

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Calcul de stabilité

⇒ Principe

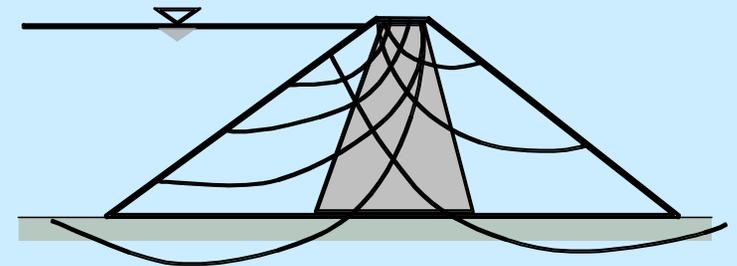
- ◆ contrôle de la sécurité au glissement pour diverses surfaces de rupture possibles

⇒ Méthodes d'analyse

- ◆ la masse hétérogène et instable est découpée verticalement en tranches (méthode des tranches)
 - ✓ surface de glissement circulaire Fellinius (1948), Bishop (1955)
 - ✓ surface de glissement quelconque Janbu (1954), Morgenstern - Price (1956), Krey

⇒ Facteurs de sécurité (selon DIN 4084)

- ◆ normaux (CN) $FS \geq 1.40$
- ◆ spéciaux (CS) $FS \geq 1.30$
- ◆ exceptionnels (CE) $FS \geq 1.20$

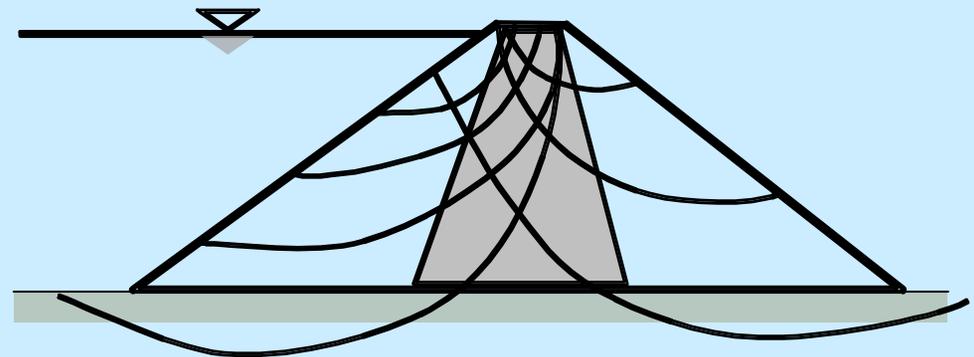


Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Calcul de stabilité - Cas de charges

- ⇒ Pendant la construction
 - ◆ mise en charge de la digue pendant les crues (CS)
- ⇒ Fin de construction
 - ◆ tremblement de terre à lac vide (CE)
- ⇒ Exploitation (sans tremblement de terre)
 - ◆ lac plein à niveau normal (CN)
 - ◆ lac plein à niveau exceptionnel (CS)
 - ◆ abaissement normal (CN)
 - ◆ abaissement rapide (CS)
- ⇒ Exploitation avec tremblement de terre
 - ◆ lac plein avec niveau normal (CE)
 - ◆ abaissement normal (CE)



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Calcul de stabilité - pentes de talus approximatifs

Matériaux de remblai (corps d'appui)	Elément étanche	Pente amont	Pente aval
Enrochements	Noyau central	1 : 1.80	1 : 1.80
	Noyau incliné	1 : 2.10	1 : 1.80
	Masque amont	1 : 1.50	1 : 1.40
Alluvions perméables	Noyau central	1 : 2.00	1 : 2.00
	Noyau incliné	1 : 2.30	1 : 2.00
Alluvions fins (moins perméable)	Noyau central	1 : 3.00	1 : 2.50
	Noyau incliné	1 : 3.30	1 : 2.50
Digue homogène		1 : 3.00	1 : 3.00

Sécurité en cas de séisme

⇒ Analyse pseudo-statique

- ◆ force horizontale agissant sur les tranches en fonction de l'accélération de la masse considérée

⇒ Démarche selon Makdisi / Seed (basée sur les travaux de Newmark)

- ◆ définition de l'accélérogramme pour le site de la digue
- ◆ calcul de l'accélération critique pour laquelle la surface (masse) de rupture critique est encore stable ($FS = 1.00$)
- ◆ pour toutes les accélérations supérieures à l'accélération critique, il se produira un glissement pendant une durée limitée
- ◆ des glissements partiels sont additionnés
à la fin du tremblement de terre on accepte les déformations plastiques totales suivantes:
 - ✓ 1 m: tremblement de terre de projet, période de retour de 100 à 200 ans
 - ✓ 3 m: tremblement de terre le plus violent possible

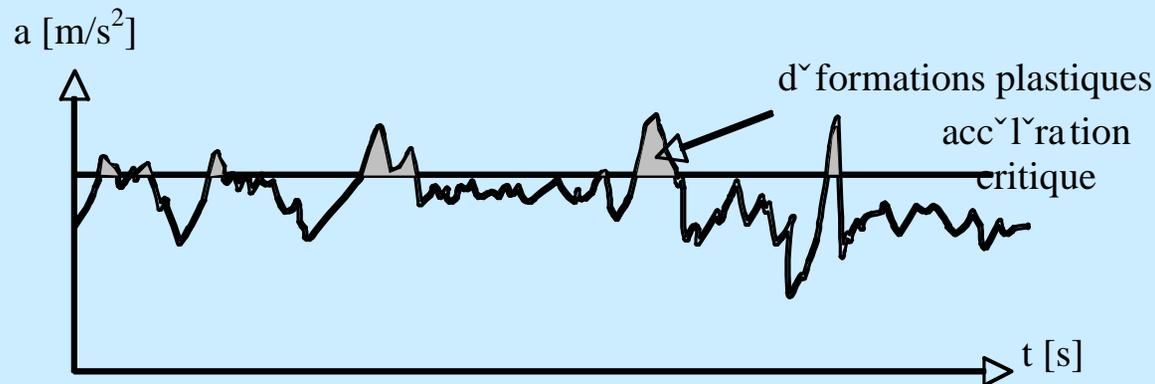
Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Sécurité en cas de séisme

⇒ Démarche selon Makdisi / Seed (basée sur les travaux de Newmark)

- ◆ définition de l'accélérogramme pour le site de la digue
- ◆ calcul de l'accélération critique pour laquelle la surface (masse) de rupture critique est encore stable (FS = 1.00)



- ◆ pour toutes les accélérations supérieures à l'accélération critique, il se produira un glissement pendant une durée limitée
- ◆ des glissements partiels sont additionnés
à la fin du tremblement de terre on accepte les déformations plastiques totales suivantes:
 - ✓ 1 m: tremblement de terre de projet, période de retour de 100 à 200 ans
 - ✓ 3 m: tremblement de terre le plus violent possible

Directives Suisses: Bases de vérifications

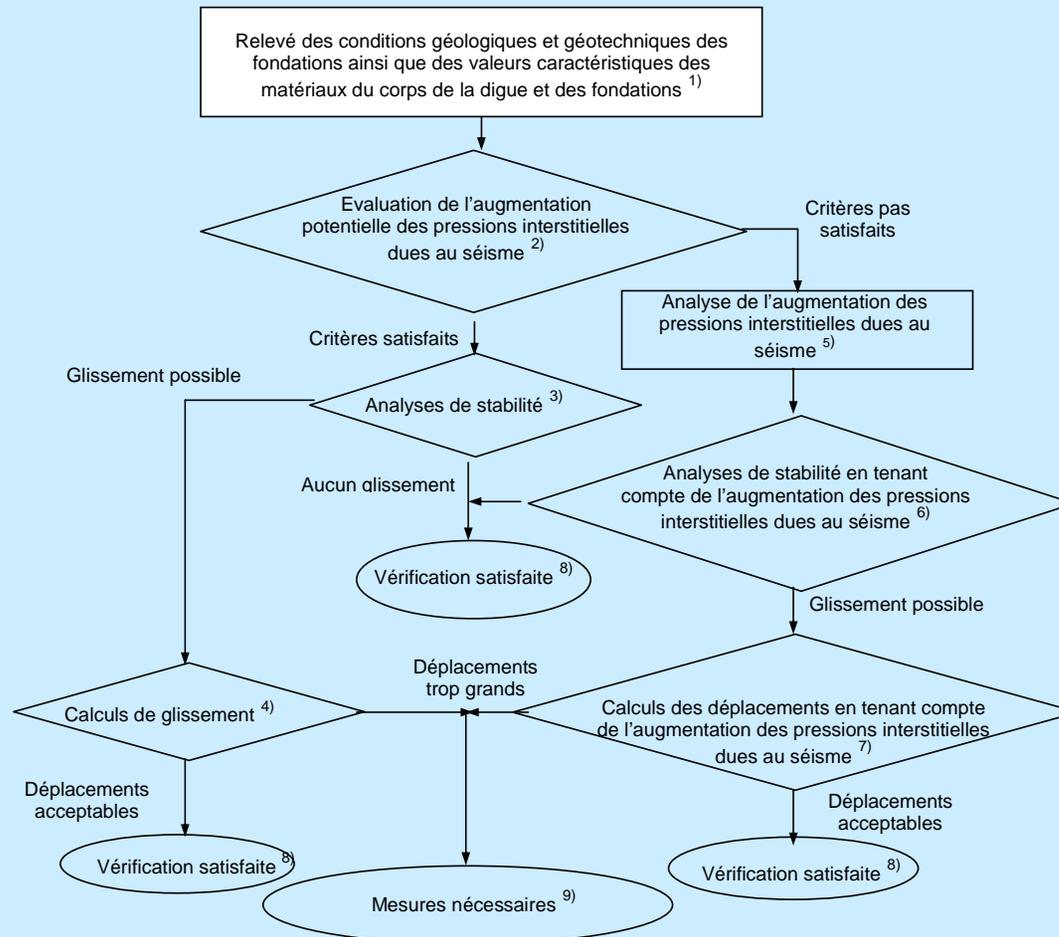
Les bases de vérification sont les suivantes :

- Les valeurs caractéristiques statiques des matériaux obtenues à l'aide d'investigations (nouvelles constructions et ouvrages existants).
- Détermination empirique de la sensibilité des matériaux de la digue à une augmentation de la pression interstitielle suite à une sollicitation cyclique.
- Analyse de stabilité de blocs de glissement potentiels due à une accélération dynamique horizontale déterminée empiriquement (1 mode) et sous une sollicitation sismique verticale pseudo-statique.
- Le cas échéant, détermination du déplacement de glissement irréversible (en tenant compte de manière empirique du comportement dynamique de la digue)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Schéma de calcul pour les digues de classe II



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Evaluation de l'augmentation potentielle des pressions interstitielles due au séisme

L'analyse est nécessaire si :

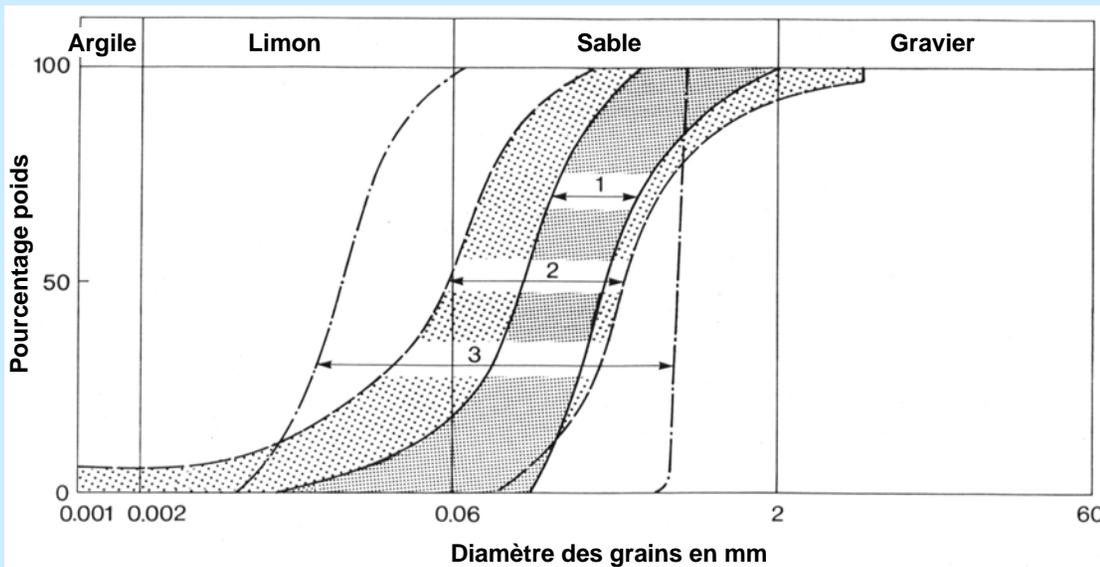
- La courbe granulométrique se situe dans la zone critique
-
- Mise en place peu dense (densité relative < 0.5)
-
- Matériaux saturés

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Evaluation de l'augmentation potentielle des pressions interstitielles due au séisme

Analyse de la courbe granulométrique:



Danger important de liquéfaction si la courbe granulométrique se situe à l'intérieur du domaine 2 et si $C_u = d_{60}/d_{10} < 2$ (coefficient d'uniformité)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Evaluation de l'augmentation potentielle des pressions interstitielles due au séisme

Analyse de compacité:

La compacité du sol est représentée par la densité relative D_r et vaut :

$$D_r = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\ min}}{\gamma_{d\ max} - \gamma_{d\ min}} \cdot \frac{\gamma_{d\ max}}{\gamma_d}$$

avec : n : porosité du sol in situ

n_{max} : Porosité à compacité maximale

n_{min} : Porosité à compacité minimale

γ_d : Poids volumique du sol sec

$\gamma_{d\ max}$: Poids volumique du sol sec à compacité maximal

$\gamma_{d\ min}$: Poids volumique du sol sec à compacité minimale

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Evaluation de l'augmentation potentielle des pressions interstitielles due au séisme

Alternative: Evaluation du potentiel de liquéfaction à l'aide d'essais SPT

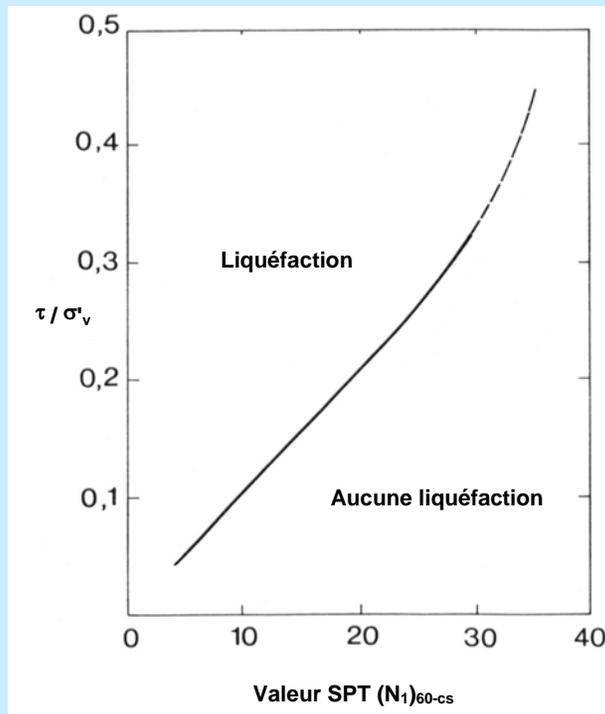


Figure 6.43 :

Corrélation entre la liquéfaction du sable in situ et la résistance de pénétration SPT normée $(N_1)_{60-CS}$ (modifié selon Seed et al., 1982) :

τ / σ'_v : Rapport de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique et la contrainte effective géostatique σ'_v . τ est déterminé selon les indications ci-après.

$(N_1)_{60-CS}$: Résistance de pénétration SPT normée déterminée selon Stark et al. (1992)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

e) Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

Contrainte de cisaillement cyclique τ dans la fondation :

La contrainte de cisaillement cyclique τ est calculée à chaque profondeur (cf. figure ci-dessous) à l'aide de l'équation suivante :

$$\tau = 0.65 \cdot \frac{a_h}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d$$

avec :

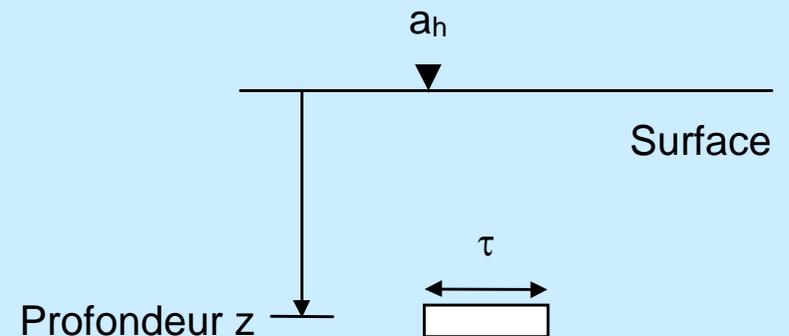
a_h : Accélération de pointe selon la carte suisse du risque de séismes

g : Accélération de gravité

σ_v : Contrainte normale verticale à la profondeur z

z : Profondeur

r_d : Facteur de réduction selon Seed et al. (1982)



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

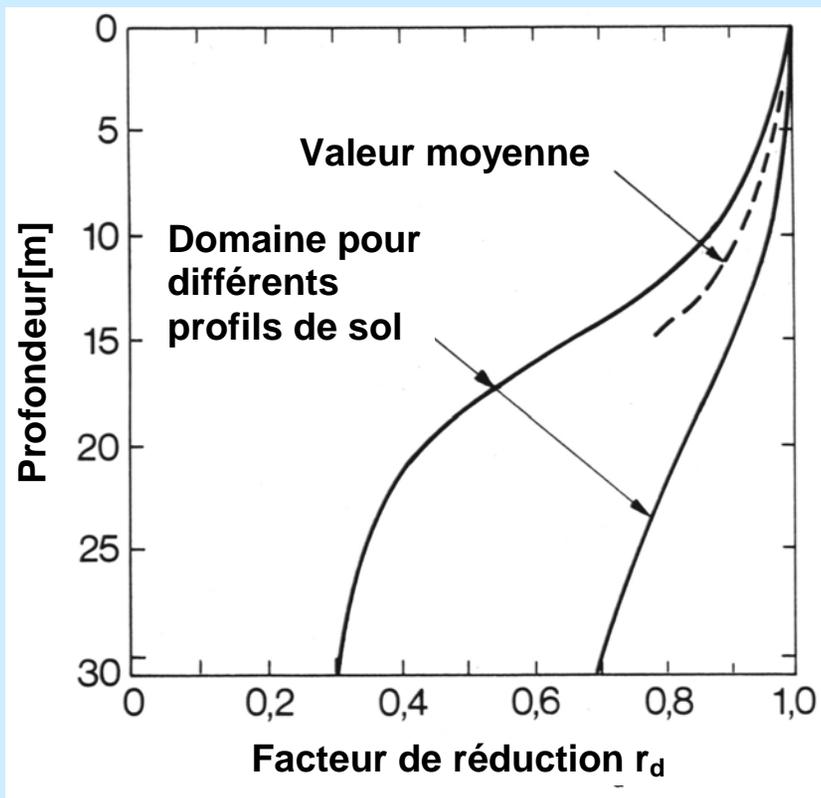


Figure 6.44 :
Facteur de réduction pour les
contraintes de cisaillement cycliques
(Seed et al., 1982)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

Contrainte de cisaillement cyclique τ dans le corps de digue :

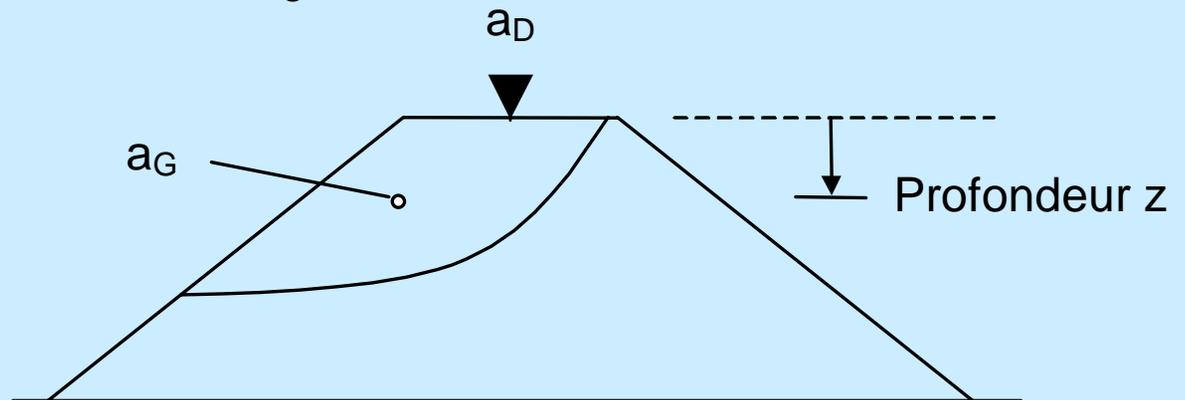
De manière analogue, la contrainte de cisaillement cyclique τ au centre de gravité d'une surface de glissement est calculée dans le profil en travers de la digue selon l'équation suivante :

$$\tau = 0.65 \cdot \frac{a_G}{g} \cdot \sigma_v$$

avec :

a_G : accélération maximale au centre de gravité

σ_v : contrainte normale verticale totale au centre de gravité étudié.



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

Accélération maximale a_G au centre de gravité:

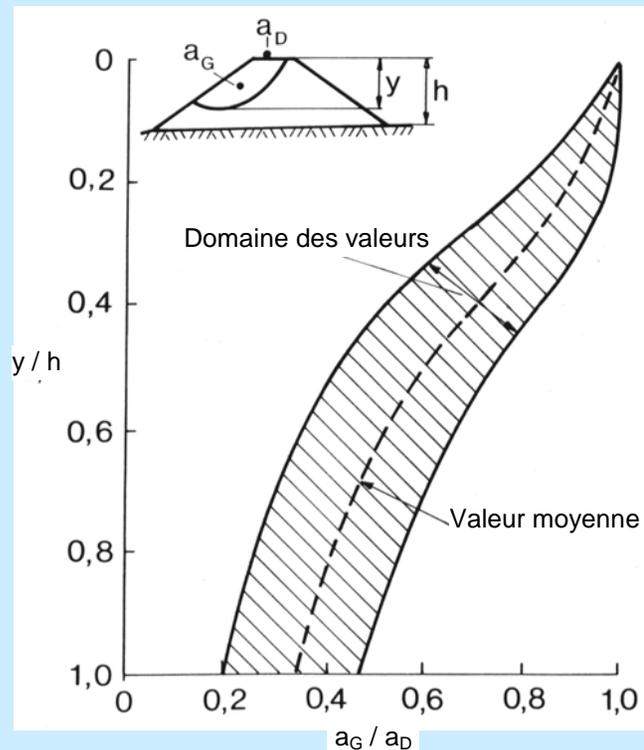


Figure 6.45 :
Evolution de l'accélération de
pointe du bloc de glissement en
fonction de la position de la
surface de glissement (Makdisi et
Seed, 1978)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

Accélération maximale a_D au couronnement:

$$a_D = \sqrt{(1.60 \cdot a_1)^2 + (1.06 \cdot a_2)^2 + (0.86 \cdot a_3)^2}$$

a_1 , a_2 et a_3 étant les valeurs spectrales de l'accélération selon les spectres de réponse pour les divers types de sol (avec un amortissement de 15 %) pour les trois premières fréquences propres ω_1 , ω_2 , respectivement ω_3 .

ω_1 , ω_2 , et ω_3 peuvent être calculés selon les formules suivantes :

$$\omega_1 = 2.40 \cdot \frac{v_s}{h} \quad ; \quad \omega_2 = 5.52 \cdot \frac{v_s}{h} \quad ; \quad \omega_3 = 8.65 \cdot \frac{v_s}{h}$$

h : Hauteur de la digue.

Célérité moyenne de l'onde de cisaillement

Les périodes T_1 à T_3 correspondant aux valeurs de ω_1 , ω_2 et ω_3 sont calculées par :

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$$

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détermination de la contrainte de cisaillement due à la sollicitation cyclique

Estimation de la célérité de l'onde de cisaillement:

Type de sol	v_s [m/s]
Matériaux meubles	
Couches de couverture de compacité faible, désagrégées, non saturées (profondeur 3 à 6 m)	110..480
Ballast (gravier sableux), non saturé	220..450
Ballast, saturé par l'eau souterraine	400..600
Ballast cimenté	1000..1500
Limon du fond du lac, non complètement saturé	290..540
Limon du fond du lac, saturé	390..530
Limon des berges, non saturé	120..400
Moraine	500..1150
Loess	150..300

Rocher	
Marne et grès mollassique, tendre, désagrégé	520..1050
Marne, non désagrégé	1000..1900
Grès mollassique, dur	1100..2200
Molasse du plateau	600..2500
Schiste	1100..3100
Calcaire	1800..3700
Gneis	1900..3500
Granite	2500..3900

Analyse simplifiée de la stabilité sismique

Etapas de calcul:

-) Détermination de la période fondamentale de la digue dans la direction perpendiculaire à l'axe de la digue au droit de la plus haute section

-) Calcul des forces sismiques de substitution horizontales et verticales pour divers blocs de glissement.

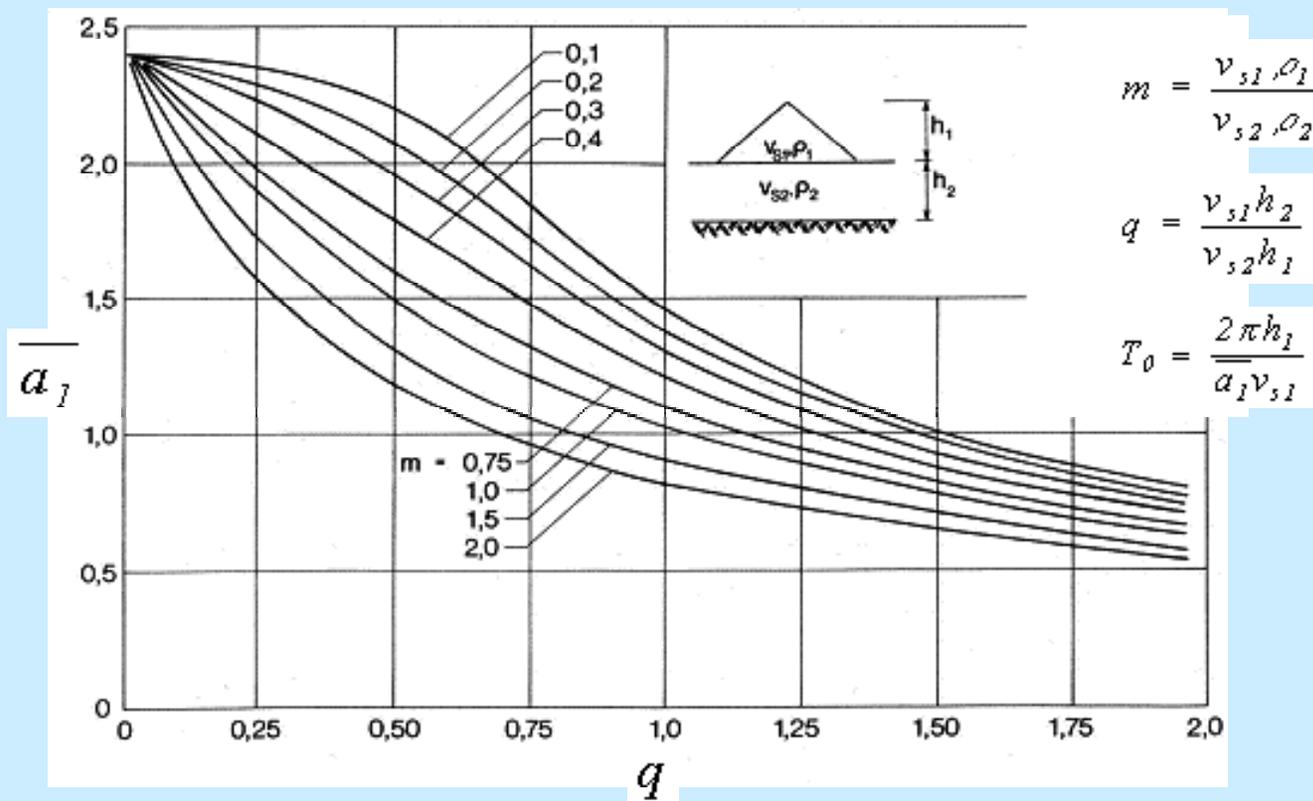
-) Calcul de la sécurité au glissement pour les blocs de glissement choisis en tenant compte du poids propre et des forces sismiques de substitution horizontale et verticale selon. La combinaison la plus défavorable des directions des forces sismiques de remplacement est déterminante pour la vérification.

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Analyse simplifiée de la stabilité sismique

Détermination de la période fondamentale de la digue (perpendiculaire à l'axe de la digue):



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Analyse simplifiée de la stabilité sismique

Calcul des forces de substitution pour un bloc de glissement:

$$E_h = a_G \cdot m$$

vec :

a_G : accélération moyenne au centre de gravité du bloc de glissement.

Force sismique verticale:
masse du bloc de glissement

$$E_v = a_v \cdot m$$

a_v étant la composante verticale de la sollicitation sismique selon a_h .

L'accélération verticale de pointe au peut être calculée à partir de la composante horizontale a_h avec $a_v = \frac{2}{3} a_h$.

Analyse simplifiée de la stabilité sismique

Calcul de la sécurité au glissement d'un bloc spécifique :

Les méthodes statiques applicables sont par exemple la méthode par tranches selon Bishop, respectivement Janbu ou d'autres méthodes simplifiées.

La contribution à la résistance totale de chaque tranche est calculée par l'équation de la résistance au cisaillement selon Coulomb :

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi' + c'$$

Le facteur de sécurité est ensuite calculé par l'équation suivante sur la base de cette résistance au cisaillement τ_f et de la contrainte τ due à la sollicitation sismique et à l'ensemble des charges statiques :

$$F = \frac{\sum \tau_f}{\sum \tau}$$

avec Σ : Somme de toutes les tranches le long de l'interface de glissement potentiel.

Calcul simplifié des déplacements de glissement

Etape de calcul :

- Calcul de la période fondamentale T_0 de la digue (dans la direction perpendiculaire à l'axe de la digue) au droit de la plus haute section.
- L'accélération critique d'une surface de glissement potentielle est celle qui conduit à un facteur de sécurité F de 1.0 du bloc de glissement correspondant.
- Le facteur de sécurité au glissement F est calculé à l'aide de méthodes statiques usuelles (par exemple selon Bishop ou Janbu) en tenant compte des forces statiques de substitution pour chaque tranche. La force statique de substitution horizontale I pour une tranche est égale à :

$$I = m \cdot a_c$$

avec : m : Masse de la tranche

- Calcul des valeurs d'accélération a_G (accélération moyenne au centre de gravité du bloc de glissement) et a_c (accélération critique).
- Détermination du déplacement de glissement résiduel total u .

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Calcul simplifié des déplacements de glissement

Estimation du déplacement de glissement :

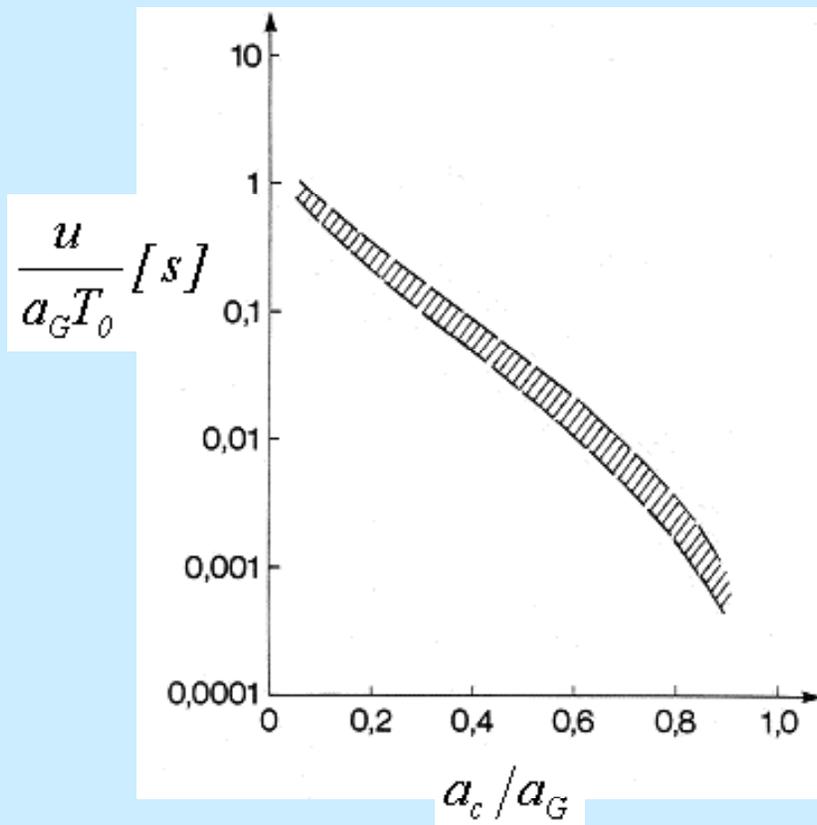


Figure 6.47 :
Déplacement de glissement résiduel selon une surface de glissement (modifié selon Makdisi et Seed (1978) :

a_c : Accélération critique d'une surface de glissement.

a_G : Selon 6.6.7.4 c).

T_0 : Selon 6.6.7.5 a).

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Calcul simplifié des déplacements de glissement

Déplacement admissibles :

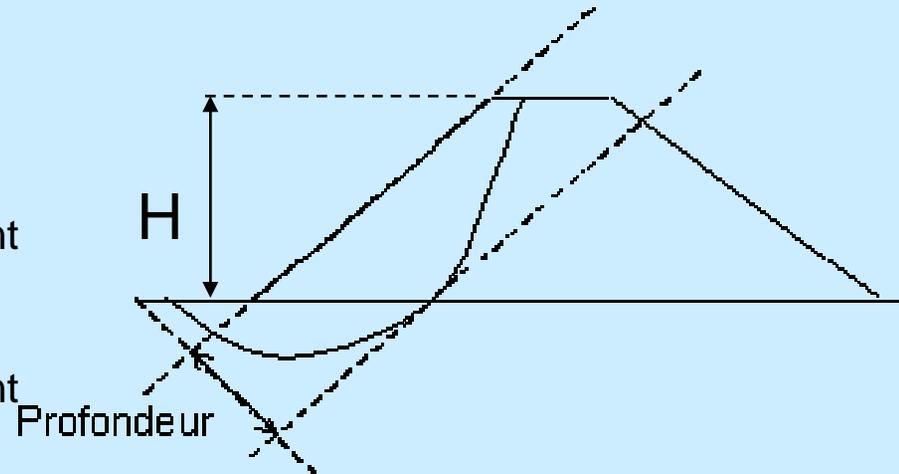
Objectifs:

- Eviter tout débordement par-dessus la digue.
- Exclure le risque d'érosion interne.

Critères :

- assurer la stabilité du bloc de glissement en état déformé.
0.5 m pour des blocs de glissement profonds. (Profondeur < 10 à 20% H)
- 0.2 m pour des blocs de glissement superficiels.

La profondeur du bloc de glissement est déterminée à l'aide d'une parallèle au parement de la digue



Choix de la hauteur de la digue
Critères pour le choix de la revanche

- ⇒ Une revanche est indispensable pour les raisons suivantes:
- ◆ surélévation du plan d'eau lors du passage de la crue maximale considérée pour le projet
 - ◆ la hauteur maximale des vagues provoquées par le vent extrême considéré
 - ◆ le déferlement des vagues à la surface du parement amont (wave run-up)
 - ◆ la surélévation du plan d'eau provoqué par le vent extrême considéré (wind set-up; analogue à la marée)
 - ◆ supplément de sécurité
(par exemple pour les vagues causées par des glissements de terre, avalanches, rupture de glaciers, tremblements de terre)

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Revanche - Effets du vent et des vagues

⇒ Hauteur des vagues

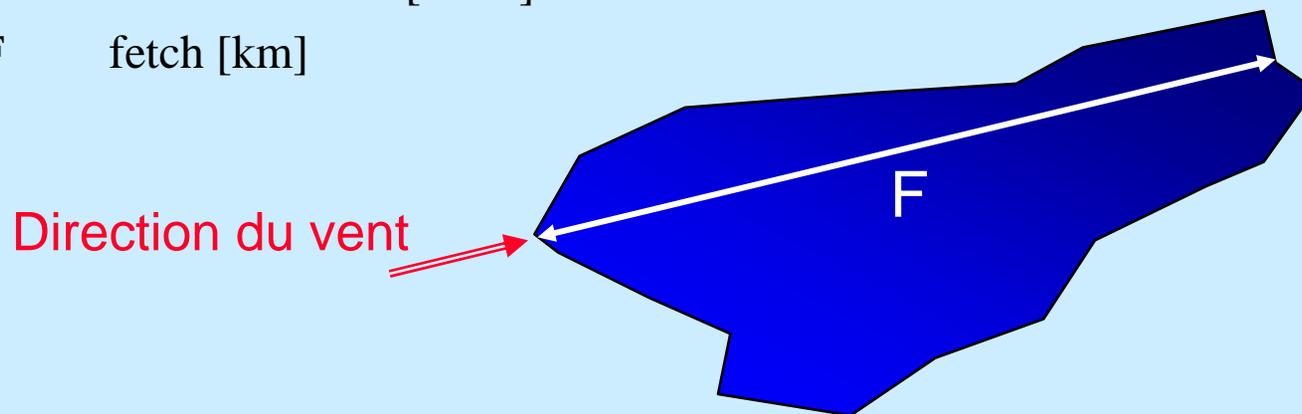
◆ Formule empirique de Molitor

✓ $F < 30$ km:
$$h_v = 0.76 + 0.032 \cdot (v \cdot F)^{1/2} - 0.26 \cdot F^{1/4}$$

✓ $F > 30$ km:
$$h_v = 0.032 \cdot (v \cdot F)^{1/2}$$

✓ avec

- h_v hauteur de la vague [m]
- v vitesse du vent [km/h]
- F fetch [km]



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Revanche - Effets du vent et des vagues

⇒ Déferlement des vagues

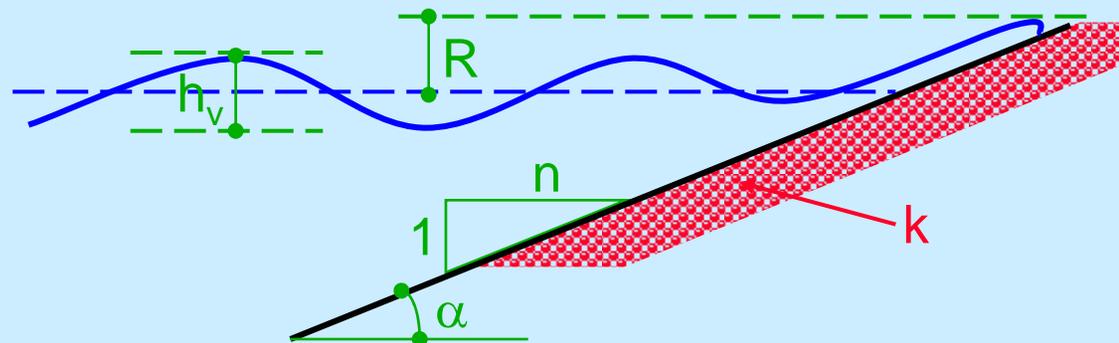
◆ formule de Kálal

✓ avec

- $k = 0.72$ rip-rap
- $k = 1.00$ pavé
- $k = 1.25$ pavé de blocs en béton préfabriqué
- $k = 1.40$ surfaces lisses

$$R = 3.2 \cdot h_v \cdot k \cdot \frac{1}{n}$$

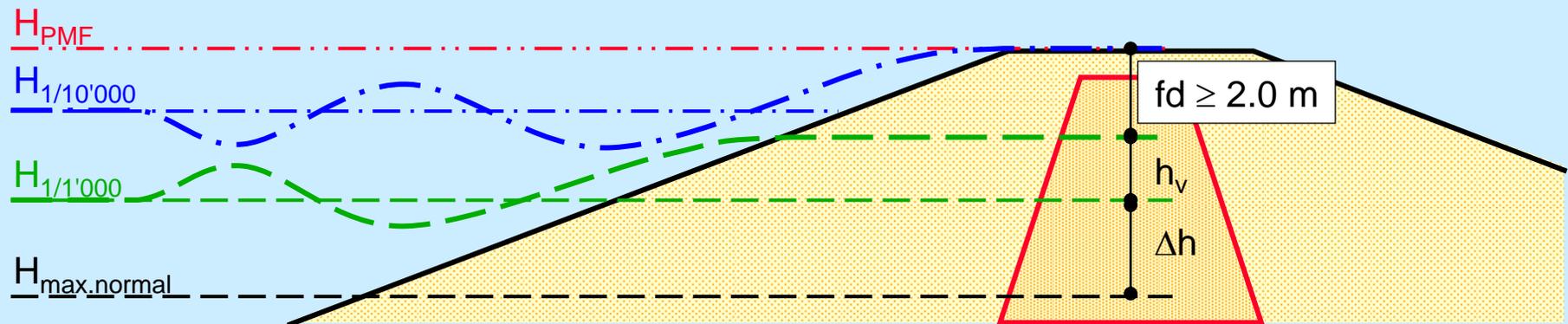
$$\frac{1}{n} = \tan(\alpha)$$



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Revanche pour digues à noyau

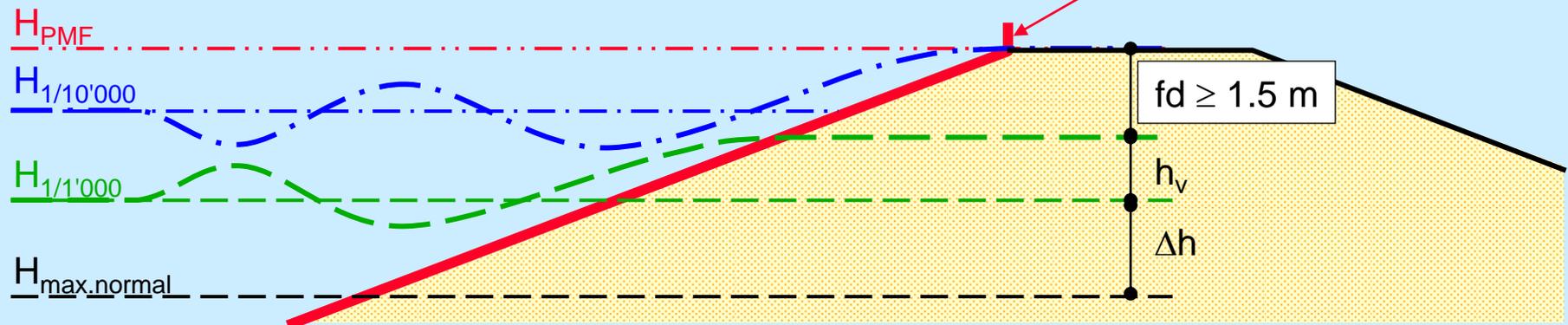


Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Revanche pour digues à masque amont

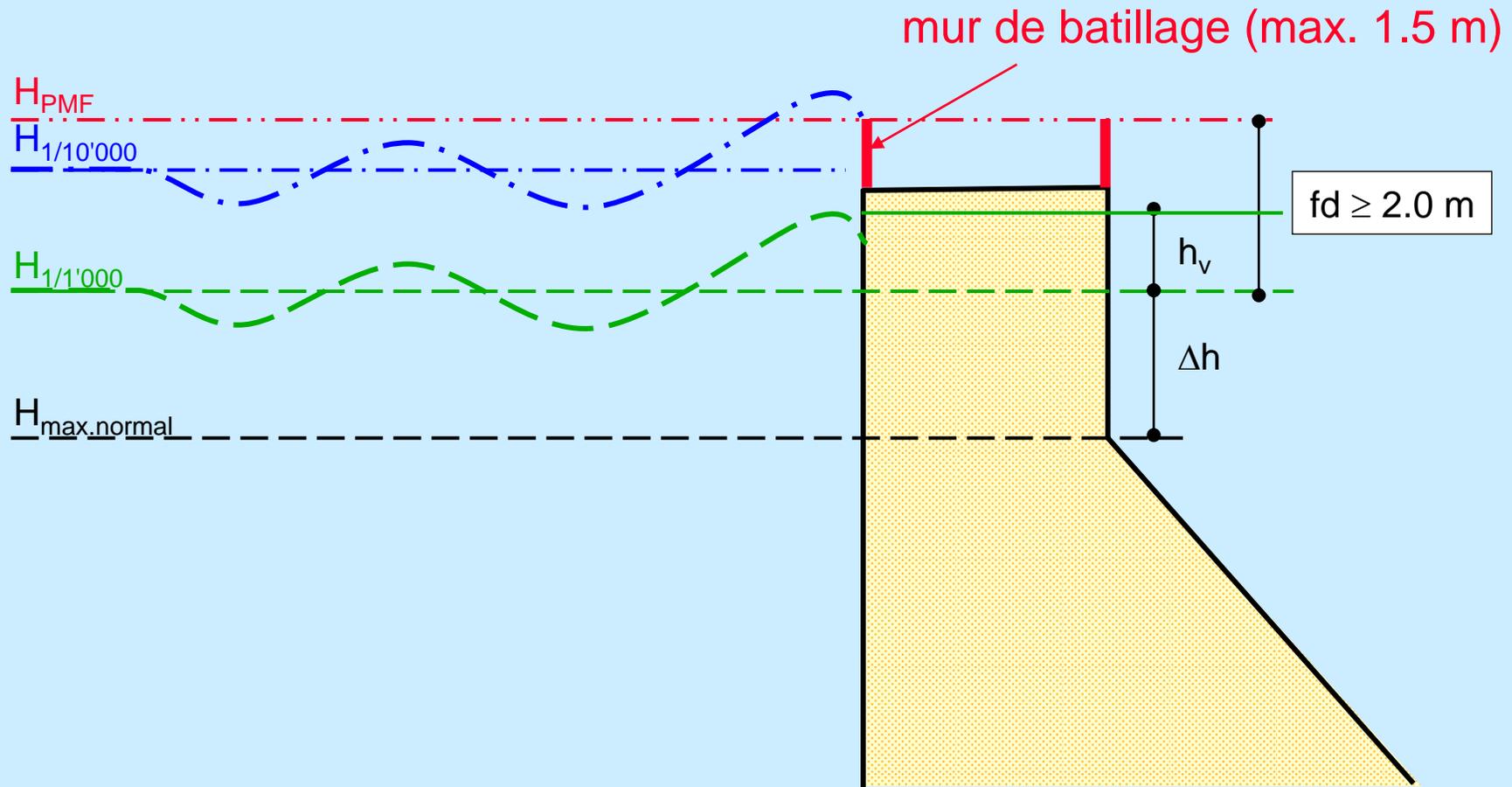
mur de battillage (max. 1.5 m)



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

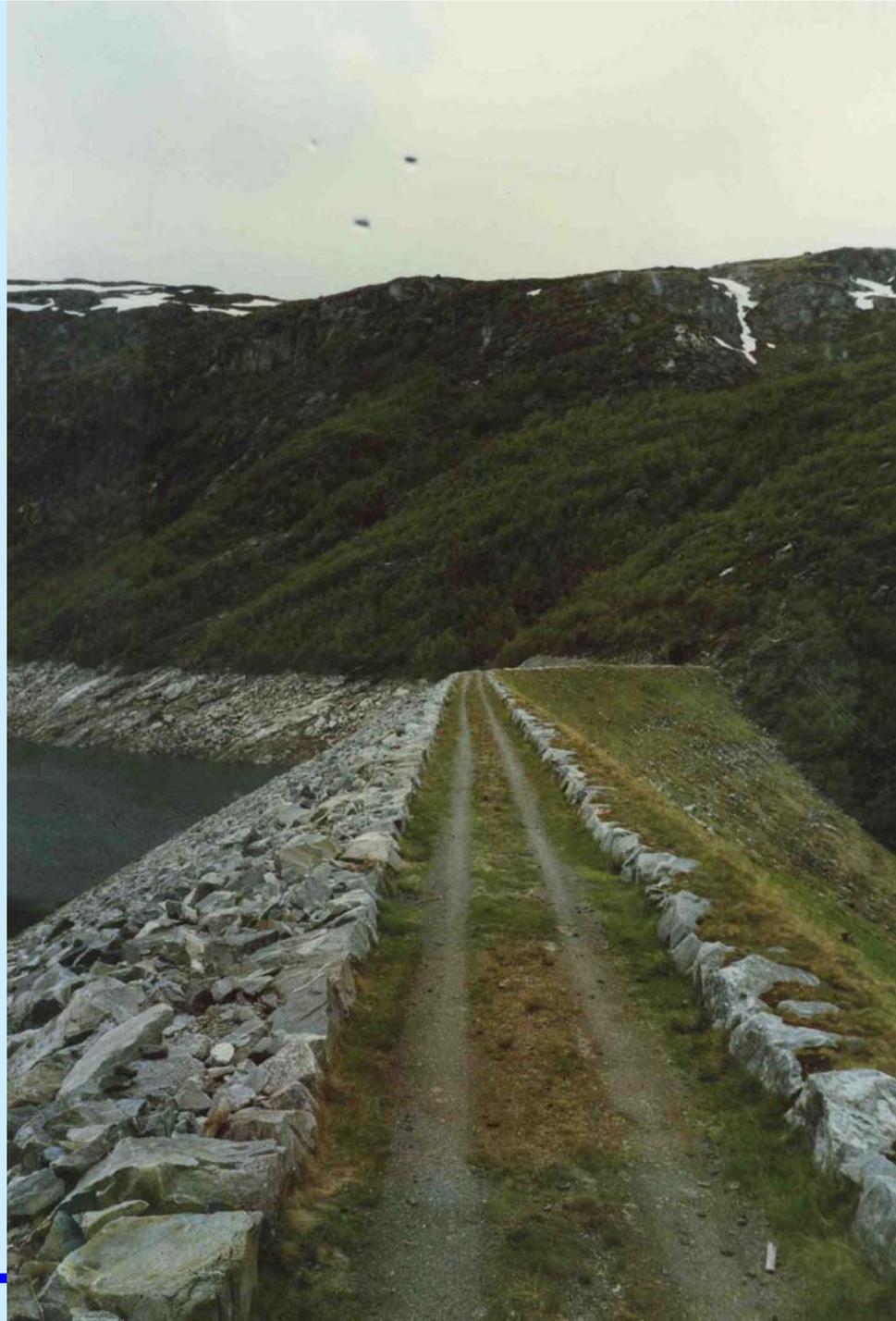
Revanche pour barrages en béton



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails

Détails du
couronnement

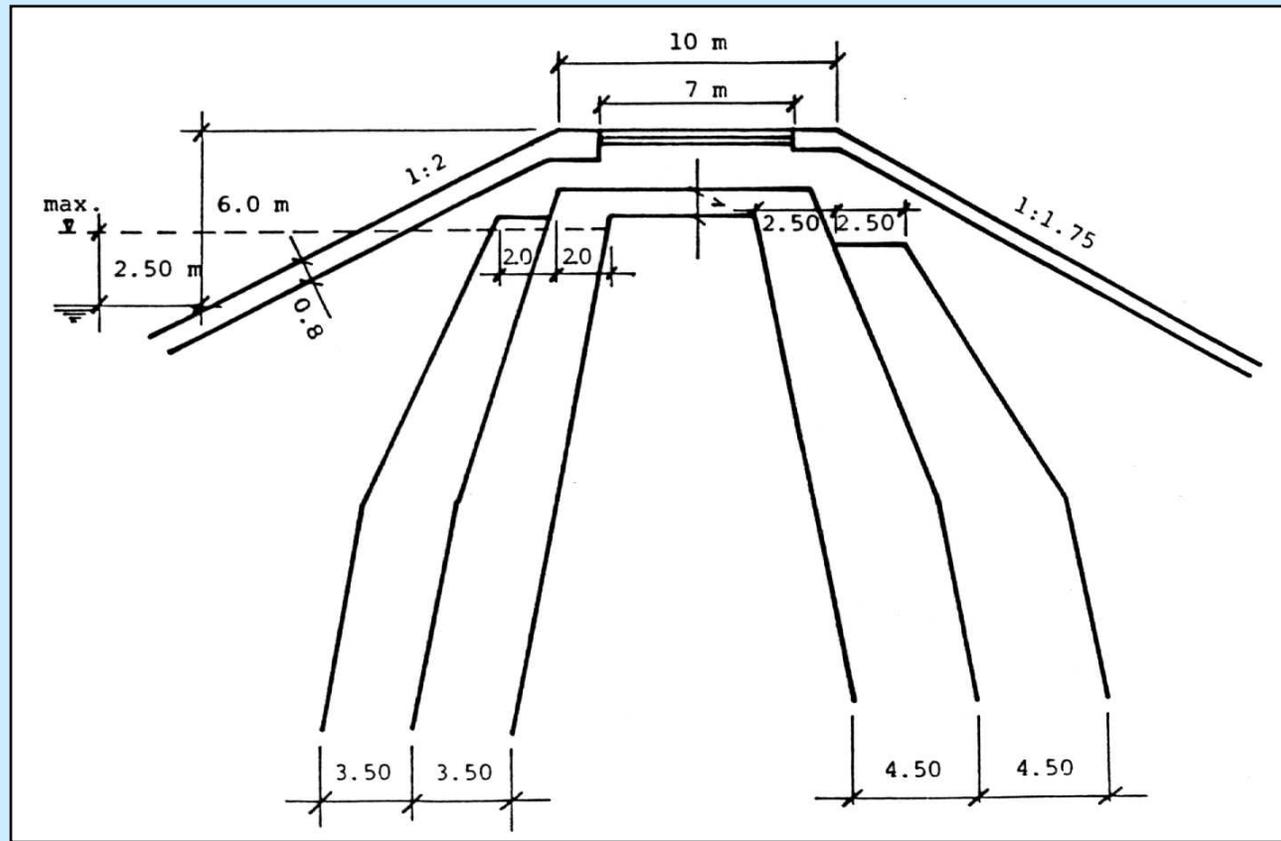


Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Détails du couronnement

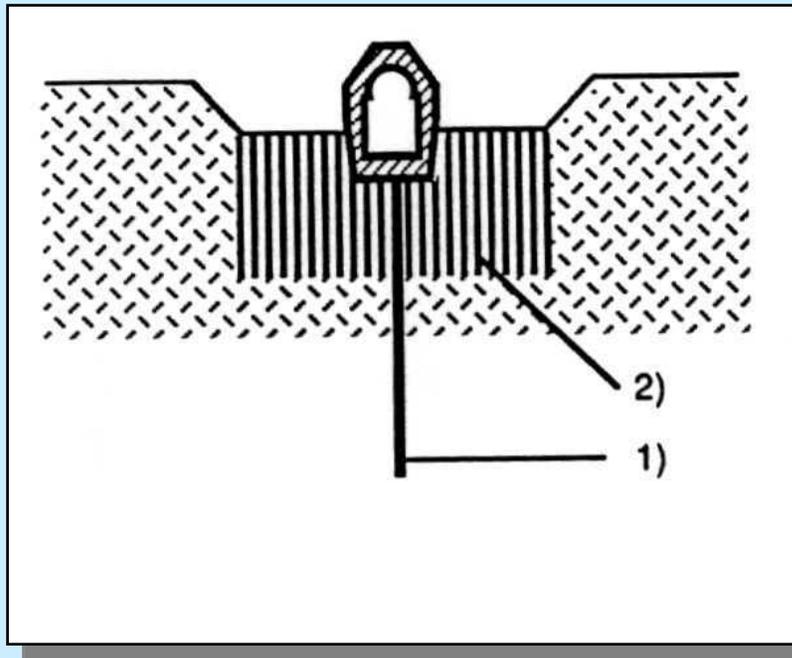
Exemple d'une digue avec noyau central



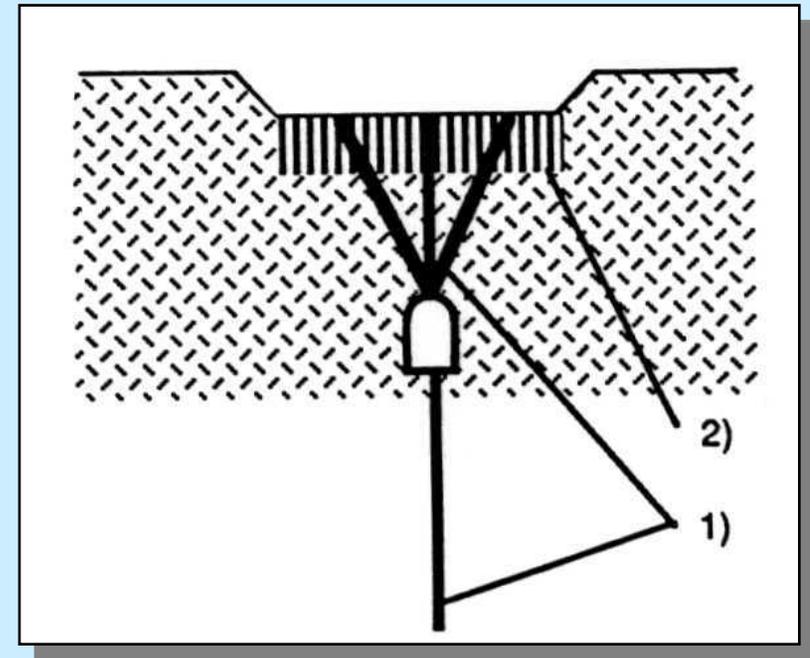
Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Galeries d'injection et de contrôle



Galerie en béton



Galerie souterraine

- 1) *Injections de contact et de consolidation*
- 2) *Voile d'étanchéité*

Figure 4.3.3-3. *Mattmark*—Coupe transversale.

1 enrochements, 2 filtre et drain, 3 noyau, 4 corps d'appui, 5 rideau d'injections, 6 alluvions fluvioglaciales, 7 moraine wurmienne, 8 alluvions pré-wurmiennes, 9 rocher, 10 moraine latérale, 11 galerie de drainage.

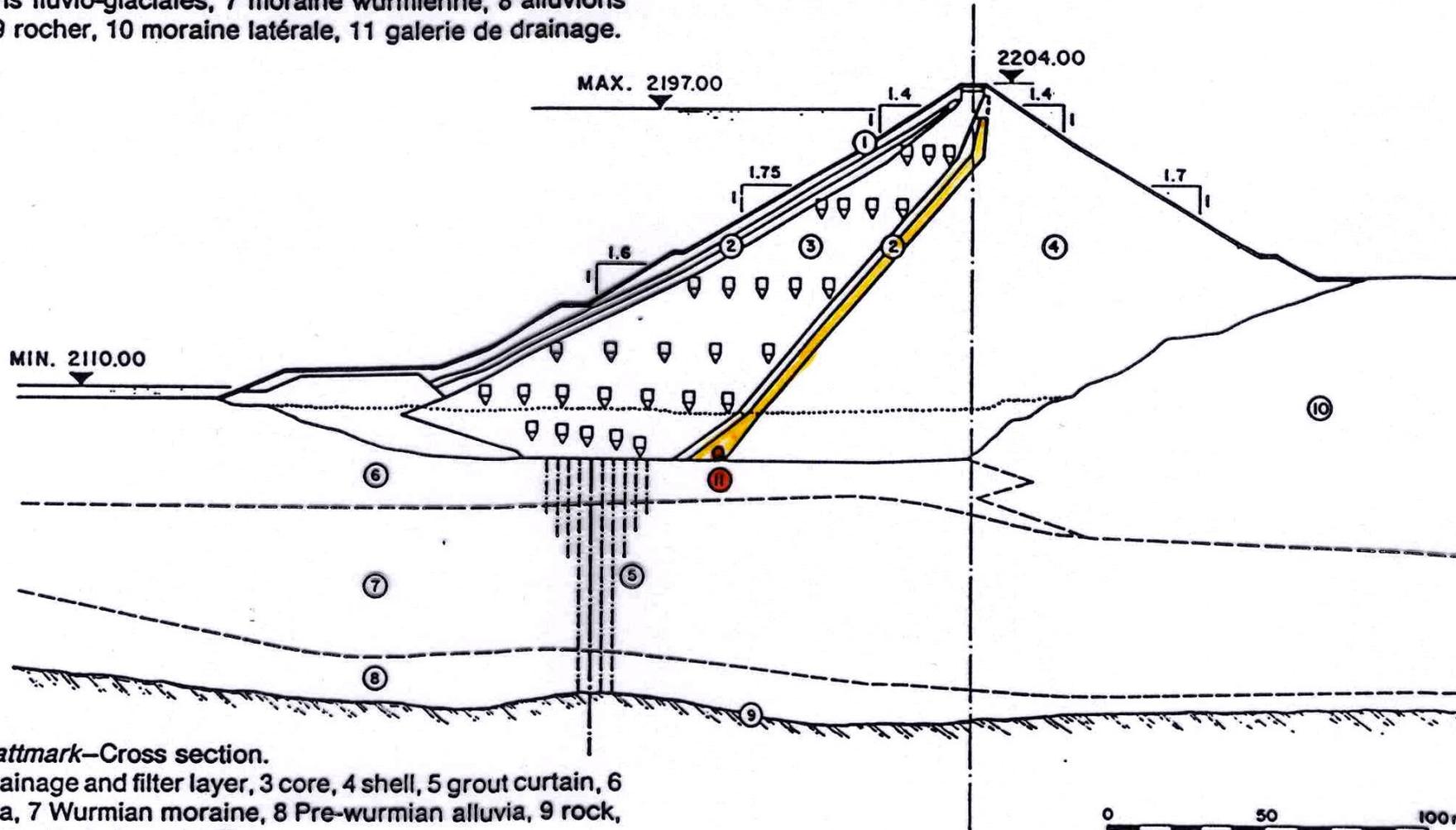


Figure 4.3.3-3. *Mattmark*—Cross section.

1 heavy riprap, 2 drainage and filter layer, 3 core, 4 shell, 5 grout curtain, 6 fluvio-glacial alluvia, 7 Wurmian moraine, 8 Pre-wurmian alluvia, 9 rock, 10 moraine shoulder, 11 drainage gallery.



Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

Barrage en remblai de Mattmark: galerie de drainage

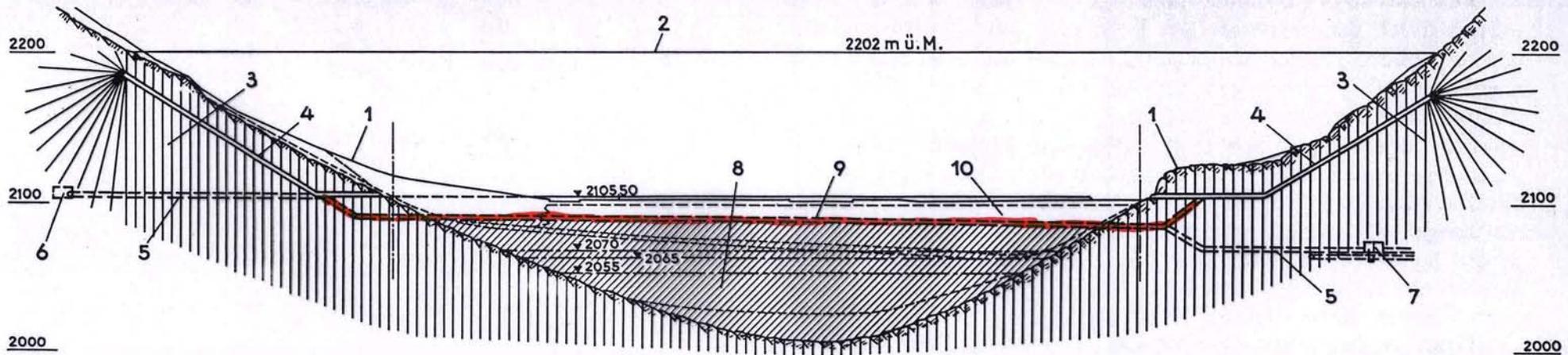
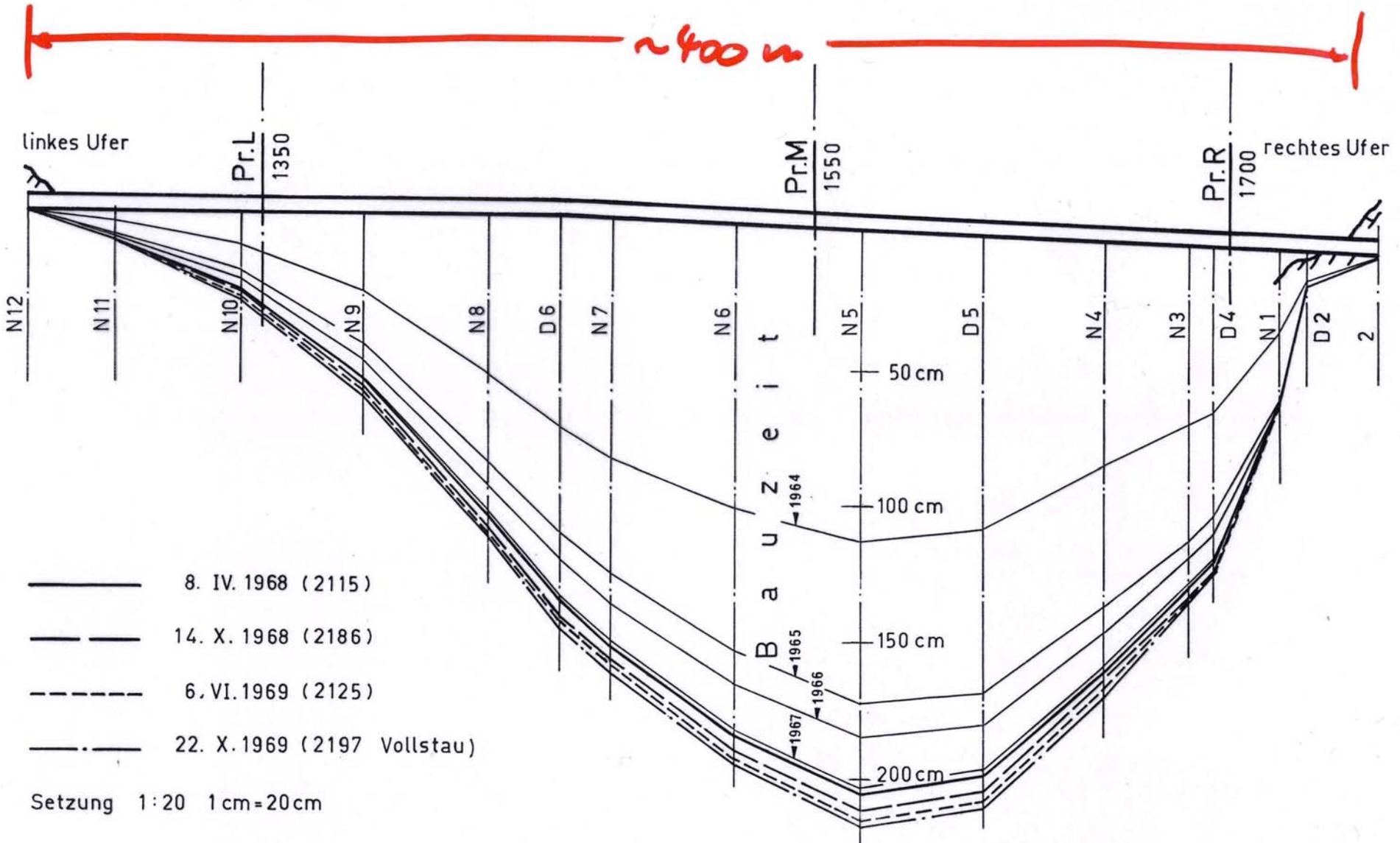


Bild 4. Querschnitt durch das Tal, Masstab 1:5500

- 1 natürliches Terrain
- 2 Dammkrone
- 3 Fels mit Injektionsschirm
- 4 Injektionsstollen

- 5 Zugang zum Grundablass und zur Drosselklappe
- 6 Drosselklappenkammer
- 7 Grundablass
- 8 Lockergestein-Untergrund mit Injektionsschirm
- 9 Drainagestollen
- 10 Oberflächliche Siltzone

4



- 8. IV. 1968 (2115)
- - - 14. X. 1968 (2186)
- · - · 6. VI. 1969 (2125)
- · — · 22. X. 1969 (2197 Vollstau)

Setzung 1:20 1cm=20cm

DRAINAGESTOLLEN : SETZUNGEN



Barrages en remblai Calcul de stabilité

Barrage en remblai de Mattmark: injections des alluvions et galerie de drainage

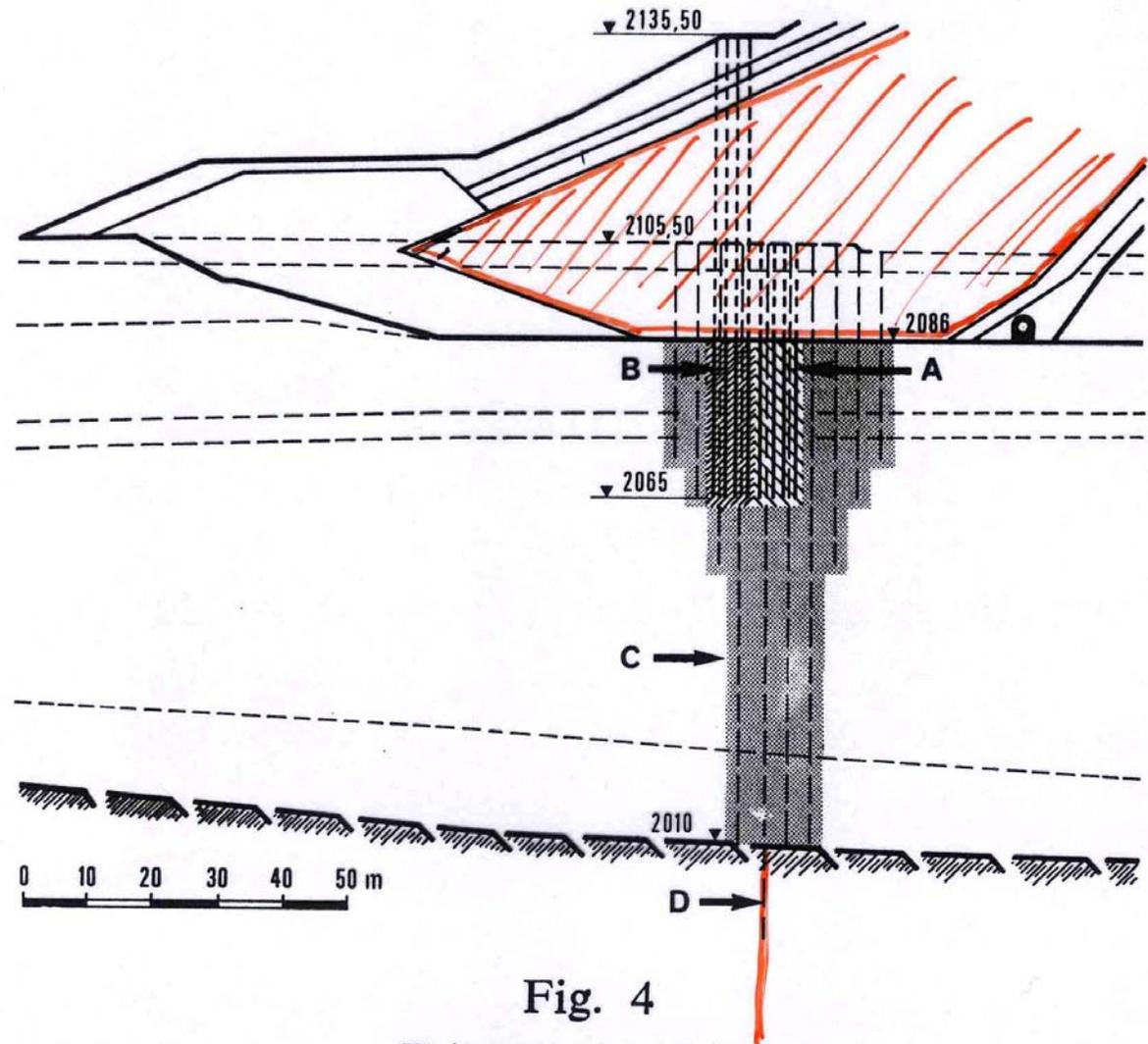


Fig. 4

Ecran secondaire.

- (A) Ecran secondaire partie droite exécuté depuis la cote 2105,50.
- (B) Ecran secondaire partie gauche exécuté depuis la berme 2135,50.
- (C) Ecran principal en terrains meubles.
- (D) Rideau d'injection dans le rocher.

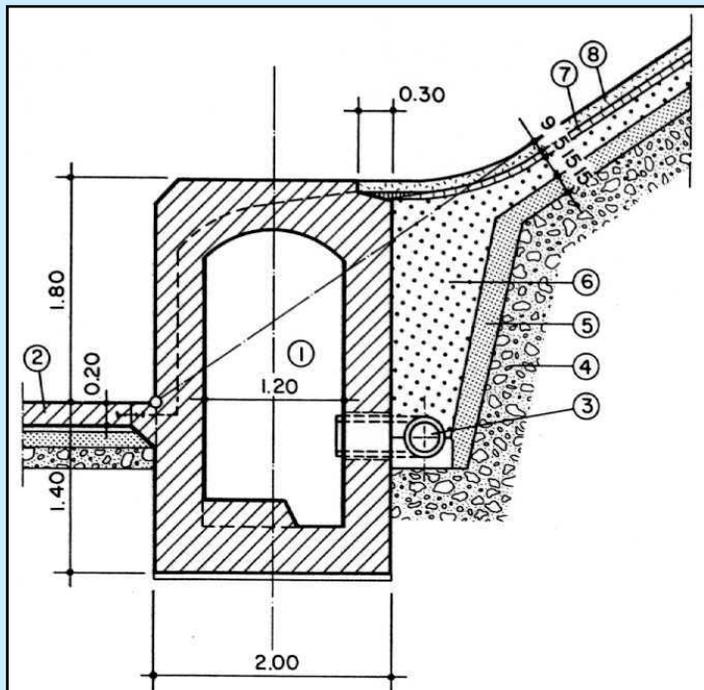


Barrages en remblai

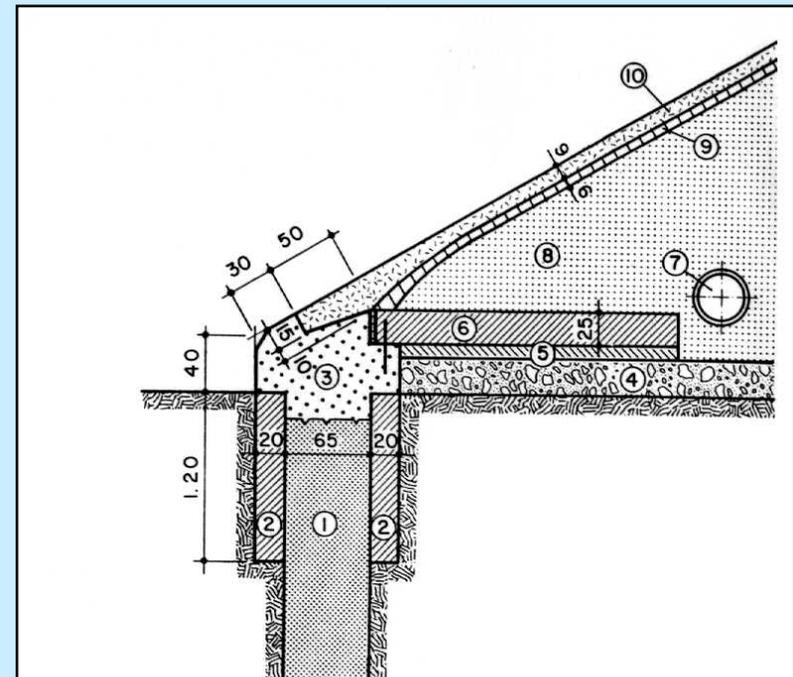
Calcul de stabilité et détails constructifs

Contact des éléments d'étanchéité avec le sous-sol

Masque amont en béton bitumineux



Val d'Ambra – Liaison entre le masque amont et le revêtement au fond du bassin. 1 Galerie de contrôle et de drainage, 2 revêtement en béton, 3 drain, diamètre 200 mm, 4 moraine, 5 couche filtrante, 6 couche drainante, 7 couche bitumineuse, 8 revêtement bitumineux étanche.



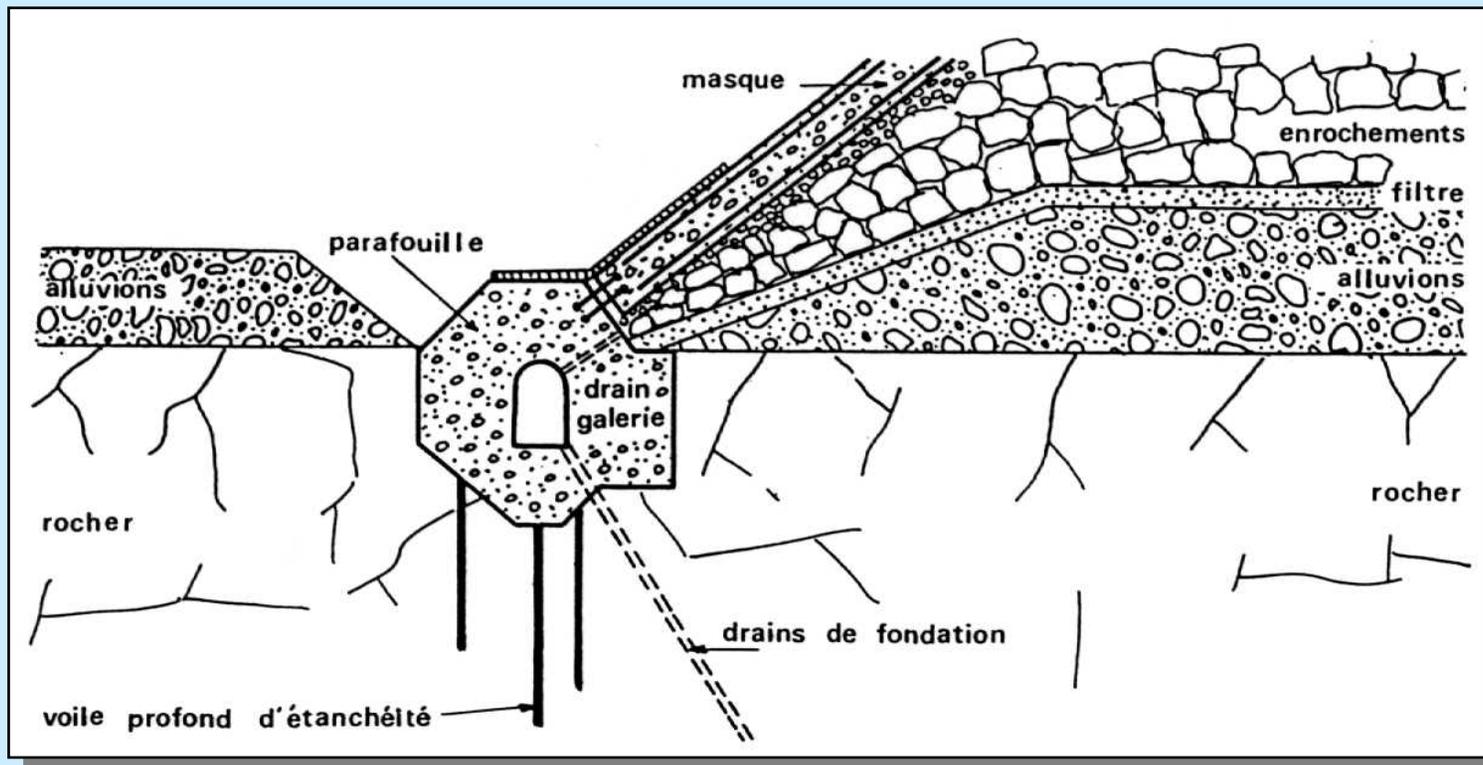
Godey – Ouvrage de liaison entre la paroi moulée et le masque amont. 1 Paroi moulée, 2 murets de guidage, 3 tête de la paroi moulée, 4 couche de réglage, 5 béton de réglage, 6 dalle de transition, 7 drain, diamètre 400 mm, 8 couche drainante, 9 bitume poreux, 10 masque étanche.

Barrages en remblai

Calcul de stabilité et détails constructifs

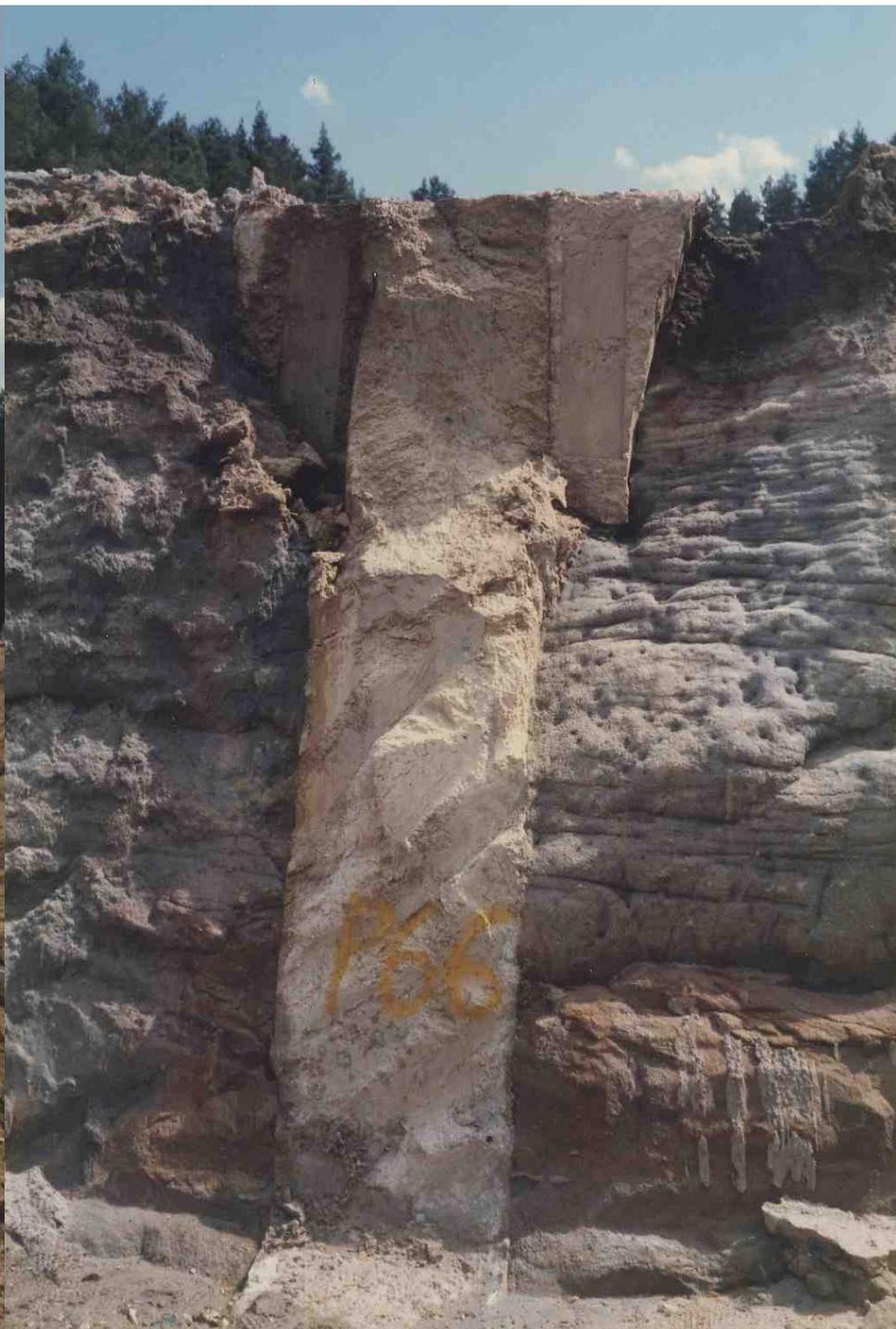
Contact des éléments d'étanchéité avec le sous-sol

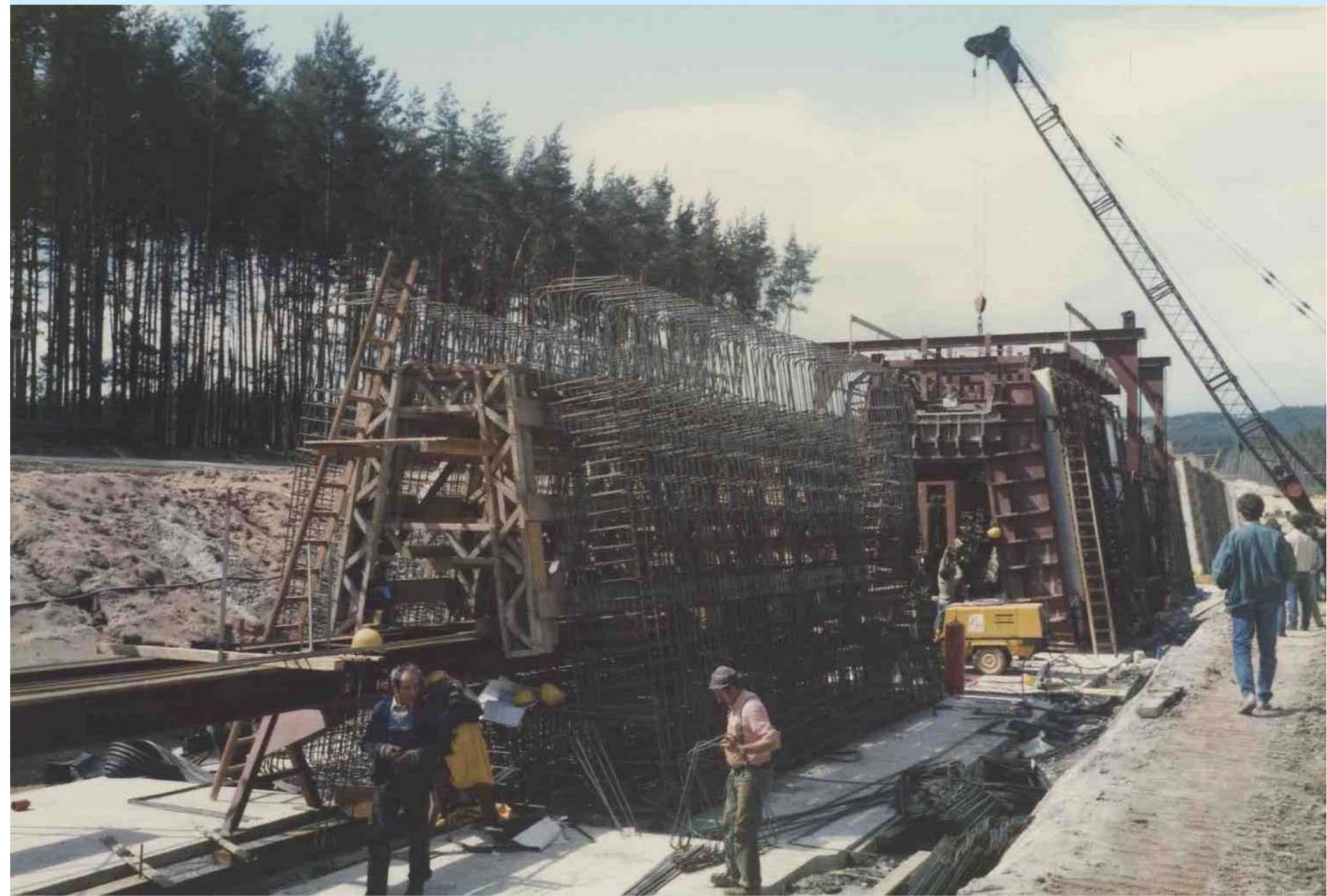
Masque amont en béton

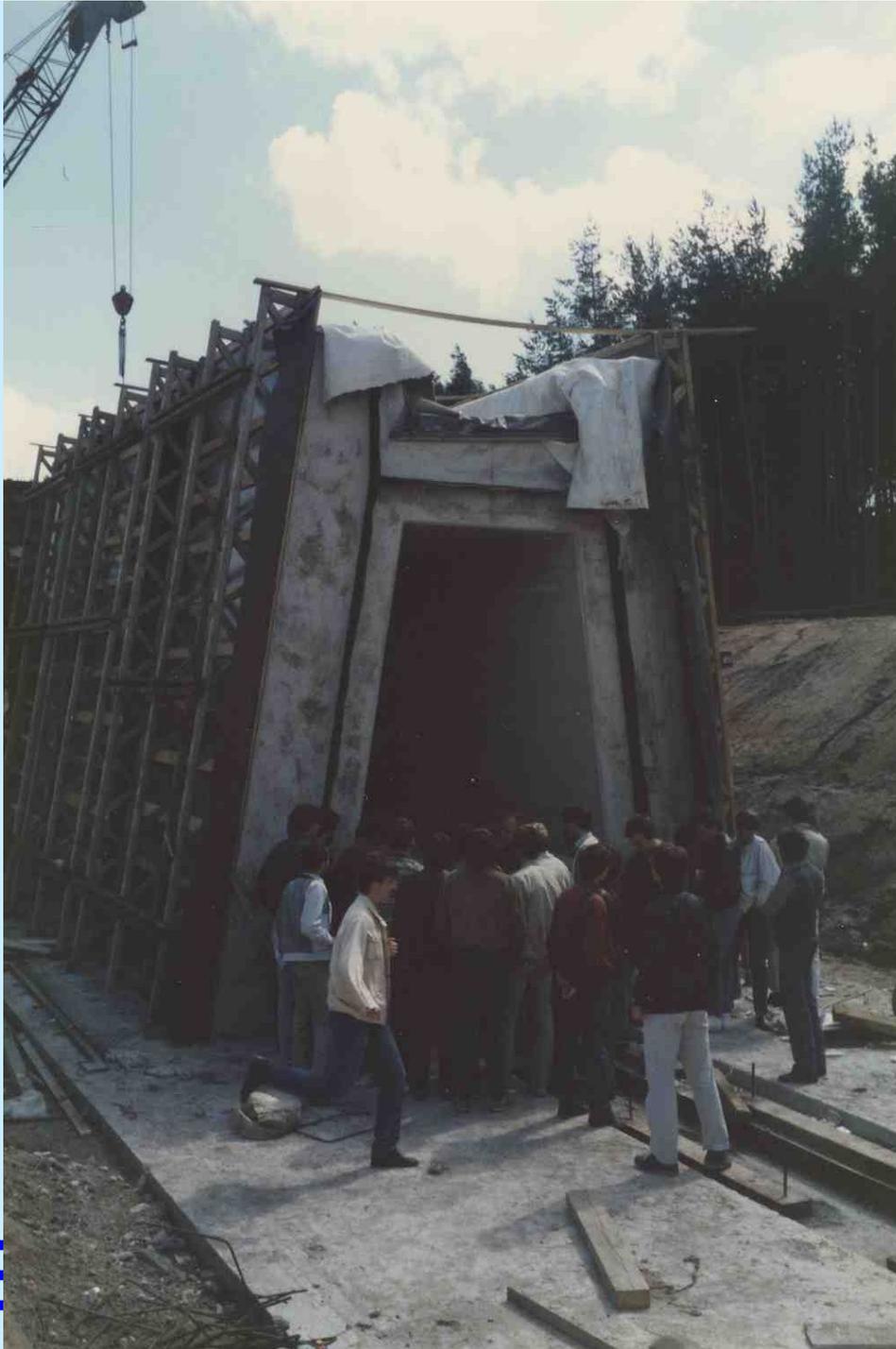


Parafouille avec galerie de contrôle

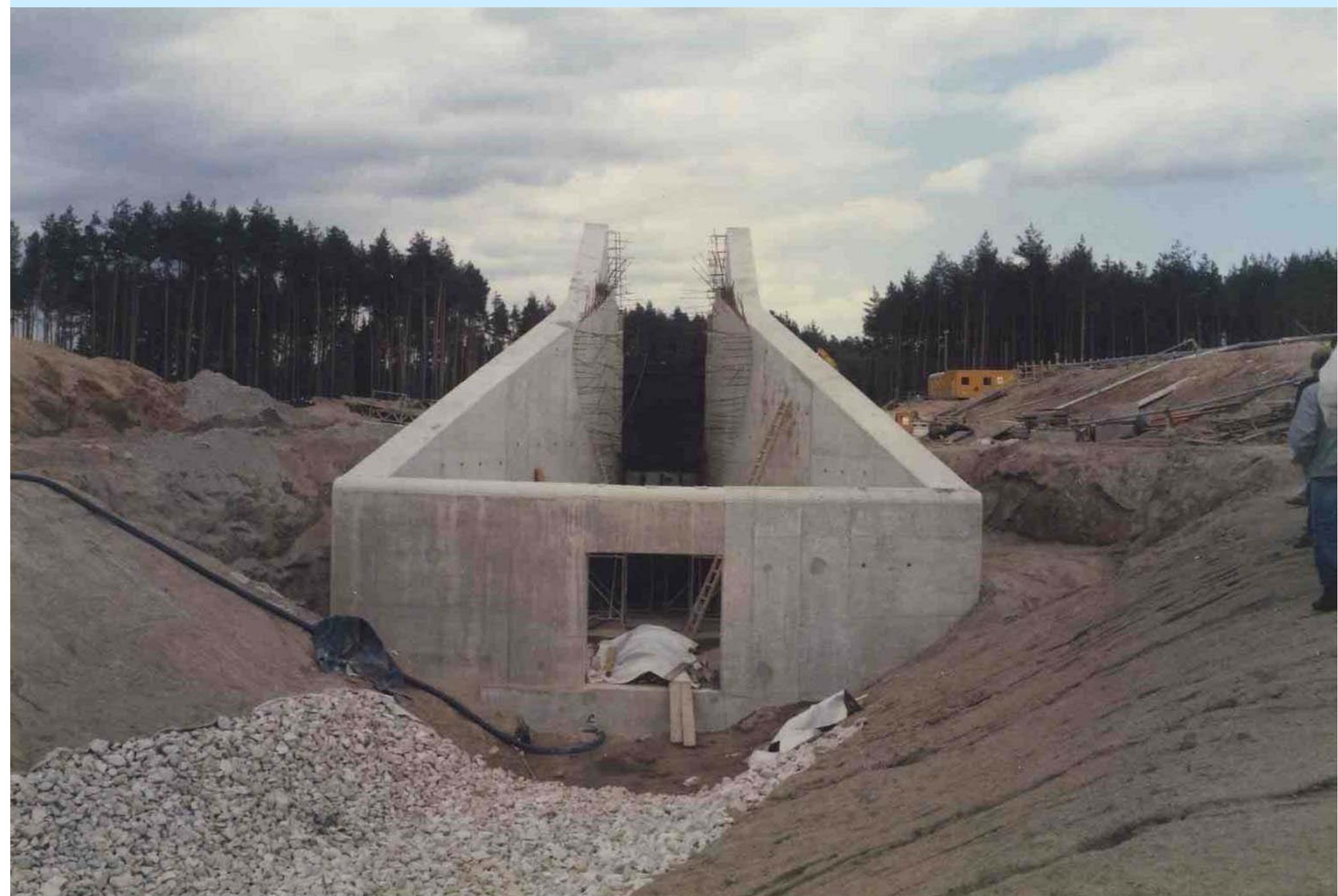








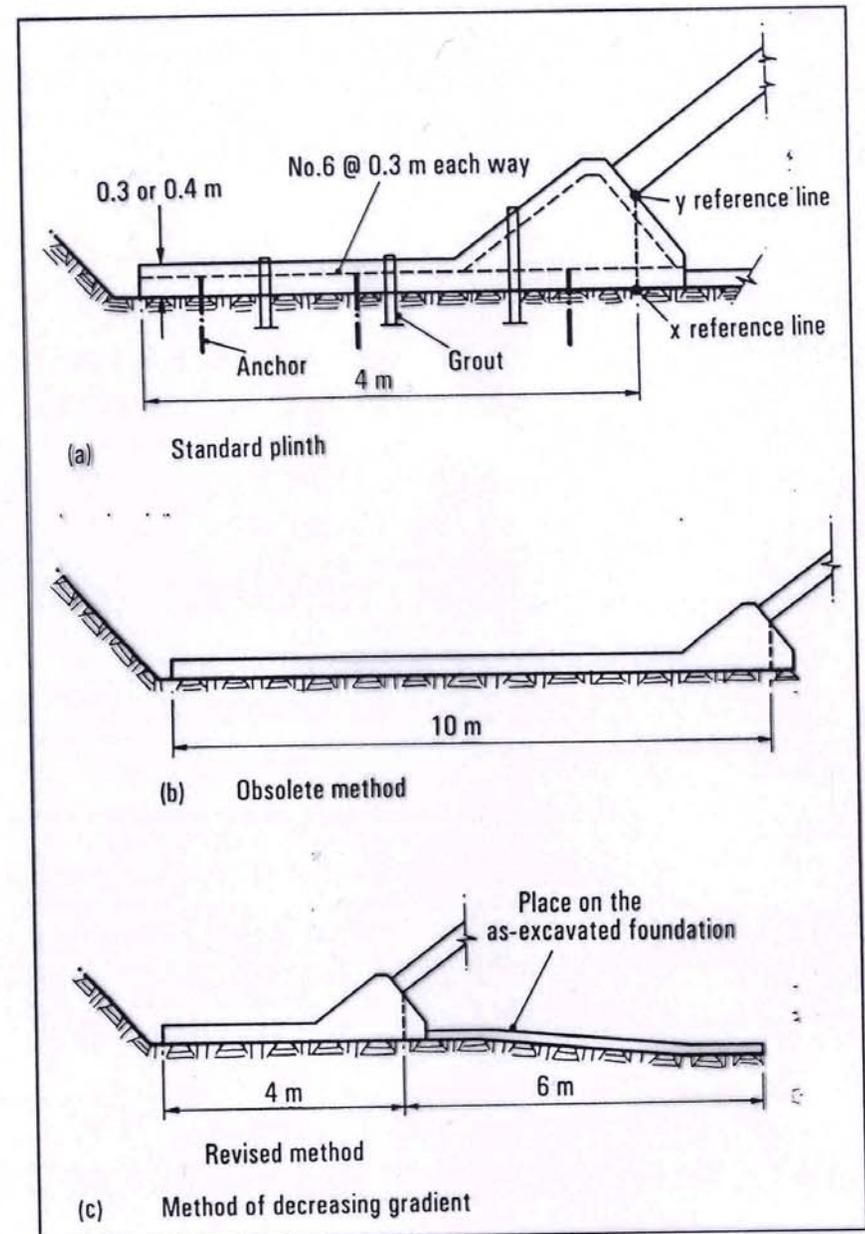




Dimensionnement des plinthes

Examples of plinth width

Dam	Dam height (m)	Plinth width (m)
Cethana	110	3- 5.5
Turimiquire	115	3.5-7.5
Murchison	89	3-5
Salvajina	148	4-8
Bejar	71	3-H/15
Zhushuqiao	78	3.5-5
Wuwulati	135	6-10
Santa Juana	110	3-5
Houay Ho	85	4-9
Daquio	91	6-9
Tianshengqiao 1	178	4-9
Gudongkou	120	4.5-10
Antamina	200	5-10
Nam Ngum 3	220	4-11



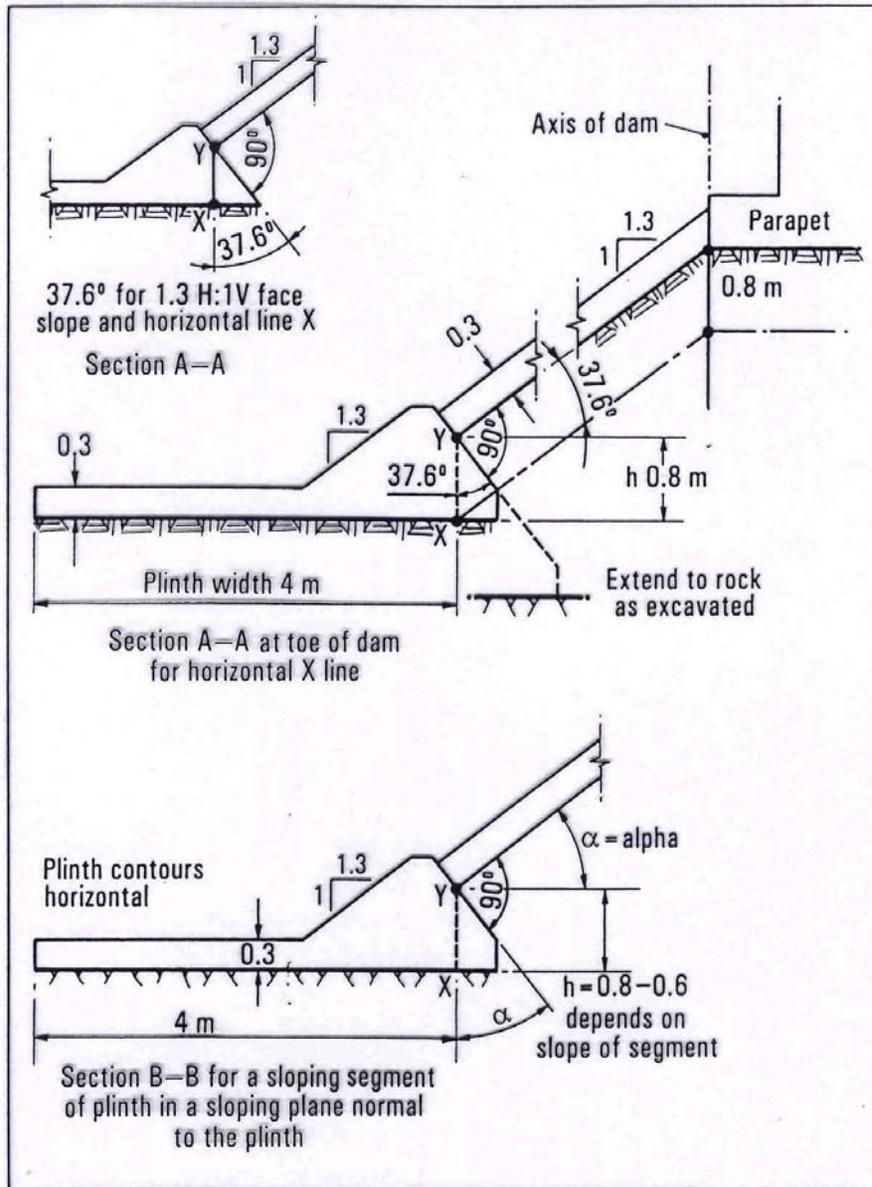


Fig. 2. Reference lines and sections for the plinth.

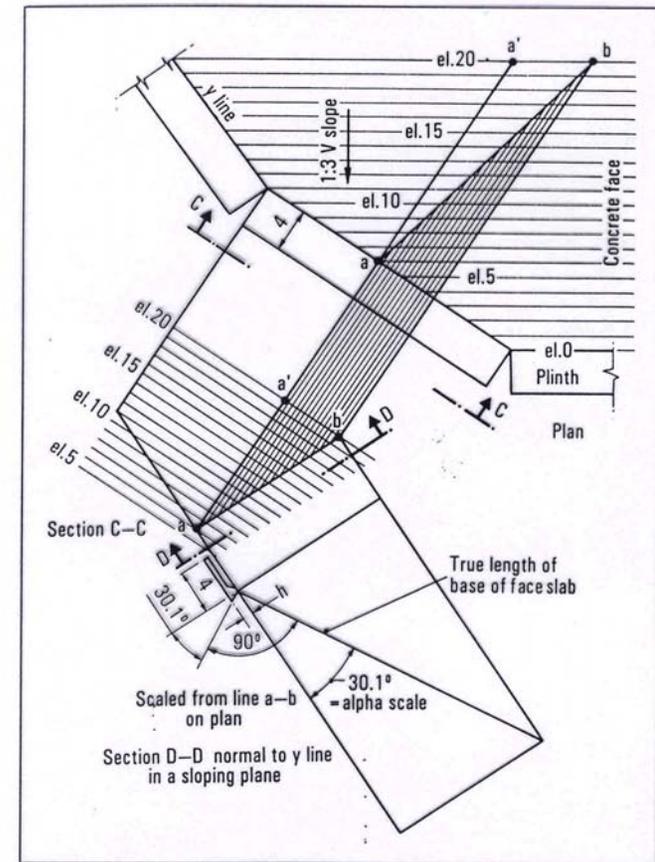


Fig. 3. Determination of the angle α .

To determine angle α (see Fig. 3):

1. Place a point [a] on the y line on the plan.
2. From point a establish a line a-a' from point a at 90° to the y line.
3. On a Section C-C draw the elevation of the y line and a-a'.
4. On Section C-C draw a line a-b normal to the y line.
5. Project it to the plan where it becomes line a-b.
6. Draw Section D-D, which is in a sloping plane normal to the plinth line and determines angle α , the angle between the plane of the face of the plinth and the plane of the edge of the face slab.

Angle α is the angle which establishes the necessary 90° intersection of the plane of the face slab with the plane of the face of the plinth.