

  
 ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

## Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes

Modifications lors de la révision des SIA 261 et 267

Vincent Labiouse

  
 LABORATOIRE DE  
 MÉCANIQUE DES ROCHES

Journée technique VSS - GS
26/11/2014

### Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes Modifications lors de la révision des SIA 261 et 267

EPFL - LMR

1. Introduction
  - 1.1 Contexte
  - 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes
2. Modifications dans la section 4.4 de la SIA 261
  - 2.1 Facteurs influençant l'action de l'eau
  - 2.2 Méthodes envisageables pour évaluer l'action de l'eau
  - 2.3 Répartition de la pression hydraulique sur les ouvrages
3. Modifications dans la SIA 267
  - 3.1 Exigences en termes de reconnaissances
  - 3.2 Plus de cohérence dans la terminologie
  - 3.3 Chapitre 13 et Figure 10
4. Conclusions

### Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes Modifications lors de la révision des SIA 261 et 267

EPFL - LMR

1. Introduction
  - 1.1 Contexte
  - 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes
2. Modifications dans la section 4.4 de la SIA 261
  - 2.1 Facteurs influençant l'action de l'eau
  - 2.2 Méthodes envisageables pour évaluer l'action de l'eau
  - 2.3 Répartition de la pression hydraulique sur les ouvrages
3. Modifications dans la SIA 267
  - 3.1 Exigences en termes de reconnaissances
  - 3.2 Plus de cohérence dans la terminologie
  - 3.3 Chapitre 13 et Figure 10
4. Conclusions

### 1.1 Contexte: révision partielle des SIA 261 et SIA 267

EPFL - LMR

- Révision partielle des normes SIA 261:2003 et SIA 267:2003
  - SIA 267 et 267/1 en vigueur depuis août 2013 (version allemande)
  - SIA 261 en vigueur depuis juillet 2014 (version allemande)
  - Traduction française en cours de finalisation
- Attention particulière portée à la prise en compte de l'eau souterraine et de ses actions sur les ouvrages
  - Constat de membres de la CN 267 de la SIA que les aquifères présents dans le terrain n'étaient pas correctement considérés → conséquences potentielles sur l'analyse et le dimensionnement
- S'agissant d'une révision partielle, renoncement à rendre la SIA 267:2013 compatible avec l'Eurocode 7
- Modification des articles qui posaient clairement problème
  - Fruit du travail de nombreux intervenants (CN 267 et 261)

### 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

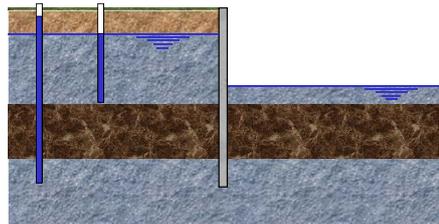
EPFL - LMR

- Utilisation et mélange de termes inappropriés
  - En Français, amalgame entre « pression hydraulique, pression hydrostatique, résultante des pressions, force de percolation »
    - e.g. pressions d'eau dans les terrains systématiquement qualifiées d'hydrostatiques dans la version française de la SIA 267:2003 – au lieu de pression hydraulique –, comme si l'eau souterraine était toujours au repos (i.e. sans écoulement)
  - En Allemand, les termes « Wasserdruck, Auftrieb und Gesamtwasserdruck » ne sont pas toujours utilisés à bon escient
- → Formulations d'articles peu claires, voire erronées, en termes de mécanique des sols.
- Confusion entre les deux méthodes permettant d'évaluer les actions dues à l'eau sur/dans un volume de sol :
  - en tant que pressions d'eau s'exerçant sur les faces de ce volume, combinées avec le poids total du volume de sol considéré ;
  - en tant que pression de courant (ou d'écoulement) dans le volume de sol, en combinaison avec le poids déjaugé de celui-ci.

### 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

EPFL - LMR

- Certains facteurs influençant l'action de l'eau sur les ouvrages mal/non énoncés → *modèle hydrogéologique simpliste*
  - Agencement des couches de sol, leur épaisseur, leur perméabilité, leur caractère anisotrope
  - Existence possible de plusieurs nappes avec différents potentiels



### 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

EPFL - LMR

- Présentation de cas simplifiés comme des situations usuellement rencontrées et couramment admises (Tableau 3 de la SIA 261:2003)
  - En règle générale, une répartition simplifiée peut être admise...
  - In der Regel darf eine vereinfachte Wasserdruckverteilung...

Fall	1	2	3	4
Stützwand	Gebäude im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser
Baugrund	leichtig	hängigen, drehende Schicht am Wandfuß	hängigen, drehende Schicht am Wandfuß	hängigen und fest
Stromung	keine Stromung	keine Stromung	Stromung nur auf der Innenseite	keine Stromung
Wasserdruckverteilung resultierender Wasserdruck	$i = 0$	$i = 0$	$i = i_{LFC}$	$i = i_{LFC} + \Delta i$
Maximaler Wasserdruck				

⚠ Il s'agit de cas idéalisés relatifs à certaines conditions particulières

⚠ De plus, le cas 4 n'est pas du côté de la sécurité

### 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

EPFL - LMR

- Ambiguïté liée à l'utilisation d'une pression hydraulique résultante sur les parois de soutènement
  - Si des pressions d'eau agissent simultanément sur les deux côtés d'une paroi de soutènement, la valeur caractéristique de la pression hydraulique  $w_k$  sera déterminée comme pression hydraulique résultante (art. 4.4.3.3).

Fall	1	2	3	4
Stützwand	Gebäude im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser	Stützwand im Grundwasser
Baugrund	leichtig	hängigen, drehende Schicht am Wandfuß	hängigen, drehende Schicht am Wandfuß	hängigen und fest
Stromung	keine Stromung	keine Stromung	Stromung nur auf der Innenseite	keine Stromung
Wasserdruckverteilung resultierender Wasserdruck	$i = 0$	$i = 0$	$i = i_{LFC}$	$i = i_{LFC} + \Delta i$
Maximaler Wasserdruck				

⚠ Peut induire en erreur pour le calcul des contraintes effectives dans le sol de part et d'autre de la paroi

### 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

EPFL - LMR

Autres problèmes avérés et fréquents en pratique (A. Lutz)

- Mauvaise prise en compte et modélisation des instabilités d'origine hydraulique, en particulier le renard hydraulique
- Renoncement inapproprié à des solutions de rabattement des eaux souterraines
- Non-considération que l'écoulement de l'eau diminue la résistance passive devant les parois de soutènement

Photo Montbarbon

### Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes

EPFL - LMR

#### Modifications lors de la révision des SIA 261 et 267

1. Introduction
  - 1.1 Contexte
  - 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes
2. Modifications dans la section 4.4 de la SIA 261
  - 2.1 Facteurs influençant l'action de l'eau
  - 2.2 Méthodes envisageables pour évaluer l'action de l'eau
  - 2.3 Répartition de la pression hydraulique sur les ouvrages
3. Modifications dans la SIA 267
  - 3.1 Exigences en termes de reconnaissances
  - 3.2 Plus de cohérence dans la terminologie
  - 3.3 Chapitre 13 et Figure 10
4. Conclusions

### Reformulation assez conséquente du chiffre 4.4 de la Norme SIA 261, consacré à la pression hydraulique

EPFL - LMR

- Réécriture partielle du chiffre 4.4.1.2 précisant les facteurs influençant l'action de l'eau sur les ouvrages, en insistant sur :
  - L'agencement des couches de sol, leur épaisseur et leur perméabilité
  - L'existence possible de plusieurs nappes avec différents potentiels

### Réécriture partielle du chiffre 4.4.1.2 précisant les facteurs influençant l'action de l'eau sur les ouvrages

EPFL - LMR

- Pour déterminer les actions dues aux eaux souterraines, on prendra particulièrement en considération :
  - la stratigraphie ainsi que la perméabilité des différentes couches
  - la position des aquifères et leurs conditions de pression
  - les effets de dispositifs constructifs tels que barrières, introductions d'eau ou drainages, en tenant compte des cas extrêmes
  - Le refoulement des eaux souterraines dû à un ouvrage
  - l'accumulation d'eaux souterraines dans un remblai plus perméable que le sol de fondation en place
  - les modifications du régime des eaux souterraines consécutives au défrichage et à la réalisation de nouvelles plantations
  - les effets des influences climatiques telles que précipitations ou gel sur le régime des eaux souterraines
  - l'apport ultérieur d'eau, par exemple à la suite d'une crue, d'une inondation ou d'une rupture de conduite.

**Nouveau chiffre 4.4.1.3 énonçant les deux méthodes possibles pour prendre en compte l'action de l'eau**  
 EPFL - LMR

Figures tirées de Lambe & Whitman

**Calcul avec**

- Poids volumique saturé
- Pressions d'eau interstitielle

**Calcul avec**

- Poids volumique déjaugé (pour poussée d'Archimède)
- Force de percolation

**Nouveau chiffre 4.4.1.3 énonçant les deux méthodes possibles pour prendre en compte l'action de l'eau**  
 EPFL - LMR

- Pour éviter une confusion entre les deux méthodes envisageables pour évaluer les actions dues à l'eau...
- ...principe de calcul énoncé dans la Norme SIA 261, chapitre 4, chiffre 4.4.1.3
  - L'action de l'eau peut être prise en compte de deux manières:
    - en tant que pression d'eau (totale), en combinaison avec le poids total du sol (contraintes totales)
    - en tant que pression d'écoulement, en combinaison avec le poids déjaugé du sol (contraintes effectives).
  - Die Wirkung des Wassers kann auf zwei Arten berücksichtigt werden:
    - als Gesamtwasserdruck in Kombination mit der totalen Raumlast des Bodens (totale Spannungen)
    - als Strömungsdruck in Kombination mit der Raumlast des Bodens unter Auftrieb (effektive Spannungen)

**Modifications apportées au chiffre 4.4.3 traitant de la répartition de la pression hydraulique sur des ouvrages**  
 EPFL - LMR

- Mention de l'importance de l'agencement des couches et du caractère anisotrope de la perméabilité dans l'estimation de la pression hydraulique (chiffre 4.4.3.1)
  - L'hétérogénéité et l'anisotropie ( $k_h > k_v$ ) des couches ainsi que la stratification du terrain influencent les pressions hydrauliques dans le sol...
- Mention que les divers cas présentés au tableau 3 sont des distributions simplifiées correspondant à des situations particulières (chiffre 4.4.3.2)
  - La répartition de la pression hydraulique sera déterminée en tenant compte des indications du chiffre 4.4.1.2. Dans les cas idéalisés décrits dans le tableau 3, on peut appliquer la répartition simplifiée de la pression hydraulique qui correspond à la situation considérée.
- Suppression de la pression hydraulique résultante (ancien chiffre 4.4.3.3)

**Tableau 3 de la SIA 261:2014 Répartitions simplifiées de la pression hydraulique**  
 EPFL - LMR

Modifications apportées :

- Les hypothèses des divers cas sont précisées ;
- Le caractère idéalisé de l'écoulement et de la répartition de la pression hydraulique est mentionné ;
- Les pressions hydrauliques sur la paroi sont celles qui agissent de part et d'autre de celle-ci ;
- Le niveau d'eau à l'intérieur de la fouille ne coïncide plus avec le niveau du fond de fouille ;
- Le cas 4 relatif à un sol homogène et isotrope est indiqué comme rare.

*Il est bon de rappeler ici que l'idéalisation considérée pour les pressions s'exerçant sur l'écran dans le cas 4 n'est pas du côté de la sécurité.*

**Tableau 3 de la SIA 261:2014 Répartitions simplifiées de la pression hydraulique**  
 EPFL - LMR

Cas	1	2	3	4
Ouvrage	Bâtiment dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique
Sol de fondation	Quelconque	Pied de paroi encastré dans une couche imperméable de grande épaisseur	Homogène et anisotrope ( $k_h > k_v$ ) ou hétérogène avec une couche perméable au pied de la paroi	Homogène et isotrope (cas rare)
Écoulement idéalisé	Pas d'écoulement	Pas d'écoulement dans la couche perméable: $i = 0$ Écoulement dans la couche imperméable située au pied de paroi.	Perte de charge uniquement à l'intérieur de la fouille: $i = (h_w + h_{w1}) / (t - h_{w1})$	Perte de charge constante le long des deux faces de la paroi: $i = (h_w + h_{w1}) / (h_w + 2t - h_{w1})$
Répartition idéalisée de la pression hydraulique				
Pression hydraulique maximale	$w_{s,0} = \gamma_{sat} h_w$	$w_{s,0} = \gamma_{sat} (t - h_{w1})$ $w_{s,p} = \gamma_{sat} (h_w + t)$	$w_{s,p} = \gamma_{sat} (h_w + t)$	$w_{s,p} = (1 + i) \gamma_{sat} (t - h_{w1})$

**Tableau 3 de la SIA 261:2014 Répartitions simplifiées de la pression hydraulique**  
 EPFL - LMR

Diverses répartitions simplifiées de la pression hydraulique considérées dans le tableau 3 de la SIA 261

Paroi fichée dans une couche peu perméable: Pas d'écoulement

Terrain homogène et anisotrope ( $k_h \gg k_v$ ) ou paroi fichée dans une couche perméable: Perte de charge uniquement à l'intérieur de la fouille

Terrain homogène et isotrope: Perte de charge constante le long de la paroi

$w_{k,0} = \gamma_{wk} \cdot (t - h_{w1})$   
 $w_{k,0//} = \gamma_{wk} \cdot (h_w + t)$

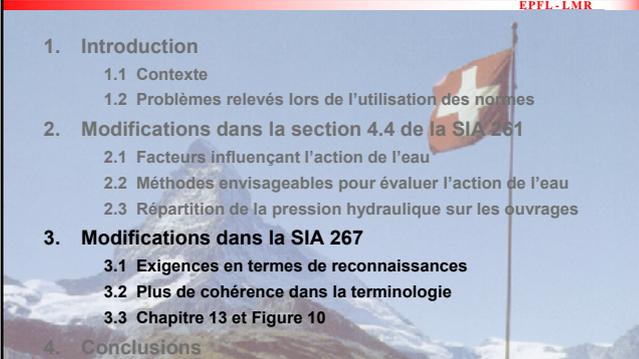
$i = \frac{h_w + h_{w1}}{t - h_{w1}}$   
 $w_{k,0//} = \gamma_{wk} \cdot (h_w + t)$

$i = \frac{h_w + h_{w1}}{h_w + 2t - h_{w1}}$   
 $w_{k,0///} = (1 + i) \cdot \gamma_{wk} \cdot (t - h_{w1})$

### Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes Modifications lors de la révision des SIA 261 et 267

EPFL - LMR

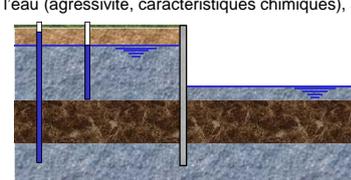
1. Introduction
  - 1.1 Contexte
  - 1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes
2. Modifications dans la section 4.4 de la SIA 261
  - 2.1 Facteurs influençant l'action de l'eau
  - 2.2 Méthodes envisageables pour évaluer l'action de l'eau
  - 2.3 Répartition de la pression hydraulique sur les ouvrages
3. Modifications dans la SIA 267
  - 3.1 Exigences en termes de reconnaissances
  - 3.2 Plus de cohérence dans la terminologie
  - 3.3 Chapitre 13 et Figure 10
4. Conclusions



### Nouvelle section intitulée : Eau dans le terrain de fondation (Chiffre 3.4)

EPFL - LMR

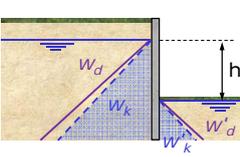
- Spécifie les exigences en termes de reconnaissances/essais :
  - Description des nappes aquifères et des conditions de pression
  - Description des écoulements (direction et gradient)
  - Exploitabilité des nappes souterraines
  - Possibles modifications de pressions interstitielles (causes naturelles ou anthropiques)
  - Qualité de l'eau (agressivité, caractéristiques chimiques), au besoin



### Plus de cohérence dans la terminologie utilisée

EPFL - LMR

- Correction de terminologie dans la version française:
  - Pression hydrostatique (2003) → Pression hydraulique (2013)
- La pression d'eau n'est plus utilisée et représentée comme une pression résultante, e.g. :
  - Tableau 3 de la SIA 261:2014
  - Figure 9 (anc. Figure 10) de la SIA 267:2013



Exemple de diagramme de la pression hydraulique  
 Hyp. : fiche dans un horizon imperméable ( $i = 0$ )

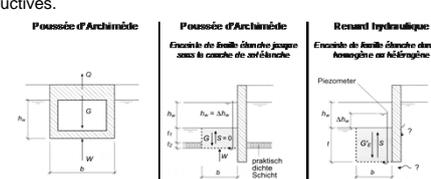
- Valeurs de calcul de la pression hydraulique:
  - à gauche:  $W_d = \gamma_F W_k$
  - à droite:  $W'_d = \gamma'_F W'_k$
- Les mêmes facteurs de charge  $\gamma_F$  doivent être utilisés des deux côtés de la paroi.

### Principales modifications au chapitre 13 de la SIA 267

EPFL - LMR

#### 13.2 Principes

- La connaissance de l'eau souterraine et des conditions d'écoulement est une condition préalable pour l'évaluation correcte des états de contraintes dans le terrain de fondation.
- Le soulèvement d'un ouvrage ou d'une couche de terrain sous l'effet de la poussée d'Archimède et la remontée du sol sous l'effet de la force d'écoulement seront évités à l'aide de mesures hydrologiques et/ou constructives.



### Principales modifications au chapitre 13 de la SIA 267

EPFL - LMR

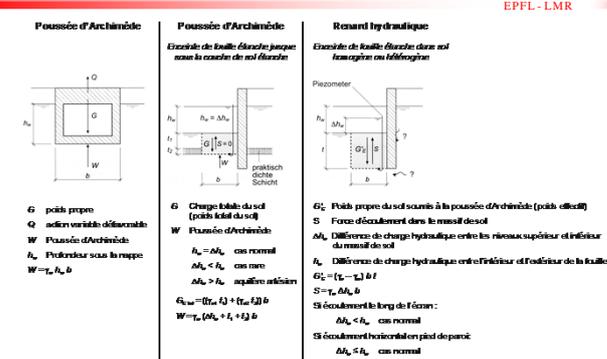
#### 13.4 Analyse

- Lorsque le terrain est stratifié ou non homogène, il faut considérer que la réduction de la pression a lieu principalement dans les couches ou niveaux intraformationnels présentant la perméabilité la plus faible. La réduction de la pression dans les couches plus perméables peut en général être négligée.
- Si la position, l'épaisseur et la géométrie des couches et niveaux intraformationnels de faible perméabilité ne peuvent être déterminées avec suffisamment de fiabilité, il faudra généralement prendre des mesures constructives (par exemple, décompression). Les couches proches de la surface sont particulièrement critiques.
- Les différentes perméabilités, transversalement et parallèlement aux couches, doivent être prises en compte dans la modélisation.

L'utilisation d'un rabattement de la nappe pour réduire les dangers était déjà mentionné dans l'article 13.6.3 de la SIA 267:2003 : *Il est généralement possible d'éviter des ruptures de fond et des renards hydrauliques en décompressant la nappe phréatique au moyen de puits filtrants ou de wellpoints.*

### Nouvelle figure 10 dans le chapitre 13 de la SIA 267

EPFL - LMR



**G** poids propre  
**Q** action variable déformable  
**W** Poussée d'Archimède  
 $h_u$  Profondeur sous la nappe  
 $W = \gamma_w A_u b$

**G** Charge totale du sol (poids total du sol)  
**W** Poussée d'Archimède  
 $h_u = A_u$  cas normal  
 $A_u < h_u$  cas rare  
 $A_u > h_u$  aquifère artésien  
 $G_u = (G_u + Q_u) b$   
 $W = \gamma_w (A_u + i_u + f_u) b$

**G<sub>u</sub>** Poids propre du sol soumis à la poussée d'Archimède (poids effectif)  
**S** Force d'écoulement dans le massif de sol  
 $\Delta h_u$  Différence de charge hydraulique entre les niveaux supérieur et inférieur du massif de sol  
 $G'_u = (G'_u + Q'_u) b$   
 $S = \tau_w A_u b$   
**S1** Écoulement le long de l'écran :  
 $A_u < h_u$  cas normal  
 $A_u \leq h_u$  cas normal  
 $A_u > h_u$  cas aquifère artésien

