ein iteratives Vorgehen wird dann nötig, wenn die Standortsuche fern der Strahlachse erfolgt.



3.2 Verwendete Skalierungen (Zusammenstellung)

Bei der Erstellung der Diagramme sind folgende Bezeichnungen und Skalierungen verwendet worden:

Parameter	Bezeichnung
Stauhöhe	H
Breschenbreite	B
Sohlengefälle	S
mittlerer Korndurchmesser	D
Speichervolumen	Vol

Abbildung 5: Freie Parameter und ihre Bezeichnung

Charakteristische Grösse	Ausdruck	Koeffizienten
Horizontale Länge	$L_o = \sqrt{BH}$	
Distanz von der Sperre	$X_o = x / L_o$	
Distanz von der Strahlachse	$Y_o = y / L_o$	
Speichergrösse	$Vol_o = \frac{Vol}{BH^2}$	
Horizontale Distanz für endliche Speichergrösse	$L = L_o \left(\frac{Vol_{max}}{\min(Vol_o, Vol_{max})} \right)^{\frac{X_o - X_{min}}{X_{min}}}$	$Vol_{max} = 4000$ $n = 1/5$ für spez. Abfluss $n = 1/7$ für Fließgeschwindigkeit $X_{min} = k Vol_o^{1/3}$ mit Faktor k aus Abbildung 4
Distanz von der Sperre für endliche Speichergrösse	$X = x / L$	
Distanz von der Strahlachse für endliche Speichergrösse	$Y = y / L$	
Spezifischer Abfluss	$Q = \frac{\sqrt{gB}}{3.13} H \left(\frac{H}{30D} \right)^n$	$n = \begin{cases} 0 & \text{für } X < 6 \\ 1/10 & \text{für } X \geq 6 \end{cases}$
Fließgeschwindigkeit	$V = \sqrt{gH} \left(\frac{H}{30D} \right)^n$	$n = \begin{cases} 1/10 & \text{für } X < 6 \\ 1/4 & \text{für } X \geq 6 \end{cases}$

Abbildung 6: Gewählte Skalen mit Wertebereichen für die Koeffizienten

Zur Wahl der Skalierung des spezifischen Abflusses: Der Ausdruck $\{\sqrt{g} / 3.13\}$ nimmt für SI-Einheiten den Wert 1.0 an. Im Breschenbereich gilt zudem $q/Q \approx 1.0$.

Zur Skalierung der Rauigkeit: Der Ausdruck $\{H / (30 D)\}$ entspricht „mittleren“ Reibungsverhältnissen. Bei einer Stauhöhe von $H = 5$ m würde dies einem Strickler-k-Wert von $k_{st} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ entsprechen.

3.3 Illustration anhand eines Beispiels

Die Anwendung des Parameterverfahrens wird nun anhand eines Beispiels gezeigt. Die frei gewählten Parameter des Testbeispiels sind:

- Stauhöhe $H = 4$ m
- Breschenbreite $B = 8$ m
- Korndurchmesser $D = 0.12$ m
- Sohlgefälle $S = 2\%$
- Speichervolumen $Vol = 10'000$ m³

Gesucht sind die Abflussintensitäten in 100 m Entfernung von der Bresche und 30 m Entfernung von der Strahlachse. Die Anwendung des Parameterverfahrens erfolgt mit Vorteil in folgenden Schritten:

- 1) Bestimmen der Abflussintensitäten in Strahlmitte für den unendlich grossen Speicher
- 2) Berücksichtigung des Speichervolumens, falls $Vol_0 < 4000$
- 3) Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

3.3.1 Abflussintensitäten in Strahlmitte für den unendlich grossen Speicher

- Längenskala: $L_o = \sqrt{8 \times 4} = 5.7$ m
- dimensionsloser Abstand von der Bresche: $X_o = 100 / 5.7 = 17.5$
- Skala des spez. Abflusses: $Q = \sqrt{8} \times 4 \left(\frac{4}{30 \times 0.12} \right)^{1/10} = 11.4$ m²/s
- Skala der Fliessgeschwindigkeit: $V = \sqrt{9.81 \times 4} \left(\frac{4}{30 \times 0.12} \right)^{1/4} = 6.4$ m/s
- dimensionsloser spez. Abfluss: q / Q ($X=17.5$; 2%) = 0.08 *(aus Diagramm A – a)*
- dimensionslose Fliessgeschwindigkeit: v / V ($X=17.5$; 2%) = 0.35 *(aus Diagramm A – b)*
- effektiver spezifischer Abfluss: $q = 0.08 \times 11.4 = \mathbf{0.90}$ m²/s
- effektive Fliessgeschwindigkeit: $v = 0.35 \times 6.4 = \mathbf{2.25}$ m/s
- Abflusshöhe: $h = 0.9 / 2.25 = 0.40$ m
- Energiehöhe: $h_e = 0.40 + 2.25^2 / 19.6 = 0.66$ m

3.3.2 Berücksichtigung der Speichergösse

- dimensionsloses Speichervolumen: $Vol_0 = \left(\frac{10'000}{8 \times 4^2} \right) = 78$
- dimensionsloser Breschenabstand für den spezifischen Abfluss: $X_{min} = 2.5 \times 78^{1/3} = 10.7$
(mit $k = 2.5$ aus Abbildung 4)
- modifizierte Längenskala für den spez. Abfluss: $L = 5.7 \left(\frac{4000}{78} \right)^{1/5} \left(\frac{17.5 - 10.7}{10.7} \right)^{1/5} = 5.7 \times 0.61 = 3.45$ m
- dimensionsloser Abstand von der Bresche: $X = 100 / 3.45 = 29$
- dimensionsloser spez. Abfluss: q / Q ($X=29$; 2%) = 0.062 *(aus Diagramm A – a)*
- dimensionsloser Breschenabstand für die Fliessgeschwindigkeit: $X_{min} = 3.0 \times 78^{1/3} = 12.8$
(mit $k = 3.0$ aus Abbildung 4)



- modifizierte Längenskala für die Fließgeschwindigkeit: $L = 5.7 \left(\frac{4000}{78} \right)^{\left(\frac{17.5 - 12.8}{12.8} \right) \frac{1}{7}} = 5.7 \times 0.81 = 4.65 \text{ m}$
- dimensionsloser Abstand von der Bresche: $X = 100 / 4.65 = 22$
- dimensionslose Fließgeschwindigkeit: $v / V (X=22; 2\%) = 0.33$ (aus Diagramm A – b)
- effektiver spezifischer Abfluss: $q = 0.062 \times 11.4 = 0.70 \text{ m}^2/\text{s}$
- effektive Fließgeschwindigkeit: $v = 0.33 \times 6.4 = 2.1 \text{ m/s}$
- Abflusshöhe: $h = 0.70 / 2.1 = 0.35 \text{ m}$
- Energiehöhe: $h_e = 0.35 + 2.1^2 / 19.6 = 0.60 \text{ m}$

3.3.3 Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

- dimensionslose Distanz von der Strahlachse $Y = 30 / 3.45 = 8.7$
(verwendet wird die dimensionslose Länge für den spez. Abfluss)
- laterale Ausbreitung aus Diagramm B: $Y_{\max} (X=29; 2\%) = 20.5$ (aus Diagramm B)
 $Y_{\text{rel}} = 8.7 / 20.5 = 0.42$
- Querprofilwerte aus Diagramm C: $c_q(Y_{\text{rel}}=0.42) = 0.66$; $c_v(Y_{\text{rel}}=0.42) = 0.84$ (aus Diagramm C)
- effektiver spezifischer Abfluss: $q = 0.70 \times 0.66 = 0.46 \text{ m}^2/\text{s}$
- effektive Fließgeschwindigkeit: $v = 2.1 \times 0.84 = 1.76 \text{ m/s}$
- Abflusshöhe: $h = 0.46 / 1.76 = 0.26 \text{ m}$
- Energiehöhe: $h_e = 0.26 + 1.76^2 / 19.6 = 0.42 \text{ m}$

3.4 Programmierung des Verfahrens

Die obigen Ausführungen zeigen, dass die Anwendung des Verfahrens unter Zuhilfenahme eines Taschenrechners keine besonderen Schwierigkeiten bietet. Die Berücksichtigung des Speichervolumens erfordert allerdings relativ viele Zwischenschritte und es können sich leicht Fehler einschleichen. Aufwändig wird das Verfahren, wenn für die Standortsuche ein iteratives Vorgehen nötig wird.

Um die Anwendung zu erleichtern und Fehler möglichst auszuschliessen, ist das Parameterverfahren deshalb auch als Computerprogramm realisiert worden. Die empfohlene Durchführung von mehreren Berechnungsgängen mit veränderten Eingabeparametern im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird damit ohne grossen Aufwand möglich. Auch die Standortsuche wird durch ein Computerprogramm wesentlich erleichtert.

4. Diagramme und Tabellen

- **Diagramm A:** Längenprofile der maximalen Abflussintensitäten auf der Strahlachse in Funktion des Längsgefälles für den spezifischen Abfluss (a) und die Fließgeschwindigkeit (b)
- **Diagramm B:** Laterale Ausbreitung des Abflusstrahles für verschiedene Sohlengefälle
- **Diagramm C:** Charakteristische Querprofile der Abflussintensitäten
- **Tabelle A1:** Werte für den dimensionslosen maximalen spezifischen Abfluss (a)
- **Tabelle A2:** Werte für die dimensionslose maximale Fließgeschwindigkeit (b)
- **Tabelle B:** Werte der lateralen Ausbreitung
- **Tabelle C:** Werte der charakteristischen Querprofile
- **Tabelle für die Berechnung:** Vorgehen bei der Anwendung des 2D-Verfahrens.



- **Diagramm A:** Längenprofile der maximalen Abflussintensitäten auf der Strahlachse in Funktion des Längsgefälles für den spezifischen Abfluss und die Fließgeschwindigkeit

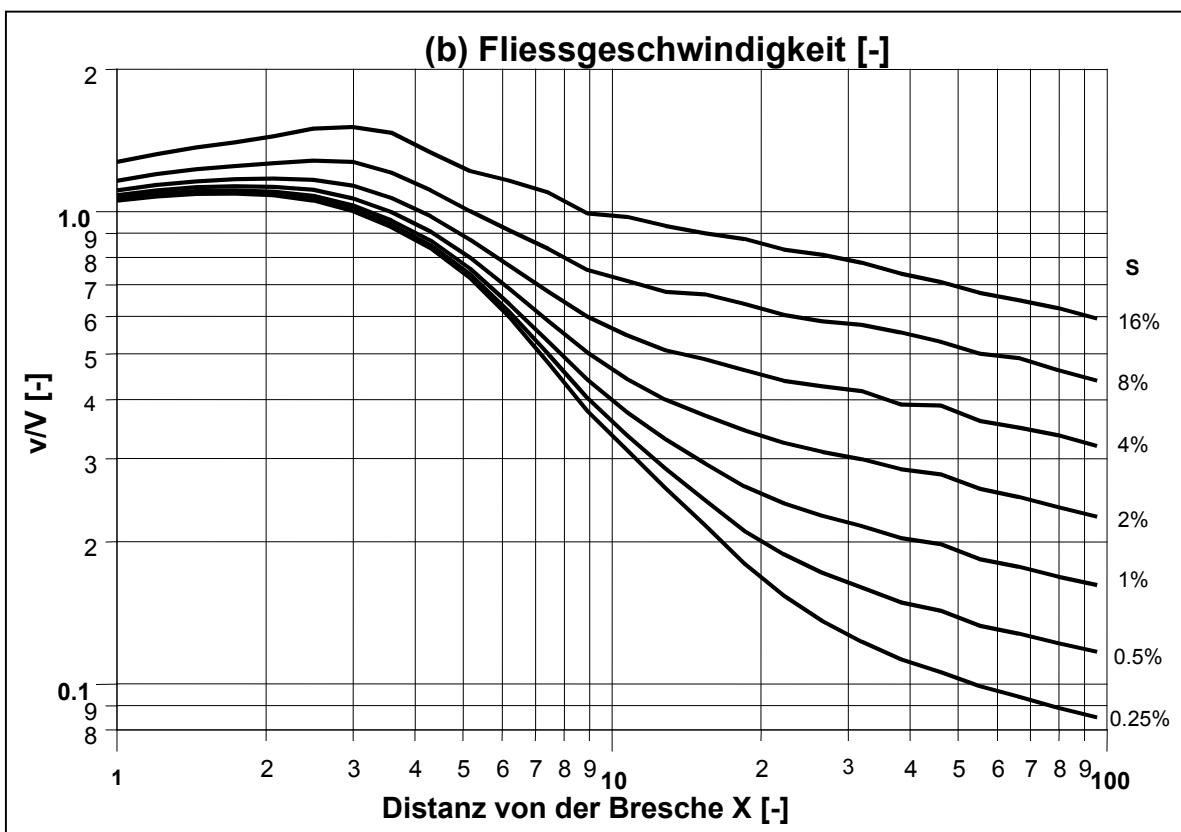
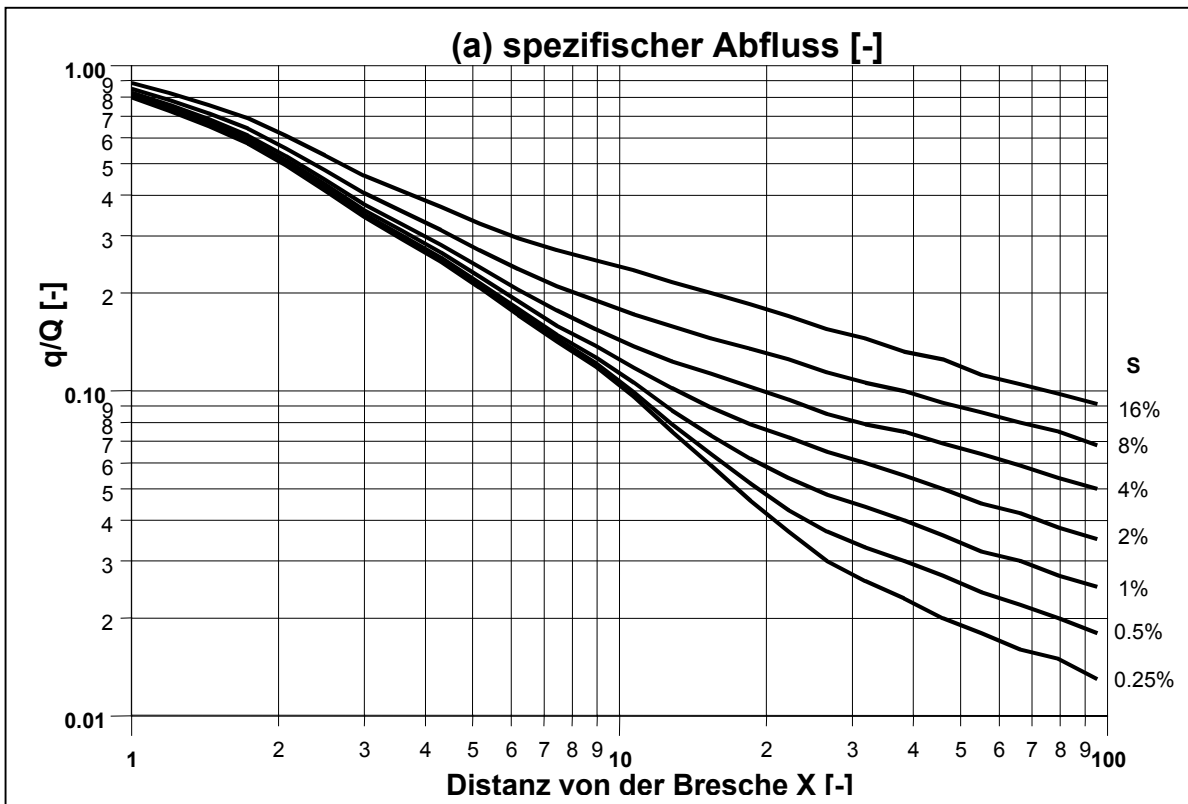




Diagramm B: Laterale Ausbreitung des Abflussstrahles für verschiedene Sohlengefälle

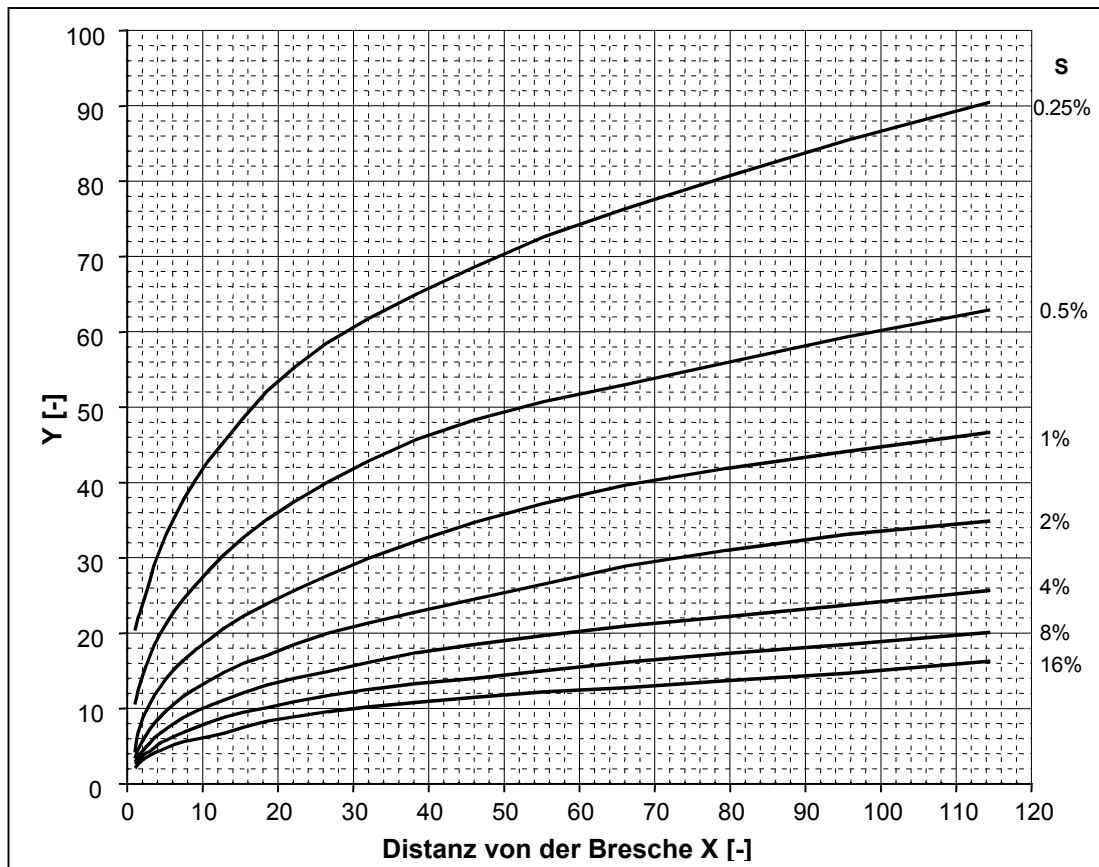


Diagramm C: Charakteristische Querprofile der Abflussintensitäten

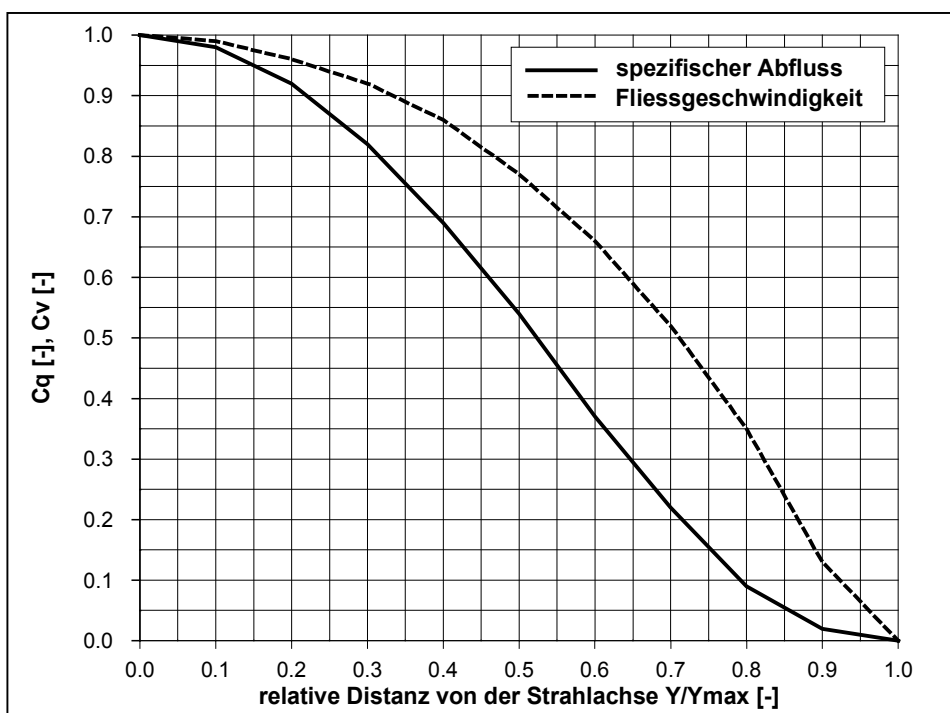




Tabelle A1: Werte für den dimensionslosen maximalen spezifischen Abfluss q/Q [-]

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	0.798	0.804	0.806	0.817	0.827	0.850	0.884
1.20	0.725	0.730	0.733	0.744	0.756	0.782	0.822
1.44	0.652	0.657	0.660	0.672	0.685	0.713	0.758
1.73	0.577	0.582	0.586	0.597	0.611	0.641	0.690
2.07	0.494	0.499	0.502	0.513	0.528	0.558	0.609
2.49	0.413	0.417	0.421	0.432	0.446	0.477	0.530
2.99	0.344	0.347	0.351	0.361	0.376	0.407	0.460
3.58	0.293	0.297	0.301	0.311	0.326	0.357	0.411
4.30	0.250	0.253	0.257	0.267	0.282	0.313	0.368
5.16	0.208	0.211	0.215	0.225	0.241	0.271	0.327
6.19	0.171	0.174	0.179	0.189	0.205	0.237	0.295
7.43	0.142	0.145	0.149	0.159	0.177	0.210	0.271
8.92	0.119	0.122	0.127	0.138	0.155	0.190	0.252
10.7	0.096	0.099	0.106	0.118	0.137	0.172	0.235
12.8	0.075	0.079	0.087	0.102	0.123	0.158	0.216
15.4	0.059	0.064	0.073	0.089	0.113	0.145	0.200
18.5	0.046	0.052	0.062	0.079	0.103	0.135	0.185
22.2	0.037	0.043	0.054	0.072	0.094	0.125	0.170
26.6	0.030	0.037	0.048	0.065	0.085	0.114	0.155
31.9	0.026	0.033	0.044	0.060	0.079	0.106	0.145
38.3	0.023	0.030	0.040	0.055	0.075	0.100	0.132
46.0	0.020	0.027	0.036	0.050	0.069	0.092	0.125
55.2	0.018	0.024	0.032	0.045	0.064	0.086	0.112
66.2	0.016	0.022	0.030	0.042	0.059	0.080	0.105
79.5	0.015	0.020	0.027	0.038	0.054	0.075	0.098
95.4	0.013	0.018	0.025	0.035	0.050	0.068	0.091
114.5	0.012	0.017	0.023	0.032	0.048	0.065	0.083

Tabelle A2: Werte für die dimensionslose maximale Fließgeschwindigkeit v/V [-]

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	1.055	1.060	1.067	1.083	1.109	1.164	1.274
1.20	1.078	1.084	1.091	1.109	1.139	1.201	1.324
1.44	1.091	1.098	1.106	1.126	1.160	1.230	1.367
1.73	1.093	1.100	1.110	1.133	1.172	1.250	1.401
2.07	1.083	1.091	1.103	1.129	1.175	1.267	1.445
2.49	1.056	1.066	1.080	1.112	1.168	1.283	1.500
2.99	1.002	1.013	1.030	1.068	1.135	1.274	1.510
3.58	0.928	0.940	0.958	0.998	1.069	1.208	1.470
4.30	0.836	0.849	0.868	0.908	0.978	1.110	1.333
5.16	0.724	0.737	0.757	0.800	0.872	1.003	1.219
6.19	0.599	0.614	0.638	0.687	0.768	0.913	1.163
7.43	0.478	0.499	0.530	0.586	0.677	0.834	1.096
8.92	0.378	0.403	0.440	0.503	0.599	0.753	0.991
10.7	0.313	0.336	0.376	0.443	0.547	0.713	0.975
12.8	0.260	0.286	0.330	0.400	0.509	0.677	0.933
15.4	0.217	0.245	0.293	0.370	0.487	0.668	0.900
18.5	0.180	0.211	0.262	0.344	0.462	0.637	0.876
22.2	0.154	0.188	0.241	0.324	0.439	0.605	0.831
26.6	0.136	0.172	0.227	0.310	0.427	0.586	0.811
31.9	0.123	0.160	0.216	0.299	0.417	0.576	0.780
38.3	0.113	0.149	0.204	0.285	0.391	0.555	0.740
46.0	0.106	0.143	0.198	0.278	0.389	0.530	0.710
55.2	0.099	0.133	0.184	0.259	0.361	0.501	0.674
66.2	0.094	0.128	0.177	0.249	0.349	0.490	0.650
79.5	0.089	0.122	0.169	0.237	0.336	0.462	0.625
95.4	0.085	0.117	0.162	0.226	0.319	0.439	0.594
114.5	0.082	0.113	0.156	0.218	0.319	0.420	0.580

Das hier vorgestellte Parameterverfahren zur raschen Abschätzung der Überflutung an vorgegebenem Standort infolge zweidimensionaler Ausbreitung einer Flutwelle wurde im Oktober 2002 von Dr. C. Beffa, Schwyz, im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie entwickelt.



Tabelle B: Werte für die laterale Ausbreitung
 Y_{max} [-]

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	20.3	10.5	4.2	3.4	2.9	2.6	2.1
1.20	21.2	11.4	5.8	4.0	3.2	2.8	2.3
1.44	22.1	12.4	6.8	4.6	3.5	3.1	2.6
1.73	22.9	13.4	7.7	5.2	4.0	3.4	2.9
2.07	24.0	14.5	8.8	5.8	4.4	3.8	3.2
2.49	25.3	15.7	9.7	6.5	4.9	4.1	3.5
2.99	27.0	17.0	10.7	7.3	5.4	4.3	3.8
3.58	29.1	18.4	11.7	8.0	6.1	4.8	4.1
4.30	31.1	19.9	12.8	8.8	6.7	5.4	4.4
5.16	33.2	21.3	14.0	9.7	7.3	5.8	4.8
6.19	35.3	22.9	15.2	10.6	8.0	6.3	5.2
7.43	37.7	24.5	16.4	11.6	8.8	6.8	5.6
8.92	40.2	26.3	17.7	12.6	9.6	7.4	5.9
10.7	42.8	28.2	19.0	13.6	10.3	8.1	6.2
12.8	45.4	30.4	20.7	14.8	11.1	8.8	6.7
15.4	48.6	32.7	22.3	16.0	12.1	9.5	7.5
18.5	52.1	35.1	23.9	17.0	13.1	10.1	8.3
22.2	55.3	37.5	25.7	18.5	14.0	10.9	8.9
26.6	58.6	40.1	27.7	20.0	14.9	11.7	9.6
31.9	61.7	42.8	29.9	21.3	16.1	12.5	10.2
38.3	65.0	45.7	32.2	22.8	17.4	13.3	10.8
46.0	68.6	48.3	34.7	24.5	18.5	14.0	11.5
55.2	72.6	50.7	37.2	26.5	19.7	15.0	12.2
66.2	76.4	53.0	39.7	28.9	21.0	16.2	12.8
79.5	80.6	55.9	41.9	31.0	22.2	17.3	13.7
95.4	85.4	59.3	44.1	33.1	23.7	18.5	14.7
114.5	90.5	62.9	46.7	34.9	25.7	20.1	16.3

Liste der verwendeten Bezeichnungen

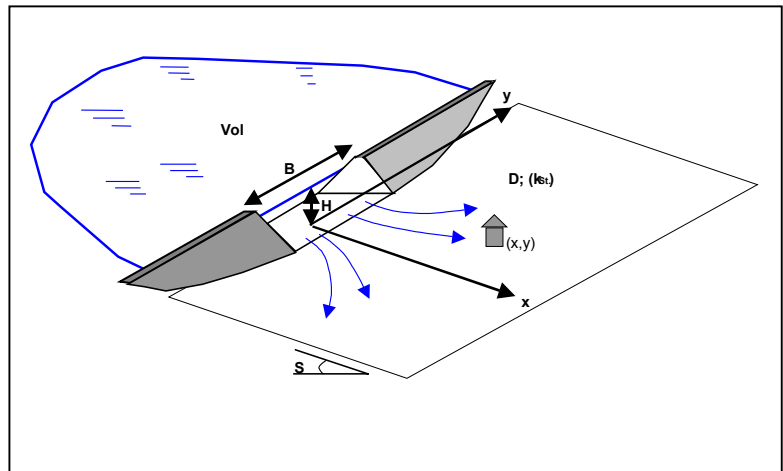
- B - Breschenbreite
- C_q - skaliertes spezifisches Abfluss
- C_v - skalierte Fließgeschwindigkeit
- D - mittlerer Korndurchmesser des Sohlenmaterials
- g - Erdbeschleunigung
- h - Abflusshöhe
- H - Stauhöhe am Fuss der Sperre
- h_e - Energiehöhe $=h+v^2/(2g)$
- k_{st} - Strickler-k-Wert
- L - horizontale Längenskala für endliche Speichergrösse
- L_o - horizontale Längenskala für unendliche Speichergrösse
- q - spezifischer Abfluss (= Abflusshöhe x Fließgeschwindigkeit)
- Q - Skala des spezifischen Abflusses
- S - Längsgefälle der Sohle
- v - Fließgeschwindigkeit
- V - Skala der Fließgeschwindigkeit
- Vol - Speichervolumen
- Vol_o - dimensionsloses Speichervolumen
- Vol_{max} - dimensionsloses Speichervolumen, das im Untersuchungsperimeter zu keiner relevanten Reduktion der Abflussintensitäten führt
- x - Entfernung von der Sperre
- X - skalierte Entfernung von der Bresche für endliche Speichergrösse
- X_o - skalierte Entfernung von der Bresche für unendliche Speichergrösse
- X_{min} - skalierte Entfernung von der Bresche, wo der Einfluss der Speichergrösse wirksam wird
- y - Entfernung von der Strahlachse
- Y - skalierte Entfernung von der Strahlachse für endliche Speichergrösse
- Y_o - skalierte Entfernung von der Strahlachse für unendliche Speichergrösse
- Y_{max} - skalierte maximale Entfernung von der Strahlachse (=Überflutungsgrenze)
- Y_{rel} - relative Entfernung von der Strahlachse bezogen auf die Überflutungsgrenze

Tabelle C: Werte der charakteristischen Querprofile

Distanz	spezifischer Abfluss	Fließgeschwindigkeit
0.00	1.00	1.00
0.10	0.98	0.99
0.20	0.92	0.96
0.30	0.82	0.92
0.40	0.69	0.86
0.50	0.54	0.77
0.60	0.37	0.66
0.70	0.22	0.52
0.80	0.09	0.35
0.90	0.02	0.13
1.00	0.00	0.00

Tabelle für die Berechnung: Vorgehen bei der Anwendung des 2D-Verfahrens

Für die nach dem Berechnung der Überflutungsintensität im 2D-Fall (Beffa-Verfahren) kann nach dem untenstehenden Schema vorgegangen werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass das Verfahren nur gültig ist, wenn das Gelände, auf dem die Flutwelle sich ausbreitet, eine schiefe Ebene bildet.



Berechnungstabelle für 2D-Breschenabfluss

Parameter und Berechnungsgrößen:	<i>Input, Berechnungsformeln</i>	<i>Dimen sionen</i>	<i>Bemerkungen</i>
Parameter:			
Stauhöhe	H	m	
Breschenbreite	B	m	
Sohlengefälle	S	%	
mittlerer Korndurchmesser	D	m	(s. Abbildung 3)
Speichervolumen	Vol	m ³	
Abflussverhältnisse in Punkt (x,y), Distanz von der Sperre:	x	m	
laterale Distanz von der Strahlachse:	y	m	

Berechnungen:

Dimensionsloses Speichervolumen	$Vol_0 = Vol/(BH^2)$		
A) Abfluss für endliche Speichergrosse	$Vol_0 < 4000$		
Skalierte Grössen:			
Länge	$L_0 = (BH)^{0.5}$	m	
Dimensionloser Breschenabstand	$X_0 = x/L_0$		



Koeffizient für spezifischen Abfluss:	für ($X_o < 6$): für ($X_o / 6$):	$n = 0$ $n = 0.1$		
Spezifischer Abfluss		$Q_o = (B)^{0.5} \cdot H(H/30D)^n$	m^2/s	
Koeffizient für spezifische Geschwindigkeit:	für ($X_o < 6$): für ($X_o / 6$):	$n = 0.1$ $n = 0.25$		
Spezifische Geschwindigkeit		$V_o = (gH)^{0.5} (H/30D)^n$	m/s	
Faktor k_q für die Ermittlung von X_{min}	für $S \leq 2\%$: für $S > 2\%$:	$k_q = 2.5$ $k_q = 2 \cdot S^{1/3}$		(entspricht Tabelle in Abbildung 4)
Breschenabstand für spezifischen Abfluss		$X_{min} = k_q \cdot Vol_o^{(1/3)}$		
Modifizierte Länge für Abfluss		$L = L_o(4000/Vol_o)^{-(X_o - X_{min})/5/X_{min}}$		
Dimensionsloser Breschenabstand		$X = x / L$		\Rightarrow Diagramm A-a und B
Dimensionsloser spez. Abfluss		$q / Q [X, S]$		\Leftarrow Diagramm A-a: q/Q
Faktor k_v für die Ermittlung von X_{min}	für $S \leq 4\%$: für $S > 4\%$:	$k_v = 3.0$ $k_v = 2 \cdot S^{1/3}$		
Dimensionsloser Breschenabst. für Fließgeschwindigkeit		$X_{min} = k_v \cdot Vol_o^{1/3}$		
Modifizierte Länge für Fließgeschwindigkeit		$\underline{L} = L_o(4000/Vol_o)^{-(X_o - X_{min})/7/X_{min}}$		
Dimensionsloser Breschenabstand		$\underline{X} = x / \underline{L}$		\Rightarrow Diagramm A-b: v/V
Dimensionlose Fließgeschwindigkeit		$v/V [X; S]$		\Leftarrow Diagramm A-b: v/V
Effektive Größen in Strahlachse für		x	m	
Spezifischer Abfluss		$\underline{q} = (q/Q) \cdot Q_o$	m^2/s	
Fließgeschwindigkeit		$\underline{v} = (v/V) \cdot V_o$	m/s	
Abflusshöhe		$\underline{h} = \underline{q} / \underline{v}$	m	
Energiehöhe		$\underline{h}_e = \underline{h} + \underline{v}^2/2g$	m	
Laterale Ausbreitung:				
Relative Distanz von Strahlachse bezüglich modifiz. Länge		$Y = y / L$	m	L aus modifizierter Länge für Abfluss
Laterale Ausbreitung		$Y_{max}[X, S]$		\Leftarrow Diagr. B: lat. Ausbreitung
Relative laterale Ausbreitung		$\hat{Y} = Y / Y_{max}$		\Rightarrow Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Abfluss		$c_q(\hat{Y})$		\Leftarrow Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Fließgeschwindigkeit		$c_v(\hat{Y})$		\Leftarrow Diagramm C: Querprofil
Effektive Größen im Punkt x und		y	m	
Spezifischer Abfluss		$q' = \underline{q} \cdot c_q$	m^2/s	
Fließgeschwindigkeit		$v' = \underline{v} \cdot c_v$	m/s	
Abflusshöhe		$h' = \underline{q} / \underline{v}$	m	
Energiehöhe		$h_e' = \underline{h} + \underline{v}^2/2g$	m	



B) Abfluss für sehr grossen Speicher	Vol₀ / 4000		"unendliche" Speichergrösse
<i>Skalierte Grössen:</i>			
Länge	$L_o = (BH)^{0.5}$	m	
Dimensionsloser Breschenabstand	$X_o = x/L_o$		⇒ Diagramm A: q/Q und v/V
Koeffizient für spezifischen Abfluss:	für ($X_o < 6$): für ($X_o / 6$):	n = 0 n = 0.1	
Spezifischer Abfluss	$Q_o = (B)^{0.5} \cdot H(H/30D)^n$	m ² /s	
Koeffizient für spezifische Geschwindigkeit:	für ($X_o < 6$): für ($X_o / 6$):	n = 0.1 n = 0.25	
Spezifische Geschwindigkeit	$V_o = (gH)^{0.5} (H/30D)^n$	m/s	
Dimensionsloser spezifischer Abfluss	$q/Q[X_o;S]$		⇐ Diagramm A-a: q/Q
Dimensionslose Fließgeschwindigkeit	$v/V[X_o;S]$		⇐ Diagramm A-b: v/V
<i>Effektive Grössen:</i>			
Spezifischer Abfluss	$q = (q/Q) \cdot Q_o$	m ² /s	
Fließgeschwindigkeit	$v = (v/V) \cdot V_o$	m/s	
Abflusshöhe	$h = q / v$	m	
Energiehöhe	$h_e = h + v^2/2g$	m	
<i>Laterale Ausbreitung:</i>			
Relative Distanz von Strahlachse bezüglich modifiz. Länge	$Y = y / L_o$	m	
Laterale Ausbreitung	$Y_{max}[X_o;S]$		⇐ Diagr. B: lat. Ausbreitung
Relative laterale Ausbreitung	$\hat{Y} = Y / Y_{max}$		⇒ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Abfluss	$c_q(\hat{Y})$		⇐ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Fließgeschwindigkeit	$c_v(\hat{Y})$		⇐ Diagramm C: Querprofil
<i>Effektive Grössen im Punkt x und</i>			
Spezifischer Abfluss	$q'' = q \cdot c_q$	m ² /s	
Fließgeschwindigkeit	$v'' = v \cdot c_v$	m/s	
Abflusshöhe	$h'' = q / v$	m	
Energiehöhe	$h_e'' = h + v^2/2g$	m	