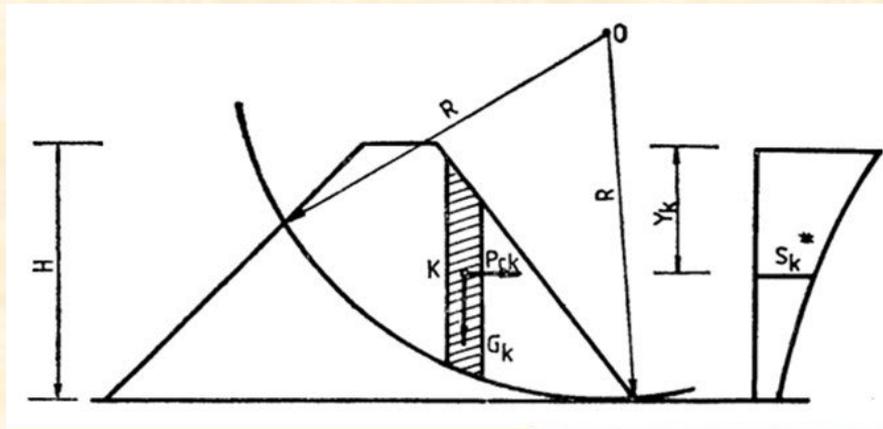


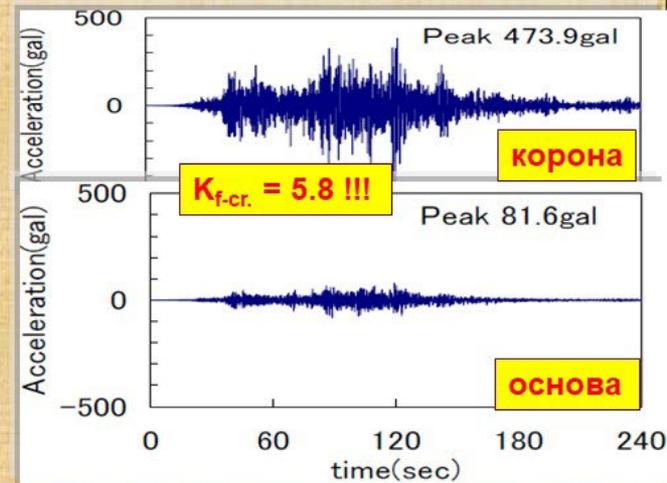
СЕИЗМИЧЕН АНАЛИЗ НА НАСИПНИ ЯЗОВИРНИ СТЕНИ



$$P_{ck} = G_k S_k^*$$

$$S_k^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ik}^*)^2}$$

$$S_{ik}^* = f(PGA, T_i, \eta_{ik})$$



Проф. д-р инж. ВАНГЕЛ ВАСИЛЕВ

СЕИЗМИЧЕН АНАЛИЗ НА НАСИПНИ ЯЗОВИРНИ СТЕНИ ПРИ ЗЕМЕТРЪС

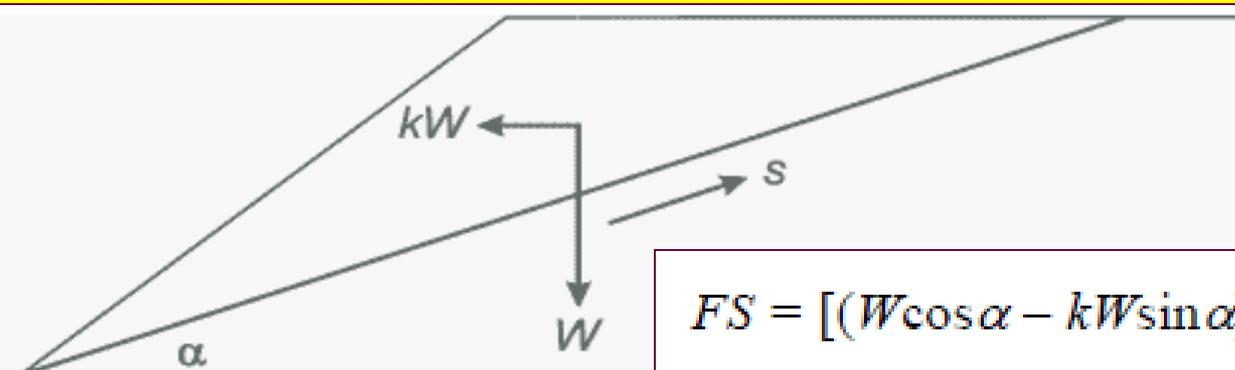
- I. Методи за анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс**
- II. Мерки за повишаване на сеизмичната устойчивост на насипните стени**
- III. Основни изводи и препоръки за практиката**

I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

- 1. ПСЕВДОСТАТИЧЕН АНАЛИЗ (Pseudo-static analysis).**
- 2. ПСЕВДОДИНАМИЧЕН АНАЛИЗ (Pseudo-dynamic analysis).**
- 3. АНАЛИЗ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ДЕФОРМАЦИИТЕ (Stress-deformation analysis).**
- 4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ(невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis).**

I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

1. ПСЕВДОСТАТИЧЕН АНАЛИЗ (Pseudostatic analysis)



$$k = a_h/g$$

$$FS = [(W \cos \alpha - kW \sin \alpha) \tan \phi] / (W \sin \alpha + kW \cos \alpha)$$

Investigator	Recommended pseudostatic coefficient (k)	Recommended (FS)	Calibration conditions
Terzhagi (1950)	0.1 (R-F = IX) 0.2 (R-F = X) 0.5 (R-F > X)	> 1.0	Unspecified
Seed (1979)	0.10 (M = 6.50) 0.15 (M = 8.25)	> 1.15	< 1 m displacement in earth dams
Marcuson (1981)	$0.33-0.50 \times \text{PGA}/g$	> 1.0	Unspecified
Hynes-Griffin and Franklin (1984)	$0.50 \times \text{PGA}/g$	> 1.0	< 1 m displacement in earth dams
California Division of Mines and Geology (1997)	0.15	> 1.1	Unspecified; probably based on < 1 m displacement in dams

I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

1. ПСЕВДОСТАТИЧЕН АНАЛИЗ (Pseudostatic analysis) (2-2)

Избор на k : $k = \text{const. ?}$
 $k = f(H) ?$

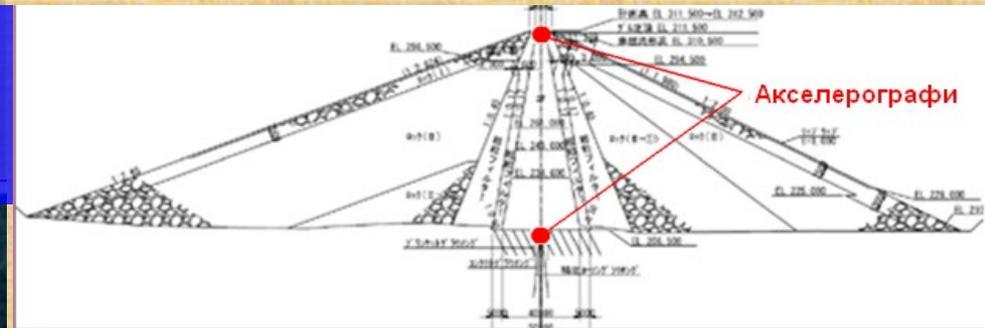


SURIKAMIGAVA Dam-Япония

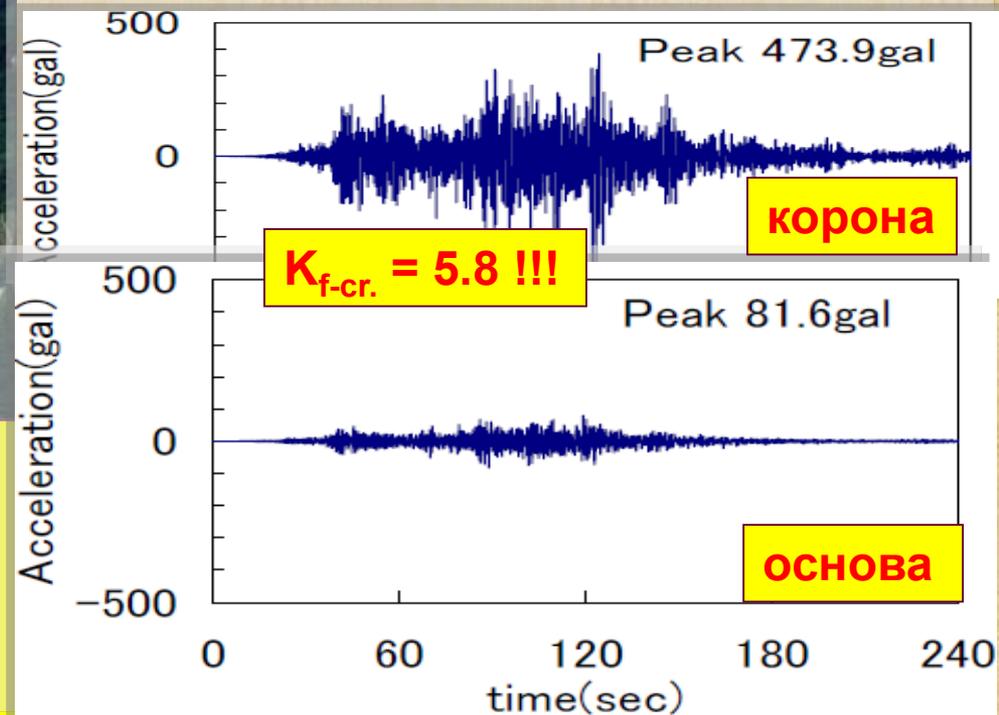
RFD, $H=52.5\text{m}$ (2006г.), Tohoku EQ, 2011

$L_f=80\text{km}$, $M=9.0$, $PHGA\sim 0.09\text{g}$,

Незначителни повреди.

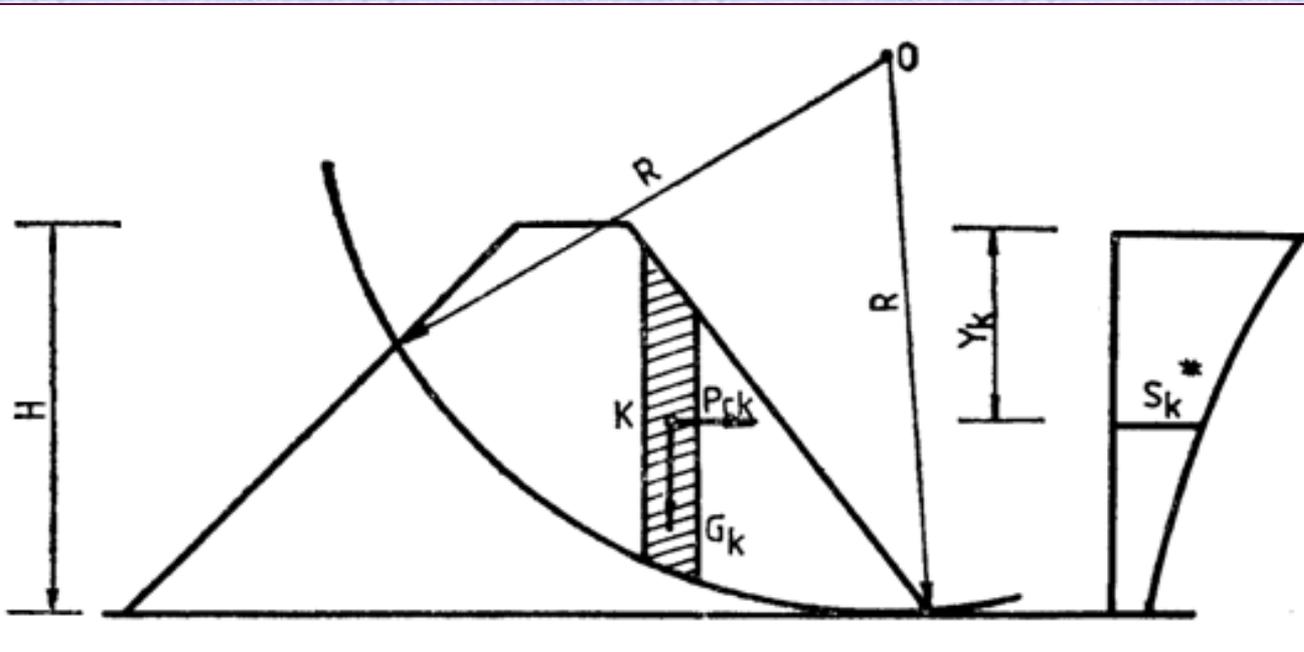


Акселерографи



I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

2. ПСЕВДОДИНАМИЧЕН АНАЛИЗ (Pseudo-dynamic analysis)



$$P_{ck} = G_k S_k^*$$

$$S_k^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ik}^*)^2}$$

$$S_{ik}^* = f(PGA, T_i, \eta_{ik})$$

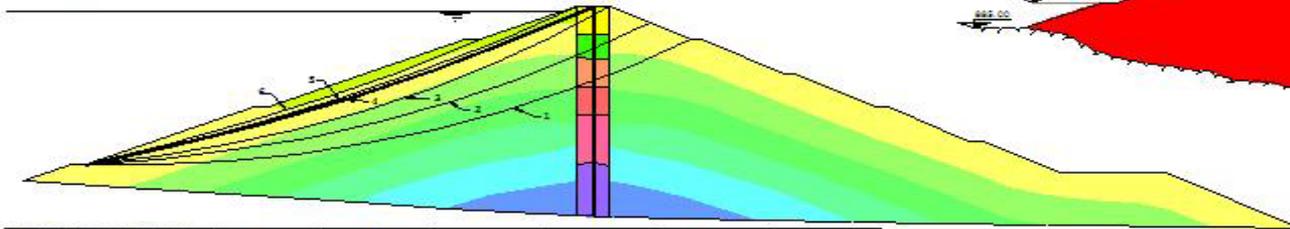
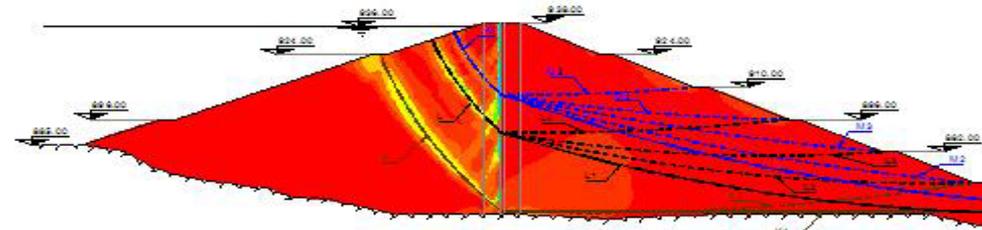
I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

3. АНАЛИЗ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ДЕФОРМАЦИИТЕ (Stress-deformation analysis - FEM, BEM, FDM) - 1

Яз. стена "РАКОЧЕВИЦА"

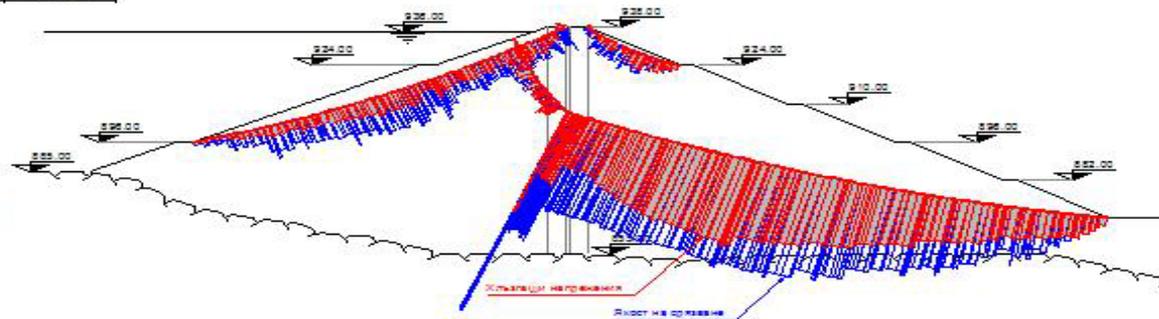
Global Stability Analysis of the Dam

Safety Factor for the Up-stream Slope



Класификация построяния Тягло на сл. окло, MP	Ф-1	Ф-2	Ф-3	Ф-4	Ф-5	Ф-6
Особено състояние	1.3476 1.2475 1.1042	1.4228 1.3219 1.1809	1.1491 1.1490 1.0744	1.1179 1.1180 1.0105	1.1225 1.1217 1.0082	1.1225 1.1228 1.0048
Особено състояние А	1.4428 1.4428 1.3553	1.2919 1.2913 1.1924	1.1409 1.1401 1.0470	1.1228 1.1222 1.0423	1.1243 1.1234 1.0705	1.1250 1.1248 1.0449
Особено състояние Б	1.2701 1.1705	1.1347 1.1040	1.0271 0.9259	0.9941 0.9440	1.0029 0.9443	1.0142 0.9552
Ср. критично усилване	0.3423 g	0.3324 g	0.2404 g	0.2441 g	0.2474 g	0.2444 g

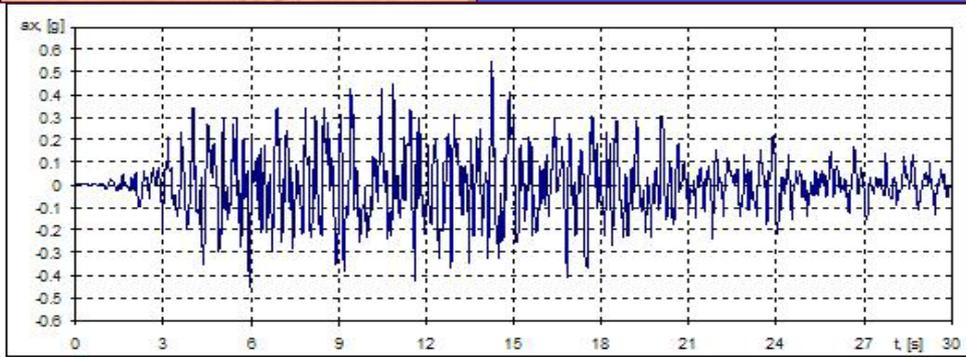
Slope Stability Analysis by FEM



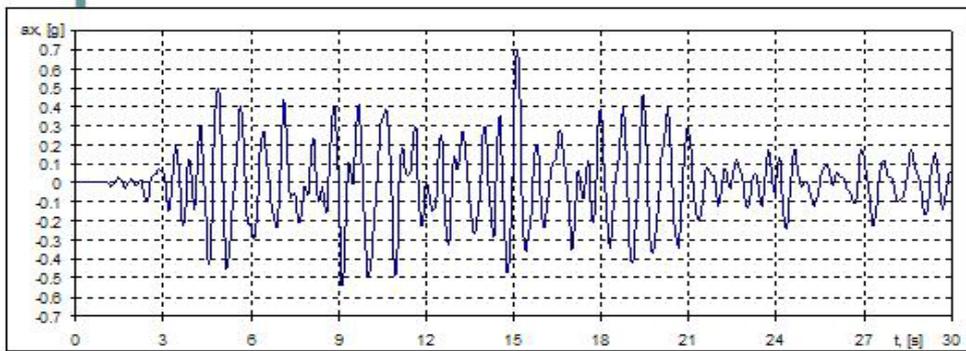
I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

3. АНАЛИЗ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ДЕФОРМАЦИИТЕ (Stress-deformation analysis - FEM, BEM, FDM) - 2

Яз. стена "РАКОЧЕВИЦА"

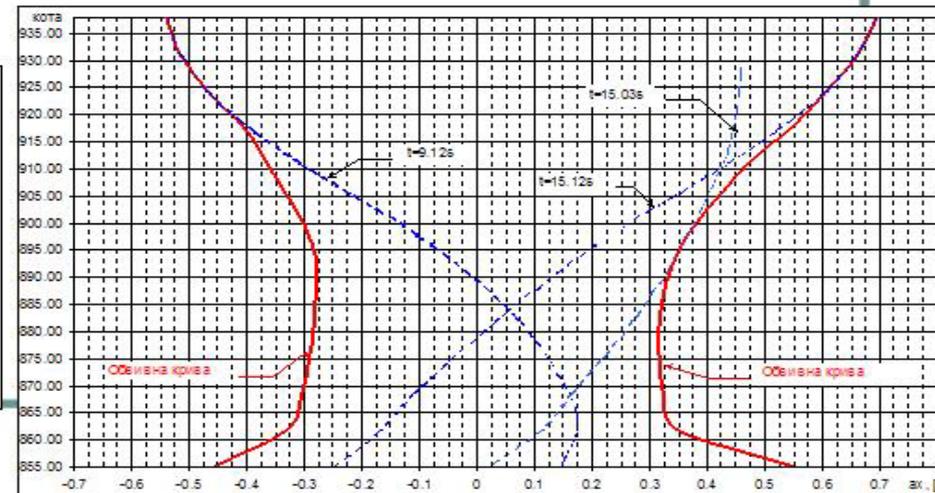


Accelerogram in the base of the dam



Acceleration on the crown of the dam

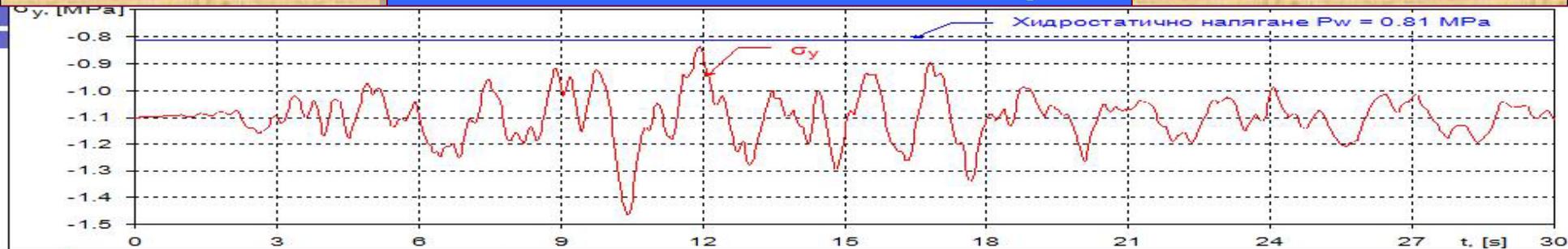
Accelerations on the height of the dam for R=10000 years.



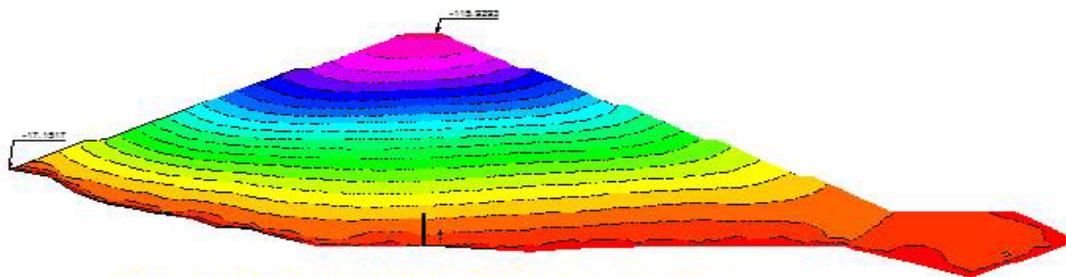
I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

3. АНАЛИЗ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ДЕФОРМАЦИИТЕ (Stress-deformation analysis - FEM, BEM, FDM) - 3

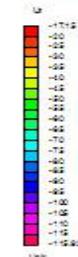
Яз. стена "РАКОЧЕВИЦА"



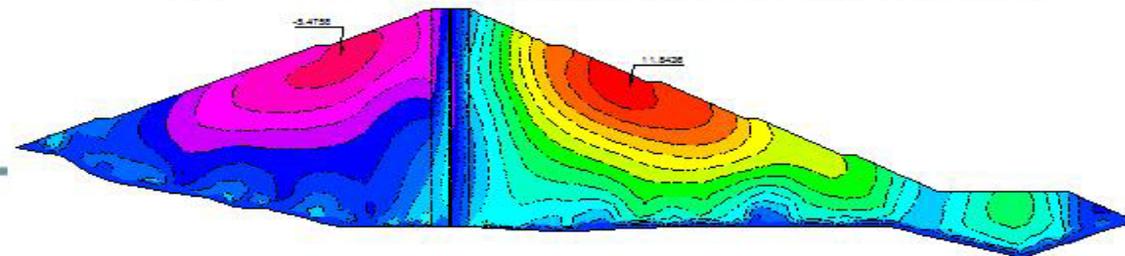
Vertical stress in the contact diaphragm-foundation. Comparison with the hydrostatic pressure



Seismic horizontal displacements



Seismic vertical displacements



I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ (невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis) - 1

4.1 Опростени методи: Newmark method (1965);
Makdisi and Seed (1978);
Jibson (2007);
Bray and Travasarou (2007).

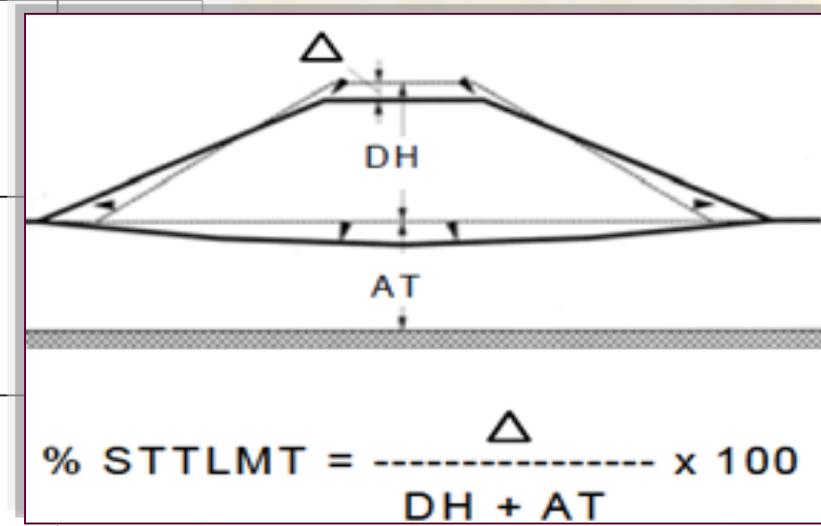
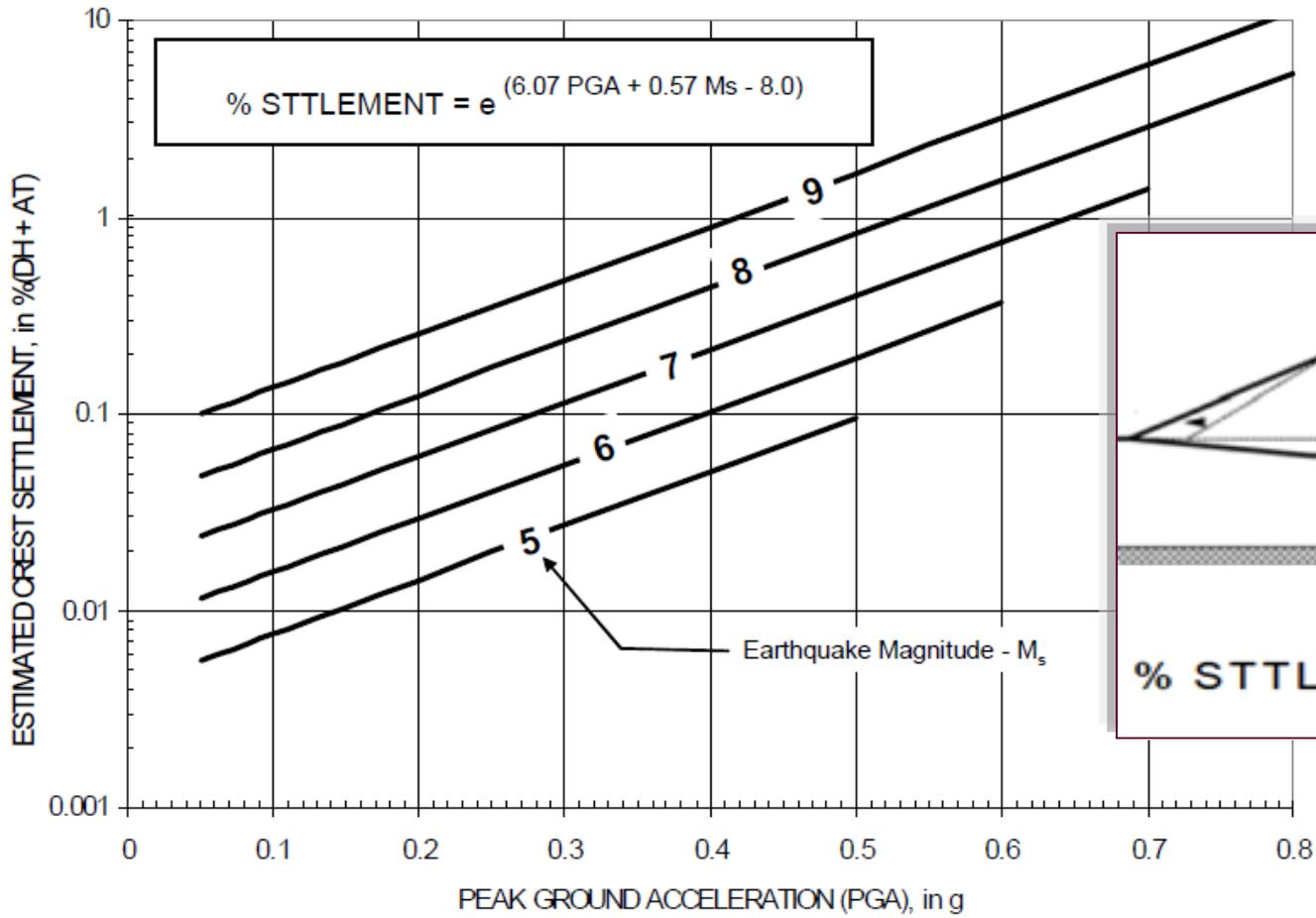
► Jibson (2007): $\log D_n = - 2.710 + \log [(1 - a_c / a_{max})^{2.335} \times$
 $\times (a_c / a_{max})^{-1.478}] + 0.424 M$

► Bray and Travasarou (2007): $\ln D = -1.10 - 2.83 \ln (k_y) -$
 $- 0.333 (\ln (k_y))^2 + 0.566 \ln (k_y) \ln (S_a (1.5 T_s)) +$
 $+ 3.04 \ln (S_a (1.5 T_s)) - 0.244 (\ln (S_a (1.5 T_s)))^2 +$
 $+ 1.50 T_s + 0.278 (M - 7) \quad \text{при } T_s = 0.05 \text{ to } 2s$

I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ(невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis) - 2

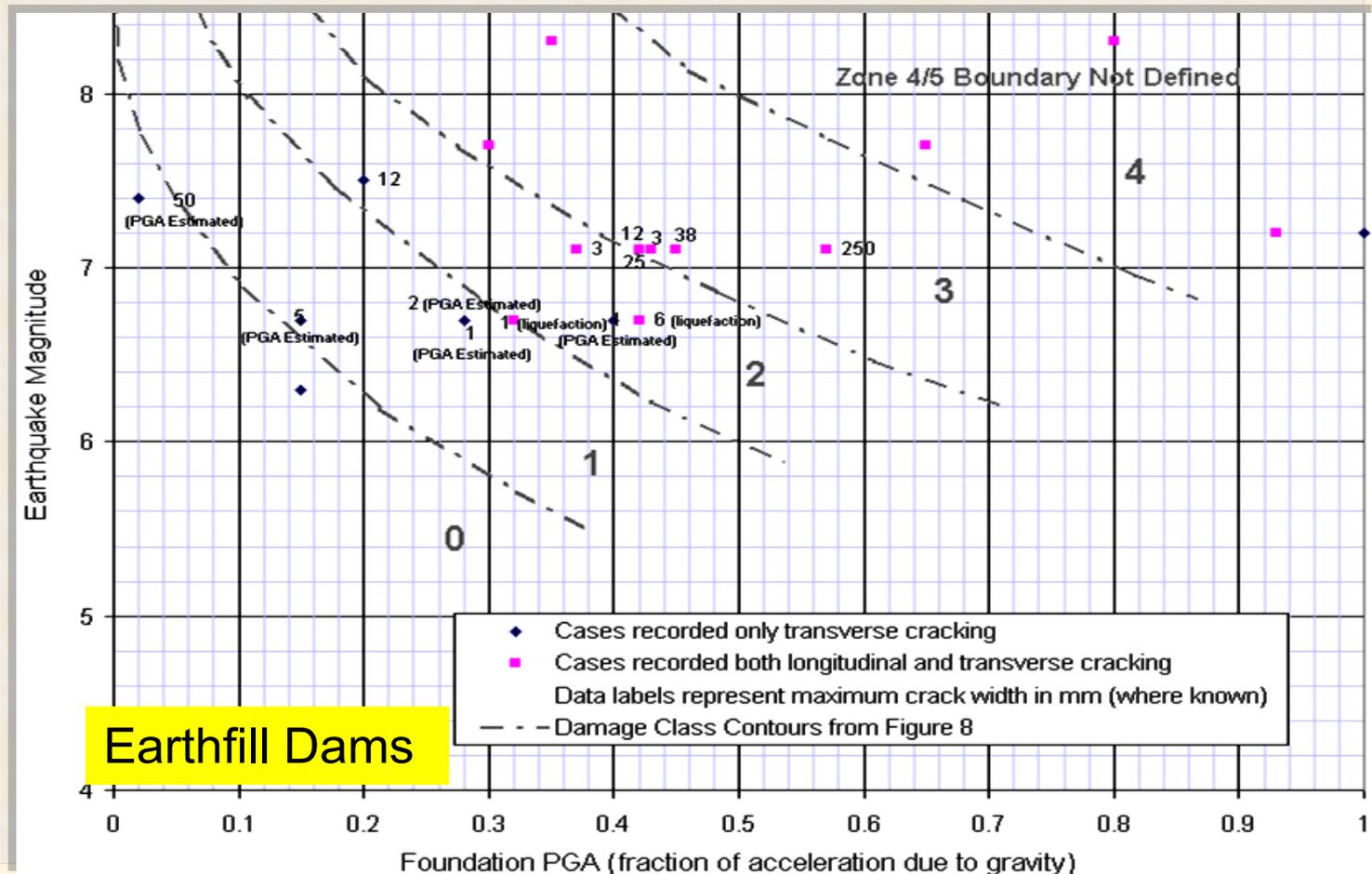
4.2 Емпирични методи: Swaisgood (1998, 2003, 2014)



I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ (невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis) - 3

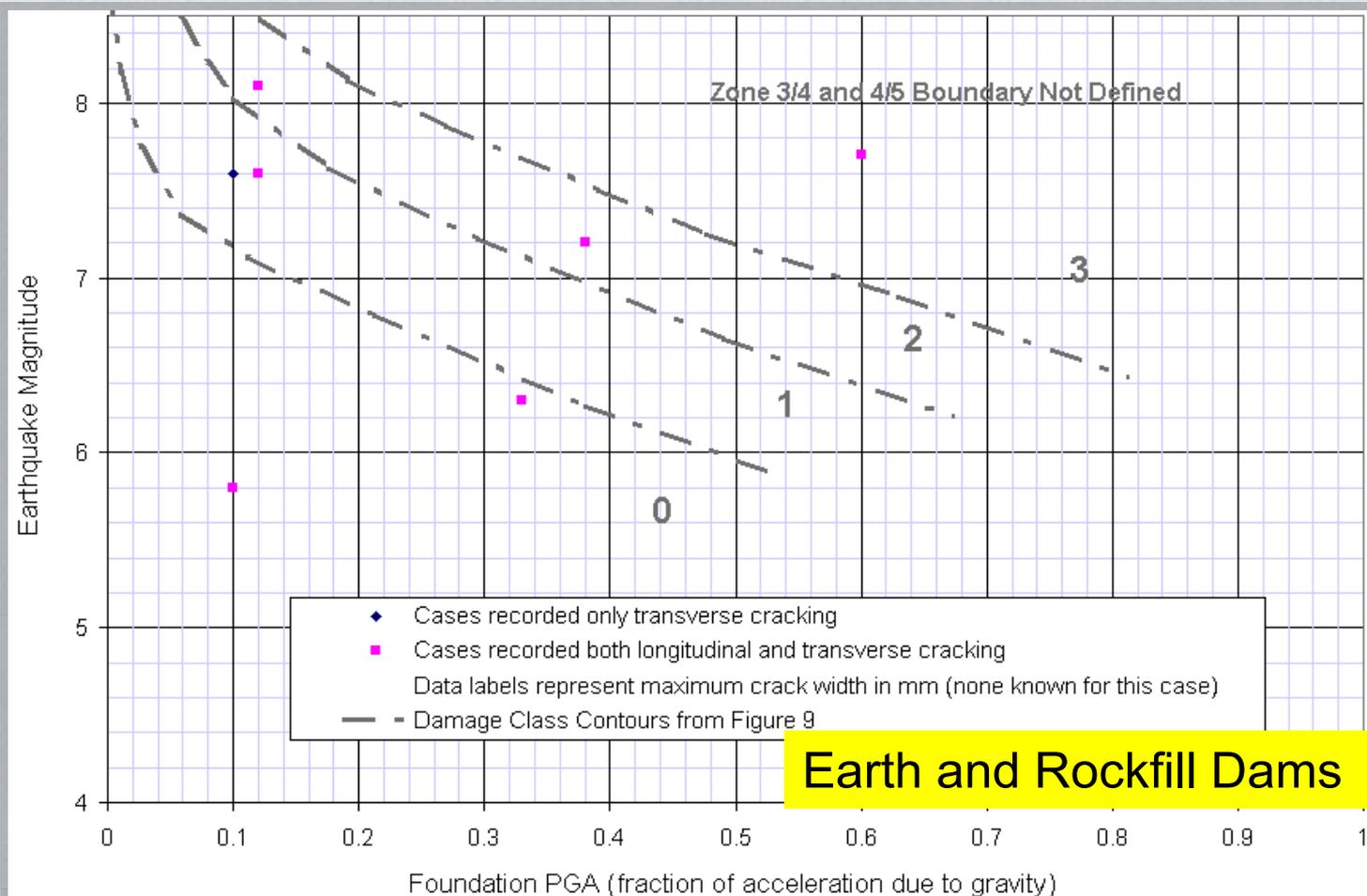
4.2 Емпирични методи: Pells and Fell (2003, 2015)



I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ(невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis) - 4

4.2 Емпирични методи: Pells and Fell (2003, 2015)



I. Методи на анализ и прогноза на поведението на насипни стени при земетръс

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОСТОЯННИТЕ (невъзвратими) ПРЕМЕСТВАНИЯ (Permanent- displacement analysis) - 5

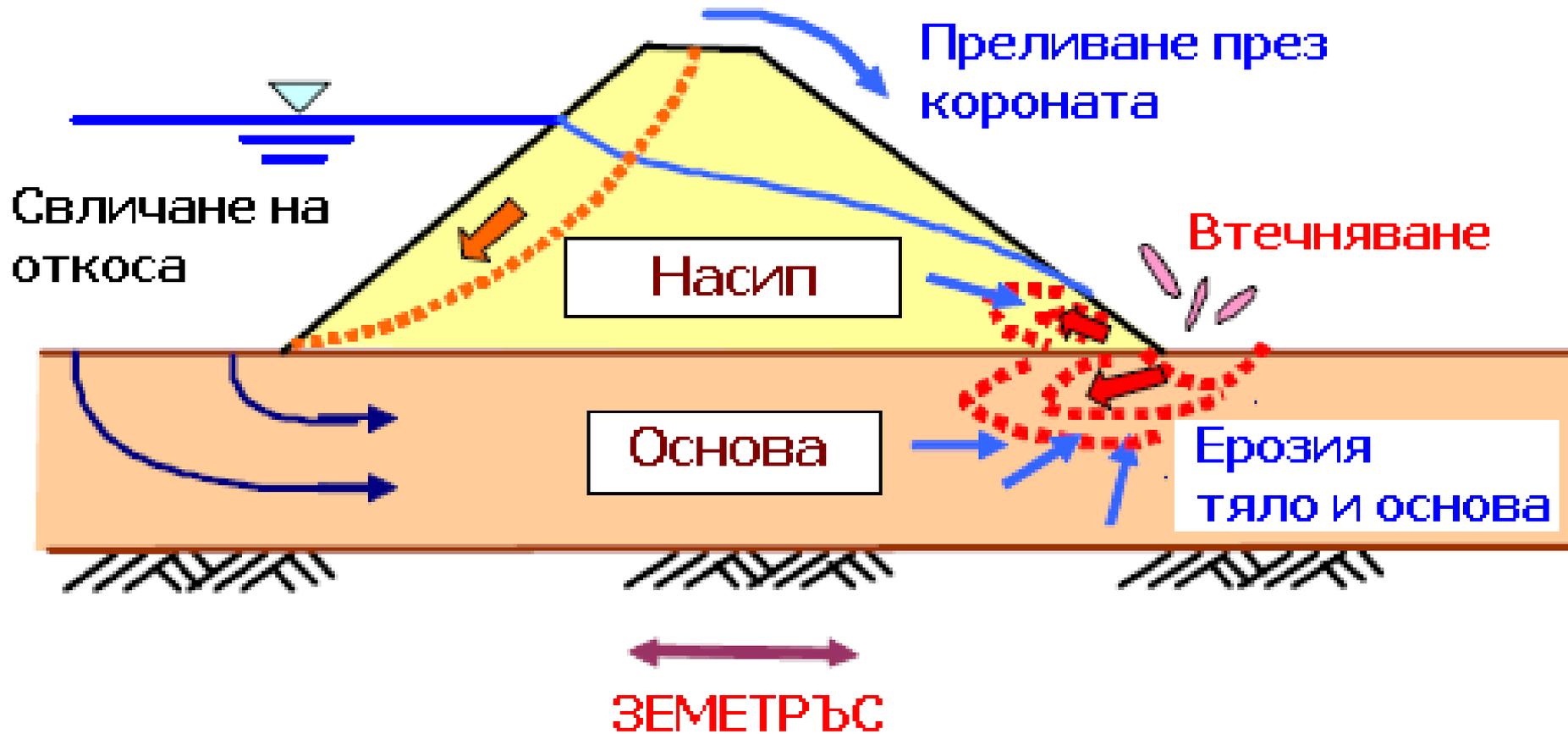
4.2 Емпирични методи: Pells and Fell (2003, 2015)

Damage Class		Maximum Longitudinal Crack Width ⁽¹⁾ (mm)	Maximum Relative Crest Settlement ⁽²⁾ (percent)
Number	Description		
0	No or Slight	< 10	< 0.03
1	Minor	10 to 30	0.03 to 0.2
2	Moderate	30 to 80	0.2 to 0.5
3	Major	80 to 150	0.5 to 1.5
4	Severe	150 to 500	1.5 to 5
5	Collapse	> 500	> 5

Notes: (1) Maximum likely crack width is taken as the maximum width of any longitudinal crack that occurs.
 (2) Maximum relative crest settlement is expressed as a percentage of the structural height.

Damage Class		Probability of Transverse Cracking	Maximum Likely Crack Width at the Crest (mm)
Number	Description		
0	No or Slight	0.001 to 0.01	5 to 20
1	Minor	0.01 to 0.05	20 to 50
2	Moderate	0.05 to 0.10	50 to 75
3	Major	0.2 to 0.25	100 to 125
4	Severe	0.5 to 0.6	150 to 175

II. Мерки за повишаване на сеизмичната устойчивост на насипните стени



II. Мерки за повишаване на сеизмичната устойчивост на насипните стени

Конструктивни мерки:

- Укрепване на откосите с материал с голяма якост на срязване;
- По-полегати откоси във връхната част на стената;
- Уширяване на короната;
- Укрепване на основата в петите на откосите;
- Контрафорси в тялото на стената и основата от едрозърнест материал или баластра;
- Хоризонтални антисеизмични пояси от едрозърнест материал;
- Подмяна на части от тялото на язовирните стени;

II. Мерки за повишаване на сеизмичната устойчивост на насипните стени

Конструктивни мерки:

- **Повишаване на запаса от НВН до кота корона;**
- **Стопери на пукнатини и филтри против вътрешна ерозия;**
- **Подходящо разположени дренажи с оглед понижаване на депресионната линия;**
- **Допълнително уплътнение на части от стената и основата;**
- **Инжекции в контактните зони на насипа с бетонови конструкции и основата;**
- **Адекватно оразмеряване на преливно-изпускателната система.**

II. Мерки за повишаване на сеизмичната устойчивост на насипните стени

Неконструктивни мерки:

- Временно ограничение на водното ниво в язовира;
- Постоянно ограничение на водното ниво в язовира;
- Изграждане на системи за ранно предупреждение;
- Актуализиране на аварийните планове;
- Временна или постоянна евакуация на хора;
- Инспекция след земетръс (USSD Guidelines, 2003):

$M \geq 4.0$, $R=40\text{km}$;

$M \geq 5.0$, $R=80\text{km}$;

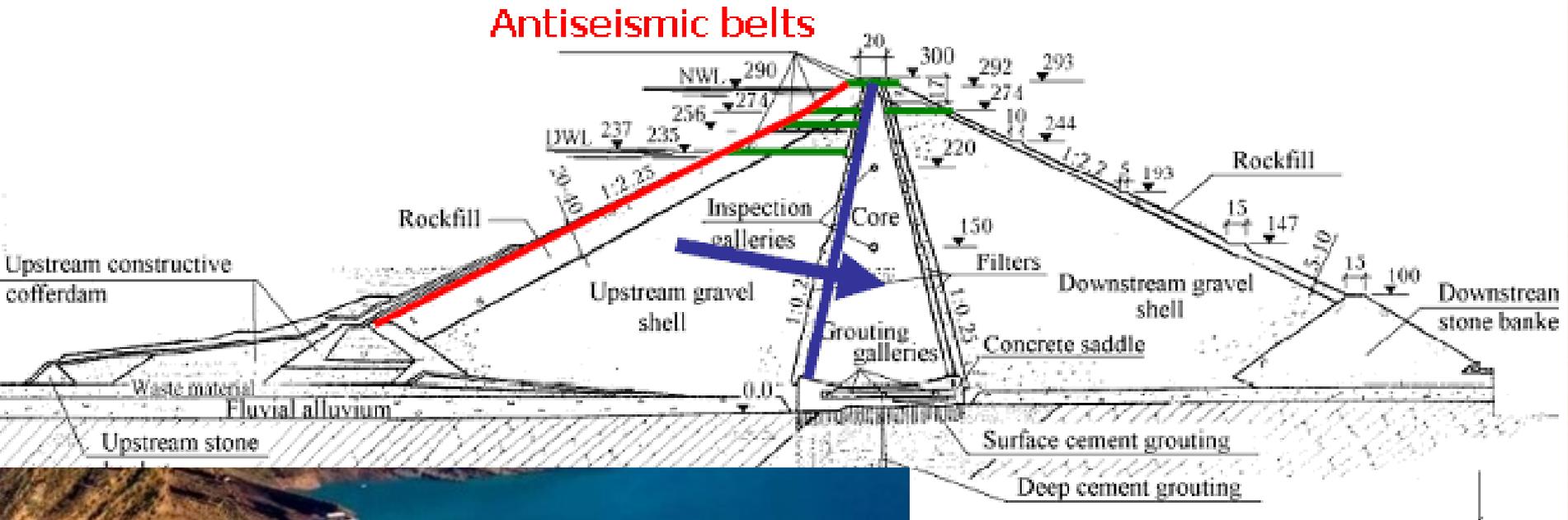
$M \geq 6.0$, $R=120\text{km}$;

$M \geq 7.0$, $R=200\text{km}$;

$M \geq 8.0$, $R=320\text{km}$ (незабавна инспекция).

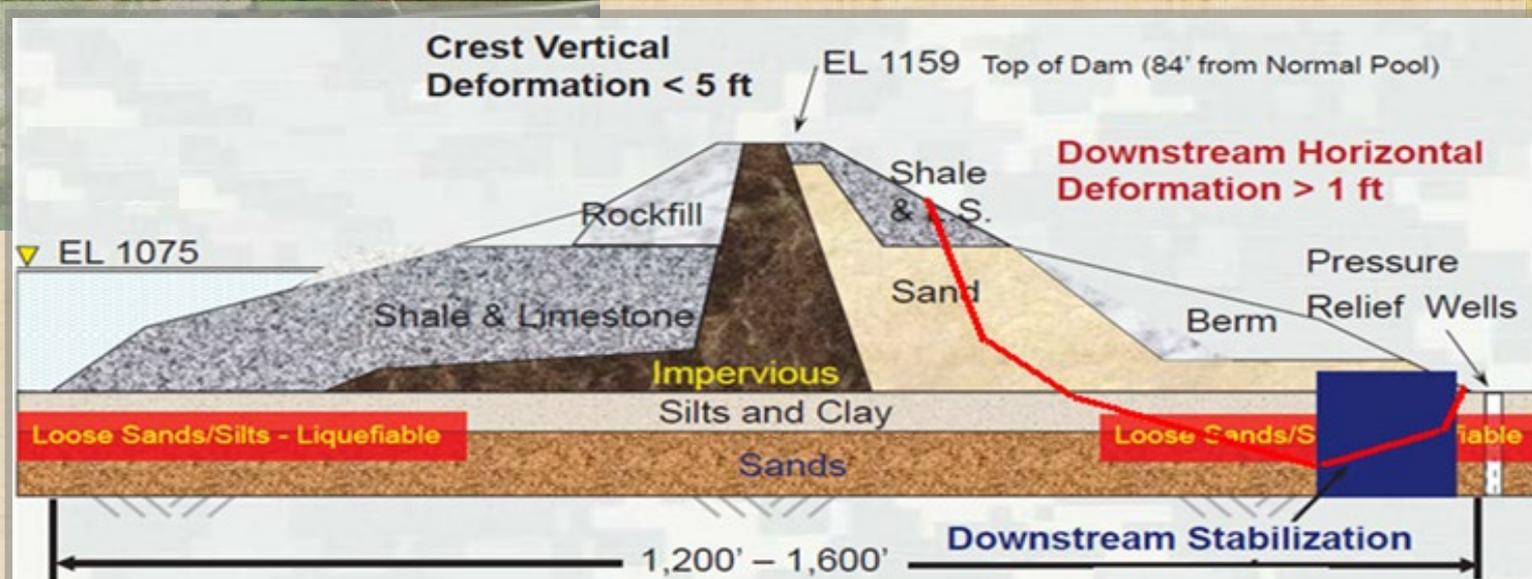
II. МЕРКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА НАСИПНИТЕ СТЕНИ

► Антисеизмични пояси – яз. стена Нурек (300m)



II. МЕРКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА НАСИПНИТЕ СТЕНИ

► Бентонитова стена, възд. откос – Tuttle Creek Dam(43m)



II. МЕРКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА НАСИПНИТЕ СТЕНИ



► Възстановяване
на короната

► Повишаване на
запаса с парапет



II. МЕРКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА НАСИПНИТЕ СТЕНИ

▶ Третиране на надлъжни пукнатини

▶ Рехабилитация на короната



III. Основни изводи и препоръки за практиката

III. 1 ОБЩИ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

- Основни сеизмични повреди: напукване, странично разширение, слягане на короната;
- Общо взето насипните язовирни стени понасят добре земетръс;
- Напуквания в областта на короната и стената не водят непременно до разрушение;
- Значително увеличение на ускорението по височина от основата към короната на стената;
- Язовир с голям обем или висок напор пред стената може да доведе до RTS.

III. Основни изводи и препоръки за практиката

III.2 ЕКСПЕРТНИ КОЛИЧЕСТВЕНИ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

► Кога(кои) насипни стени са УЯЗВИМИ при земетръс?

- Стени с елементи или основа от водонаситени пясъкливи почви
- Стени от насип чрез хидравлично намиване
- Стени от недобре уплътнени насипи
- Земнонасипни стени с $H \leq 30m$
- Стени с малък запас над кота НВРВН
- Стръмни откоси във връхната част на стената
- Тънки ядра и тънки филтърни зони
- Тектонски разлом в обсега на стената.

III. Основни изводи и препоръки за практиката

III.2 ЕКСПЕРТНИ КОЛИЧЕСТВЕНИ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

► Кога(кои) насипни стени са УСТОЙЧИВИ при земетръс?

- Добре уплътнени, без втечняващи се почви в тялото и основата
- Основата е от глинести почви или скала ($M = 6.0-8.0$, $PHGA=0.30g-0.80g$)
- $PHGA \leq 0.15g$ за земнонасипни стени и $\leq 0.30g$ за каменонасипни стени
- $K_{static} \geq 1.5$ за всички хлъзг. повърхнини
- Запасът е равен на 3-5% от H стена.

► Кои методи за анализ са най-подходящи?

III. Основни изводи и препоръки за практиката

III.3 ОТНОСНО ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА НАСИПНИТЕ ЯЗОВИРНИ СТЕНИ В БЪЛГАРИЯ В БЪДЕЩЕ

- **Нива на сеизмичност и нормативна база в РБ**
- **Необходимост от текуща оценка на сеизмичния риск за язовирните стени поради:**
 - **актуализиране на сеизмичния hazard;**
 - **промени в стените вследствие минали земетресения;**
 - **развитие на критериите при асеизмично проектиране;**
 - **нарастване на сеизмичния риск във времето;**
 - **евентуална деградация на материалите на**

Исползвана литература

USSD, Observed Performance of Dams During Earthquakes, USSD, 2014.

Jibson, Methods for assessing the stability of slopes during earthquake, 2011.

BRAY, J. D., Seismic Performance Considerations for Dams and Reservoirs, 2012.

R. Singh and D. Roy, Estimation of Earthquake-Induced Crest Settlements of Embankments, American J. of Engineering and Applied Sciences 2 (3), 2009.

USBR, 2012, Methods to Evaluate Seismic Risks for Embankments.

NARITA, K. (2000), Design and Construction of Embankment Dams Dept. of Civil Eng., Aich. Inst. of Technology.

Yamaguchi et al., Safety inspections and seismic behavior of embankment dams during 2011 Tohoku, EQ, Soil and foundations, 2012, 52(5).

Tani, Shigeru. 2000, Earthquake Damage to Fill Dams in Japan, JARQ 34, 39-48(2000).

Francke C. Walberg, CASE STUDY- SEISMIC RETROFIT OF TUTTLE CREEK DAM, 2012

Swaigood, J. Embankment dam deformations caused by earthquakes, *Proc., 2003 Pacific Conf. on EQ Eng., New Zealand.*

USACE, Seismic Risks for Embankments , 2015.

Wieland, M., Chen Houqun, Lessons learnt from the Wenchuan earthquake, International Water Power, 2009.

Wieland, M. (2011), Seismic Aspects of Large Dams, Poyry PPT.

Wieland, M. (2014) "Seismic hazard and seismic design and safety aspects of large dam projects", *Proc. Second European Conf. and Earthquake Engng, Istanbul, Turkey, 2014.*

Wieland, M. (2009) CONCRETE FACE ROCKFILL DAMS IN HIGHLY SEISMIC REGIONS.

R. Singh and D. Roy. (2009), Estimation of Earthquake-Induced Crest Settlements of Embankments, American J. of Engineering and Applied Sciences 2 (3).