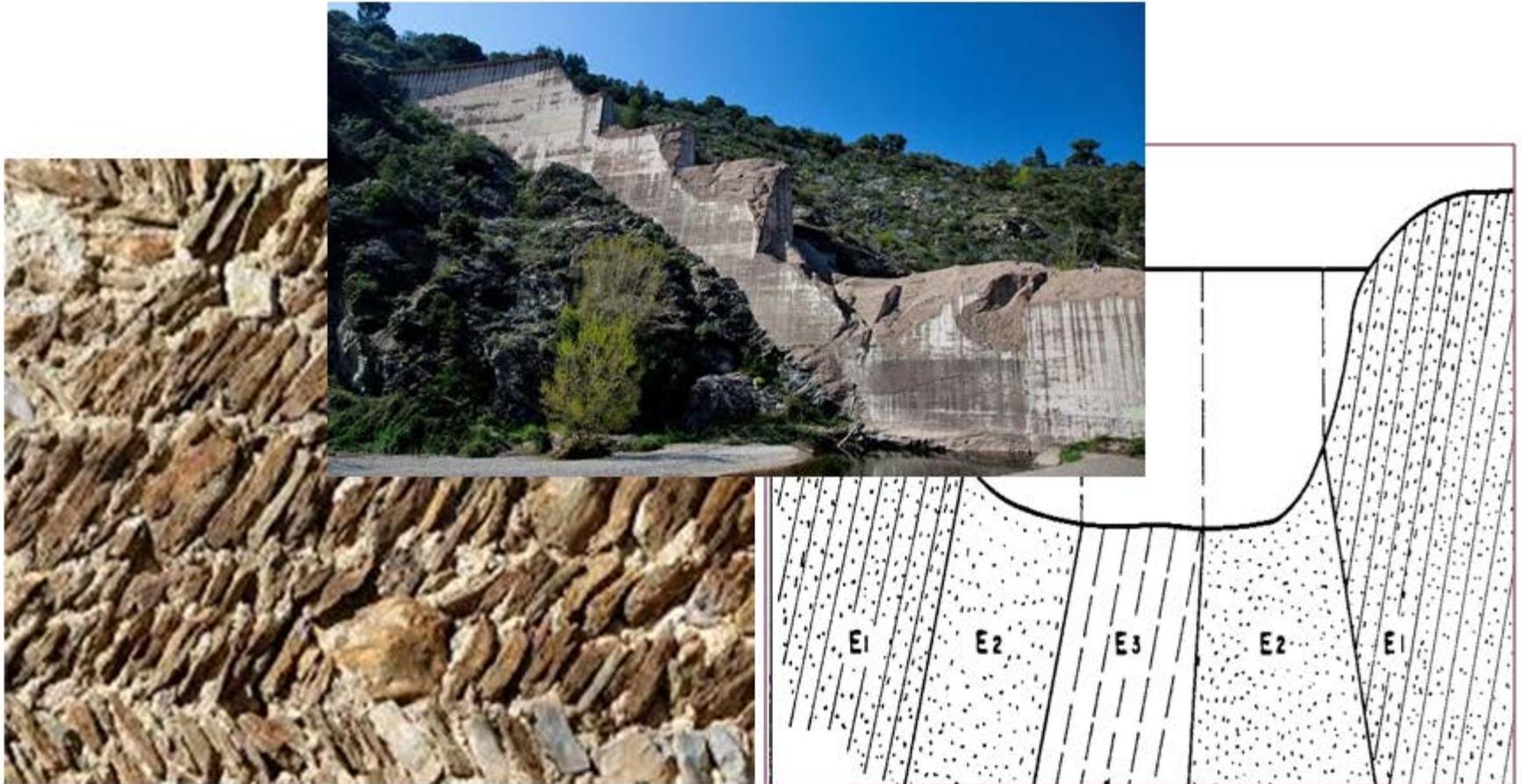
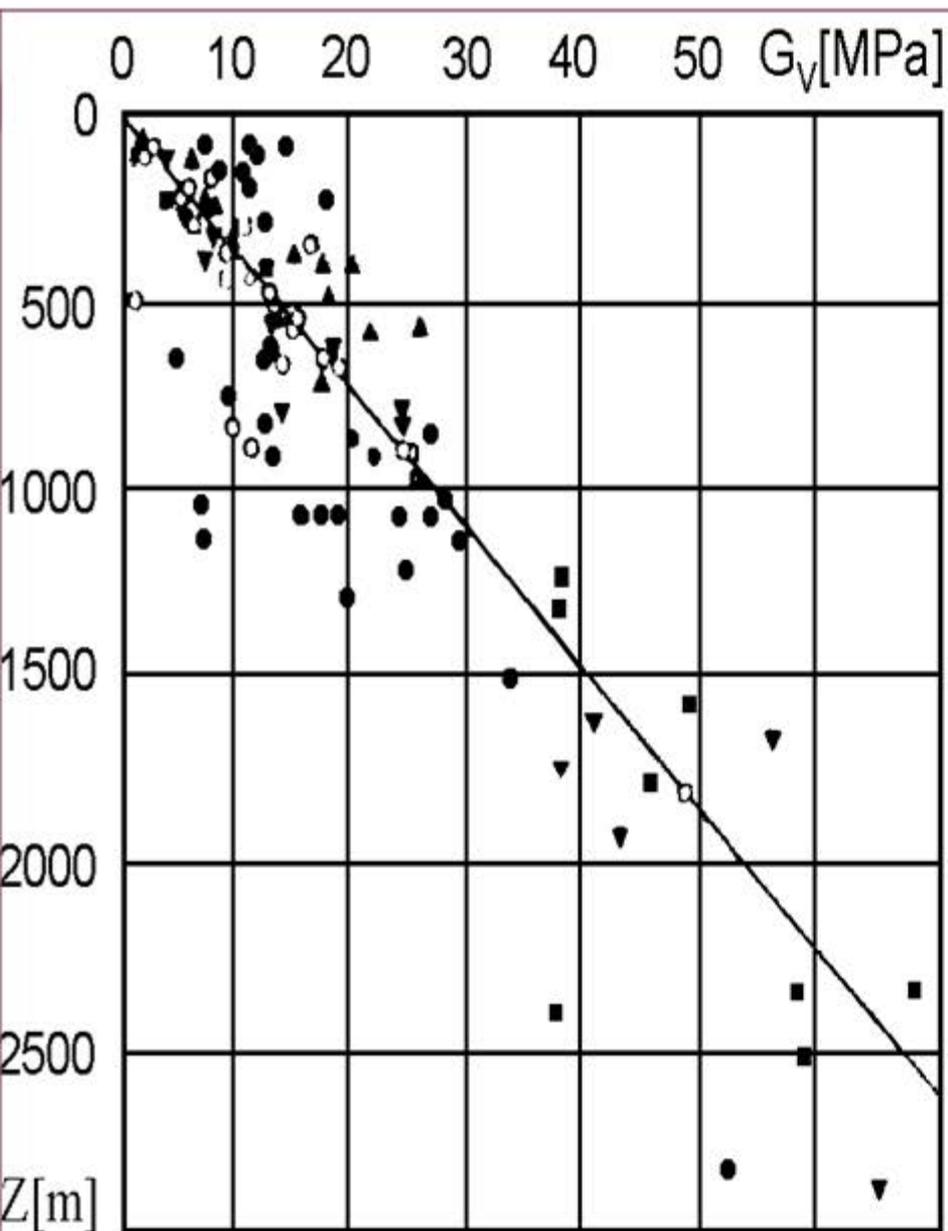


СКАЛНО-МЕХАНИЧНИ АСПЕКТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕТО И ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА ЯЗОВИРНИТЕ СТЕНИ



Проф. д-р инж. ВАНГЕЛ ВАСИЛЕВ

1. Начални напрежения в скалния масив (1-2)



$$\begin{aligned}\sigma_V &= \gamma \cdot Z \\ \sigma_H &= K \cdot \sigma_V \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = 0,\end{aligned}$$

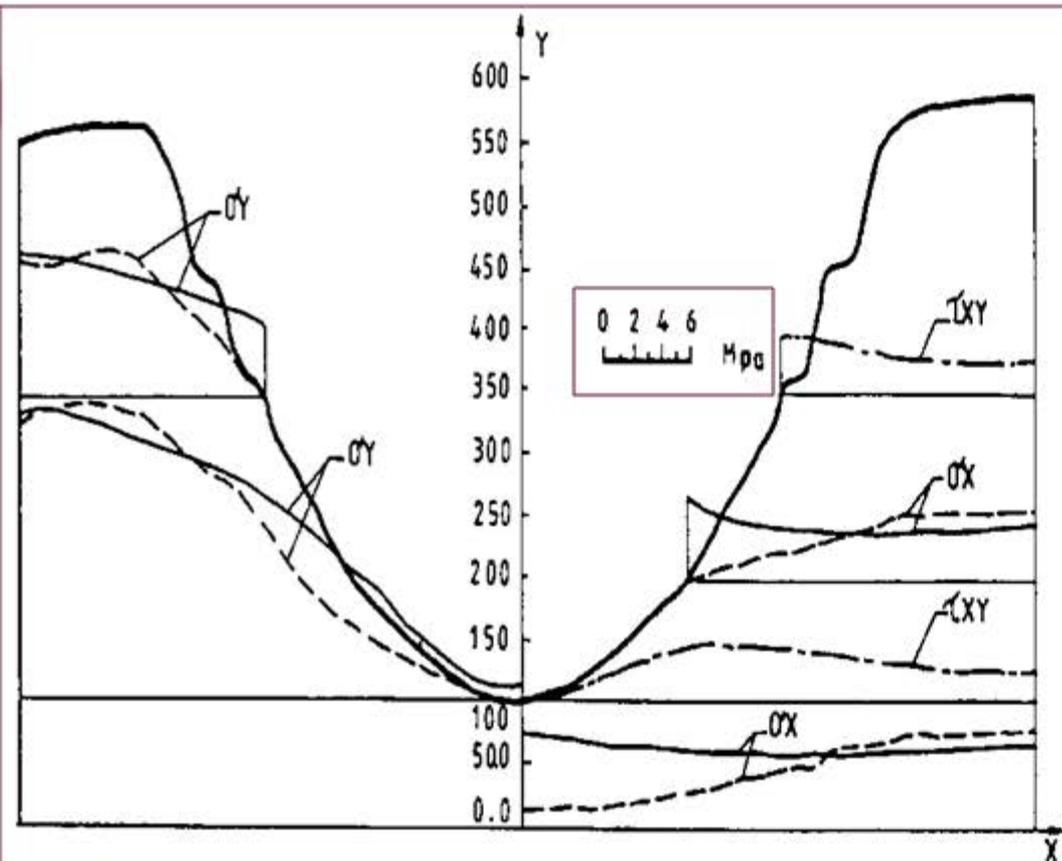
където:

γ - обемно тегло на скалния масив;
 Z - разст. от земната повърхност до точка на масива;

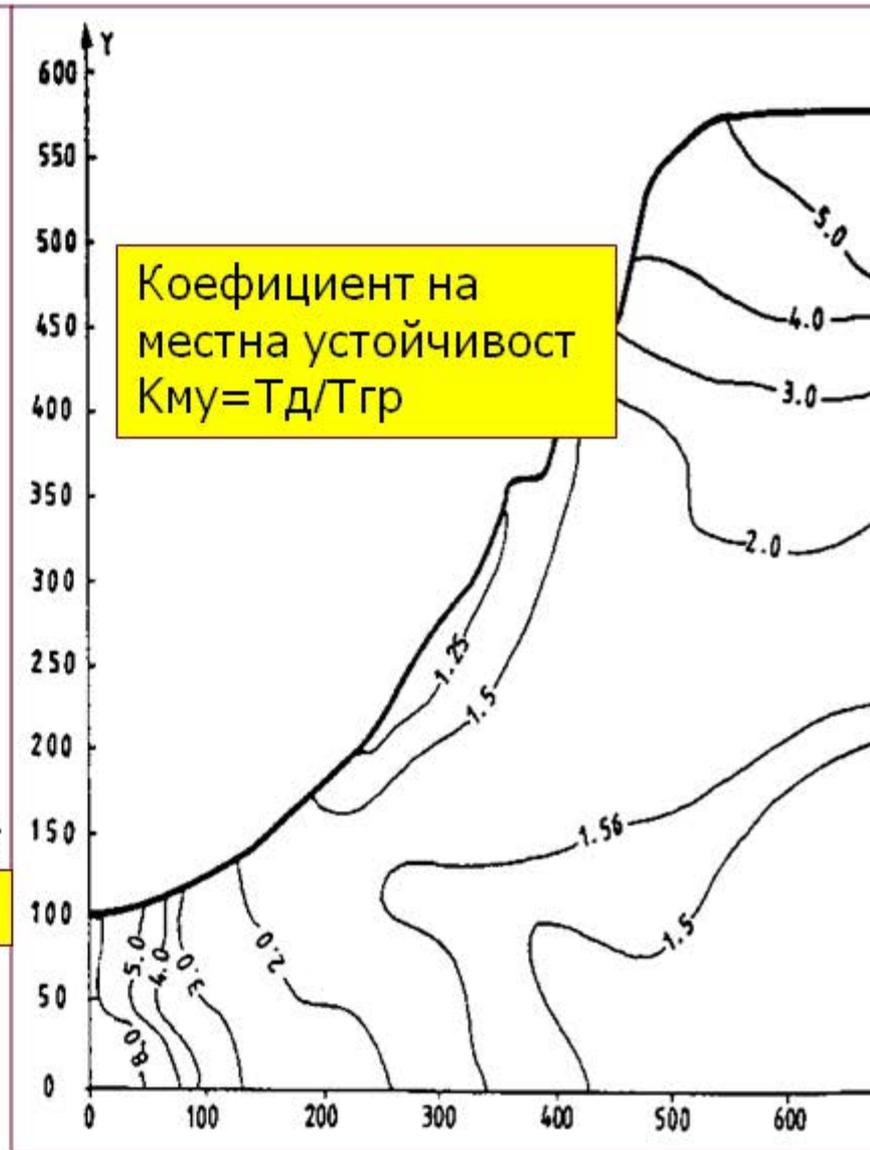
$K = \nu / (1 - \nu)$, ν е коеф. на Poisson.

Графика на измерени естествени вертикални напрежения в света, Brown и Hoek (1978).

1. Начални напрежения в скалния масив (2-2)

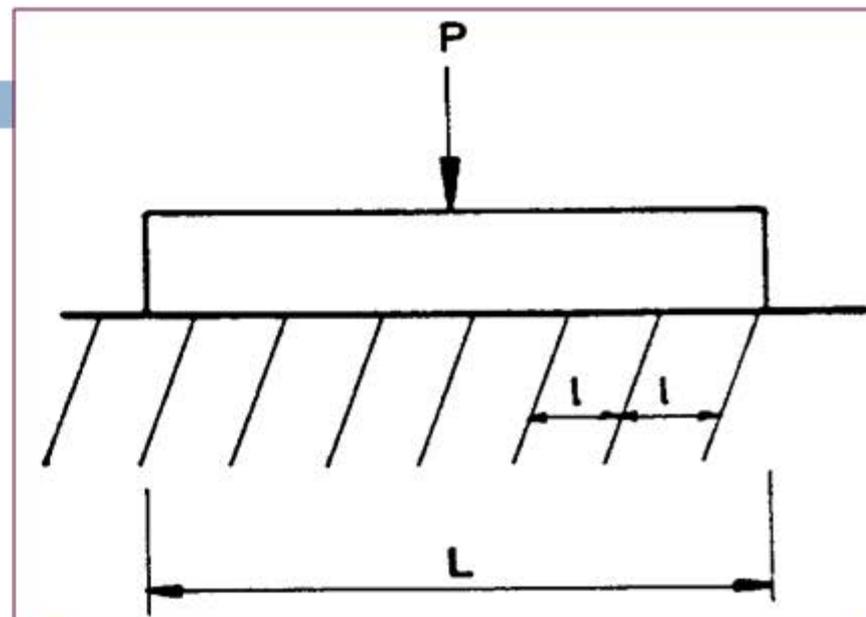
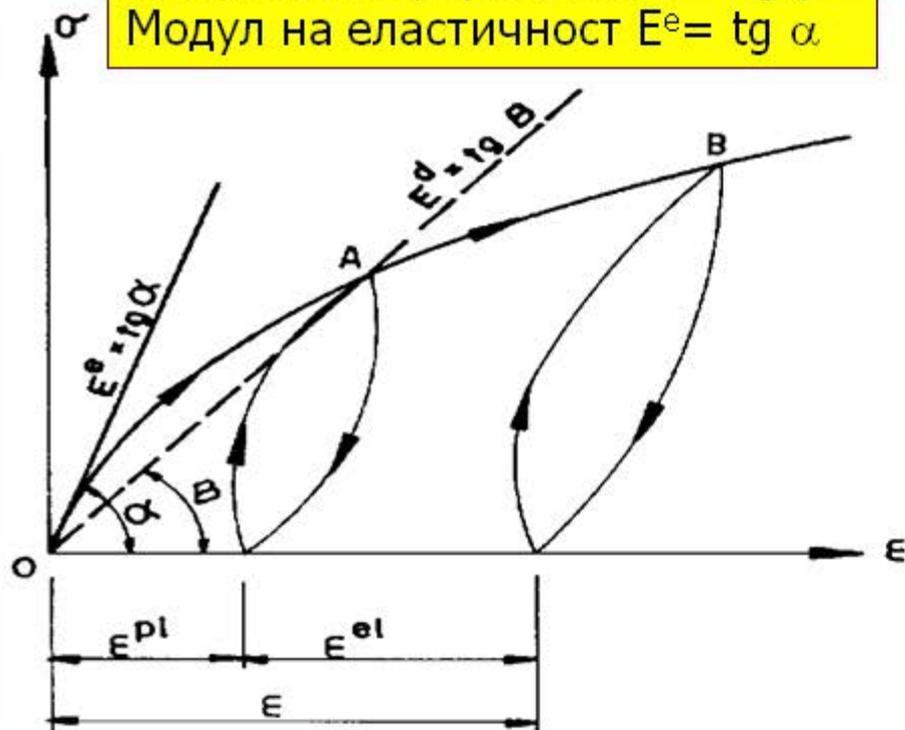


Естествени напрежения в речна долина



2. Деформируемость на скалния масив (1-2)

Модул на деформация $E^D = \text{tg } \beta$
 Модул на еластичност $E^e = \text{tg } \alpha$



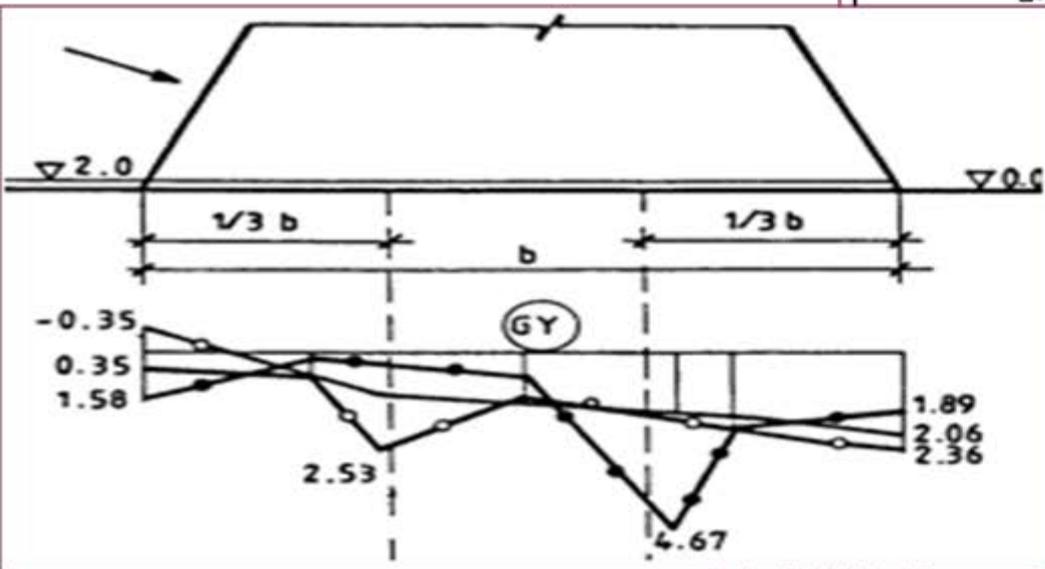
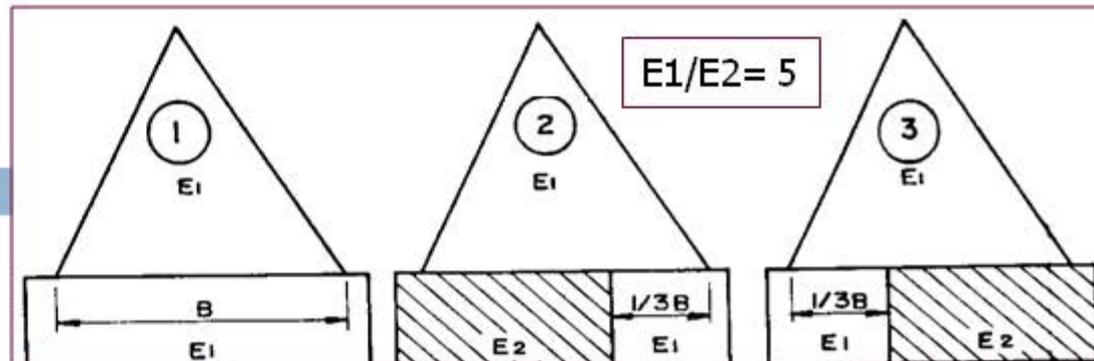
Критерий за квазинепрекъснатост
 $K = L/l = 5 \div 40$

$$K < 1 + 100/p \quad (\text{Ухов, 1975})$$

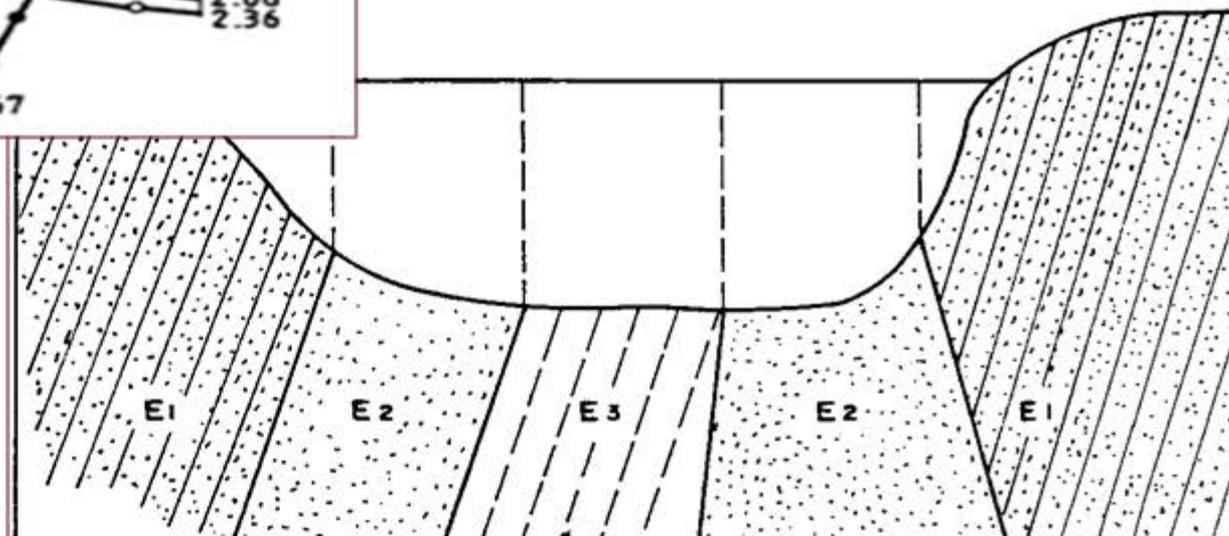
Степен на напуканост на скалния масив [%]	Модул на напуканост M	RQD
много слабо напукан	< 1,5	90 - 100
слабо напукан	1,5 до 5	75 - 90
средно напукан	5 до 10	50 - 75
силно напукан	10 до 30	25 - 50
много силно напукан	> 30	0 - 25

Пример: бетонова стена с $H=100\text{m.}$, $B = L = 80\text{ m}$
 $K = 21$ (при точност $p=5\%$), то
 $l = 80 : 21 = 3,80\text{ m.}$

2. Деформируемость на скалния масив (2-2)



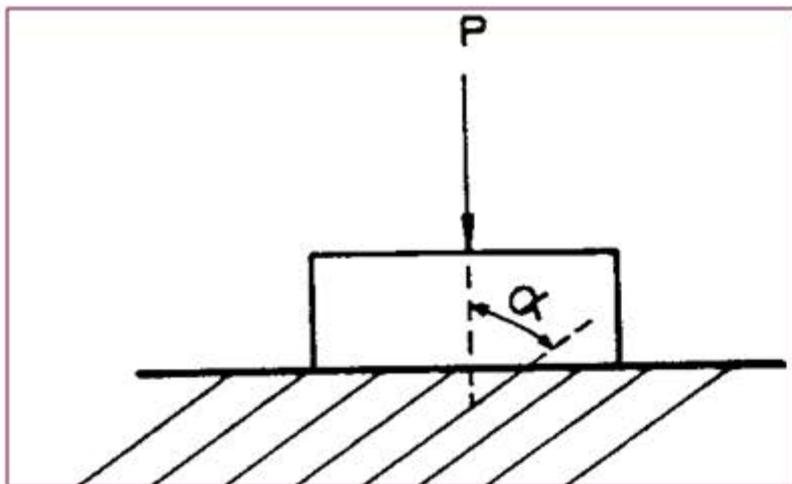
N_1 N_2 N_3



3. Якост на скалния масив (1-2)

3.1 Якост на едноосов натиск на скален образец σ_m

3.2 Якост на едноосов натиск на скалния масив σ_c



α градуси	K _{стр.о.}				
	M<4	4 - 8	8 - 12	12 - 14	>14
0 - 15	0.60	0.40	0.36	0.34	0.30
10 - 35	0.40	0.30	0.27	0.24	0.20
40 - 60	0.35	0.35	0.22	0.20	0.18
65 - 90	0.55	0.40	0.36	0.32	0.28

$$K_{\text{стр.о.}} = f(\text{модула на пукнатините } M)$$

$$K_{\text{стр.о.}} = \sigma_m / \sigma_c$$

K _{стр.о.}	σ_m , МПа
0.10	<2
0.08	2 - 10
0.06	10 - 40
0.03	> 40

$$K_{\text{стр.о.}} \text{ в зоната на взривни работи}$$

3. Якост на скалния масив (2-2)

3.3 Якост на срязване на скален образец

3.4 Якост на срязване на скалния масив

- ♦ якост на срязване по контакта бетон-скала
- ♦ якост на срязване в скалния масив

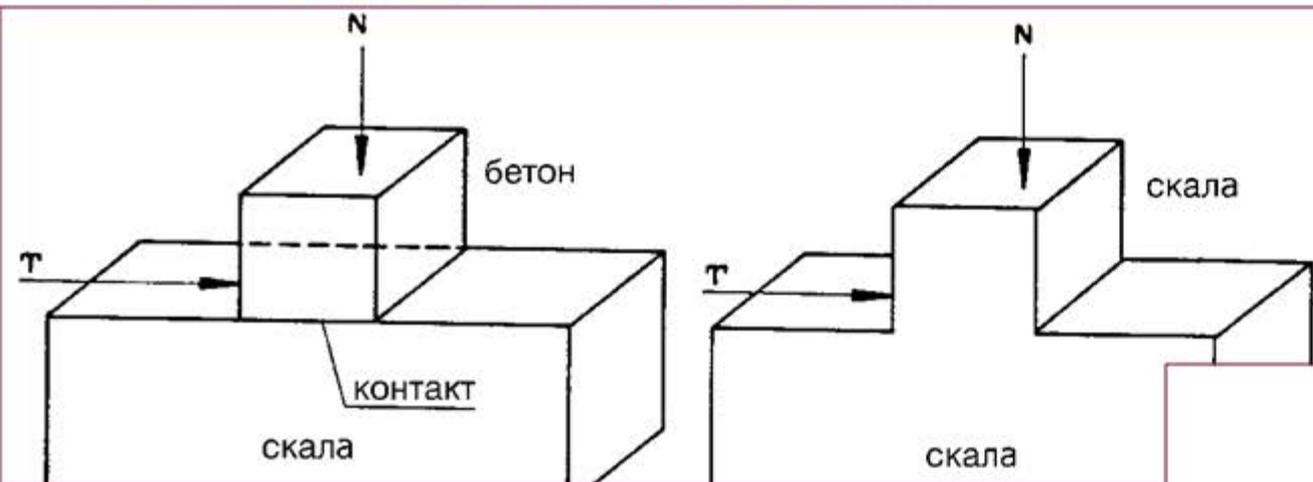
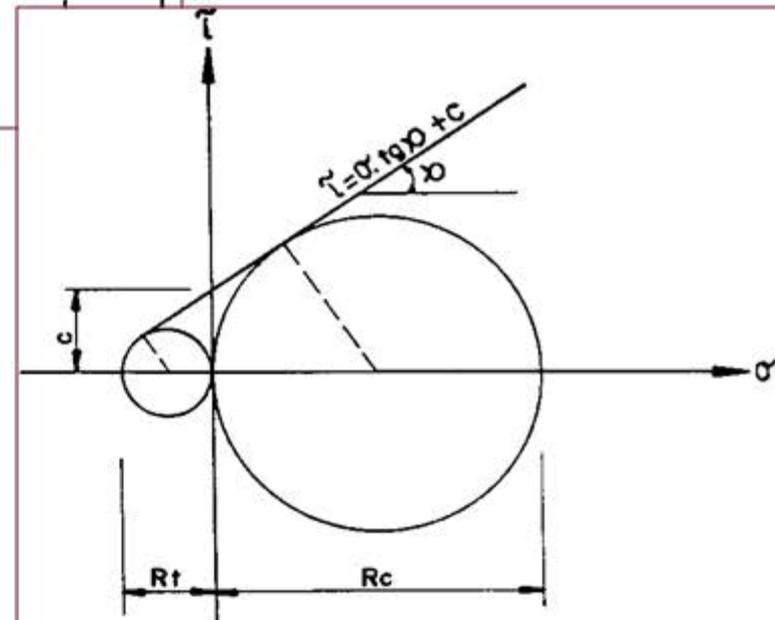


Схема за определяне на якостта на срязване на масива чрез щампи

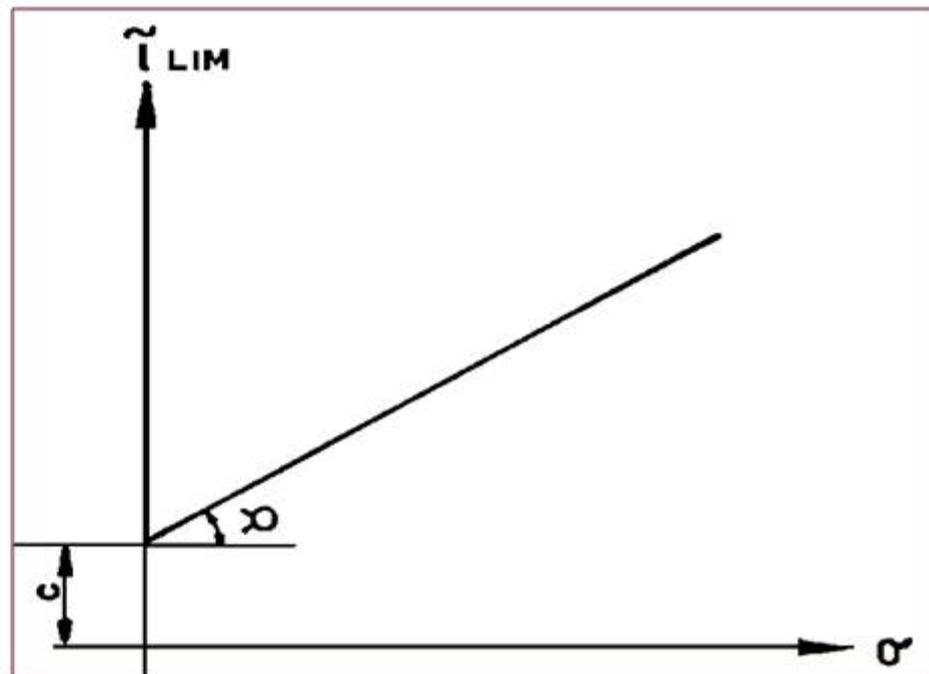
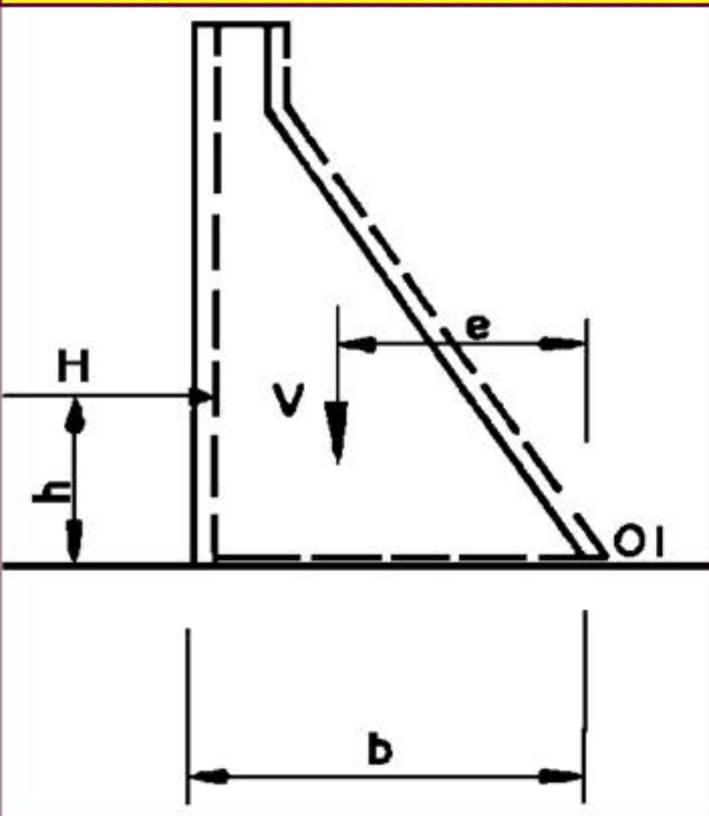
Построяване на графиката $\tau_{lim} = f(\sigma_n)$



3.5 Схема на разрушение (срязване) в контакта на бетонни гравитачни стени (1-2)

Възможни са две схеми:

1) хлъзгане (при малки значения на C и φ и нормални стойности на вертикалните напрежения ($\sigma_n < \sigma_{cr}$));



Критична стойност на нормалното напрежение σ_{cr} (Фишман, 1984):

$$\sigma_a = \{(m - n \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot R_{sm} - \operatorname{tg} \varphi \cdot C\} / (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

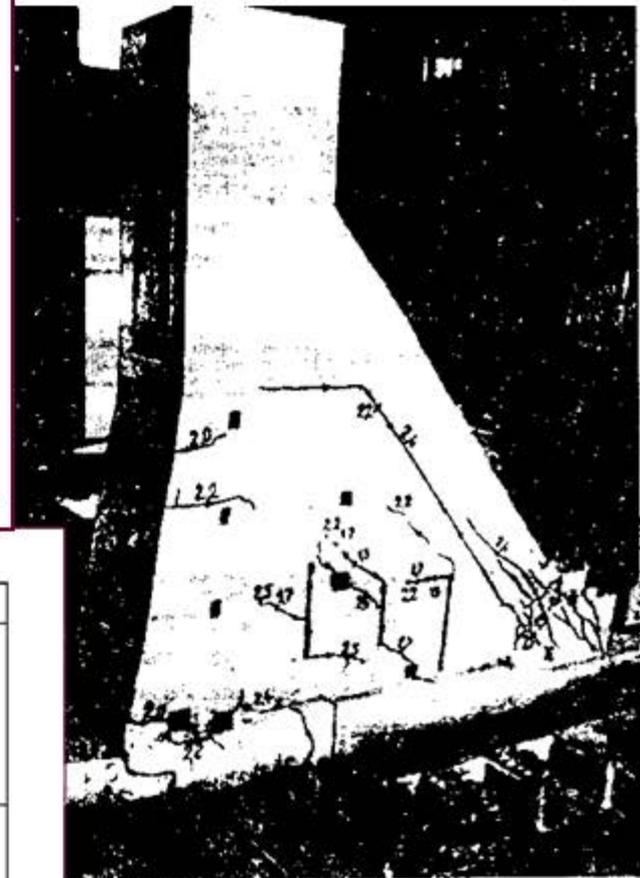
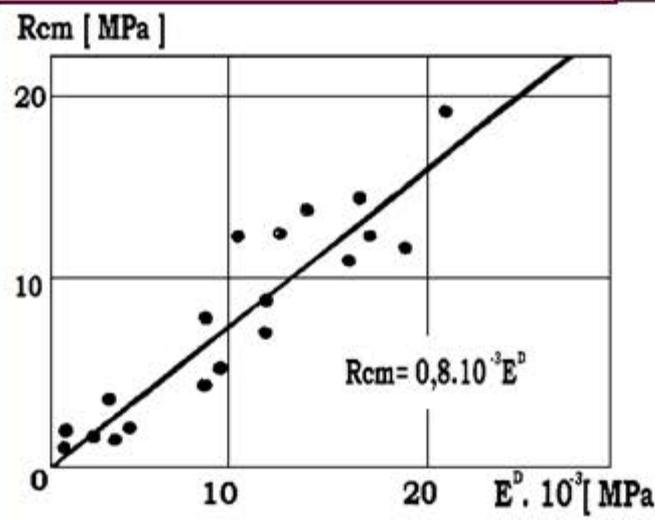
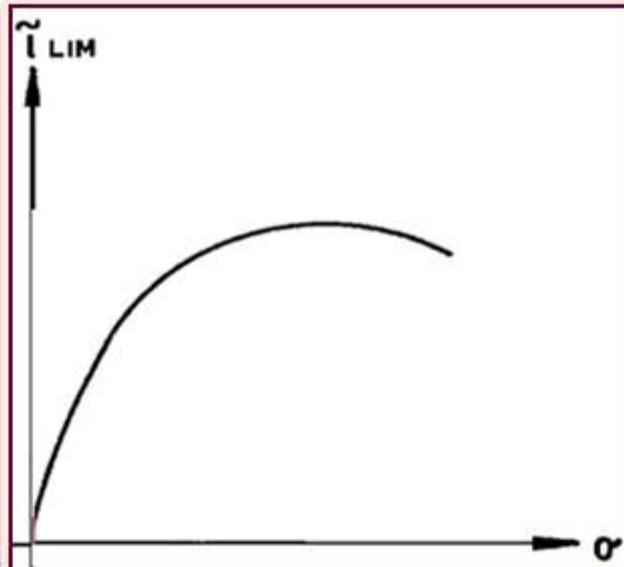
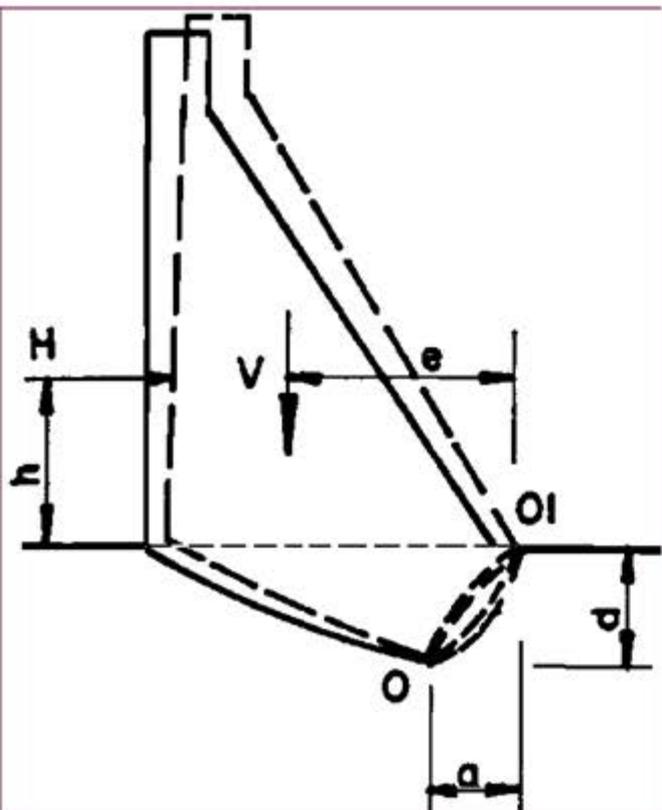
$$\sigma_b^2 = (C^2 + 2nC \cdot R_{sm}) / (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

$$m = e/b; \quad n = h/b$$

$$\sigma_{cr} = \sigma_a + \sqrt{(\sigma_a^2 - \sigma_b^2)}$$

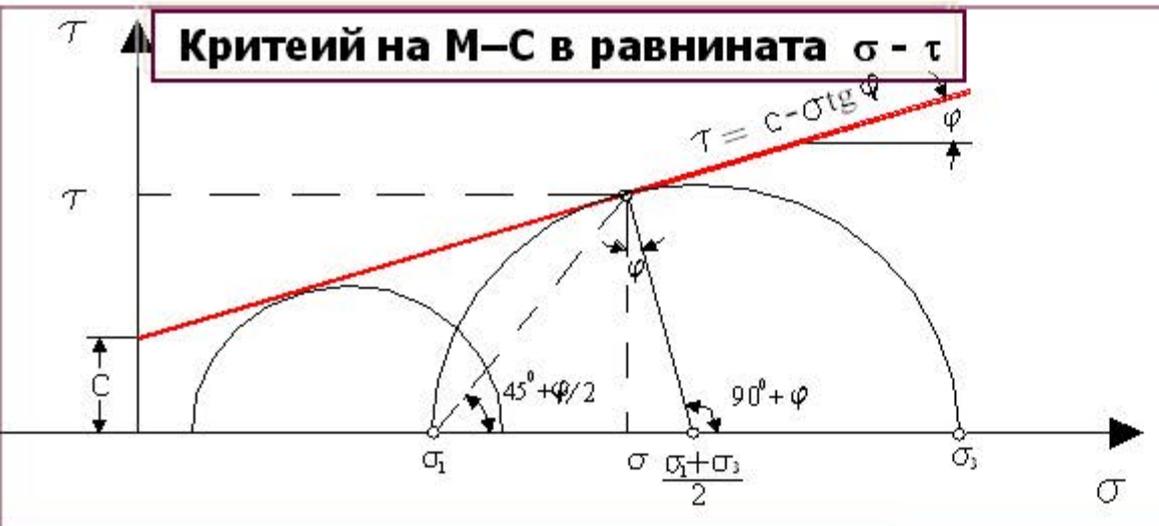
3.5 Схема на разрушение (срязване) в контакта на бетонни гравитачни стени (2-2)

2) гранично завъртане, съпроводено с разрушение на въздушната стъпка (при високи стойности на вертикалните напрежения и ниски стойности на якостта на смачкване на масива или на бетона) ($\sigma_n > \sigma_{cr}$).

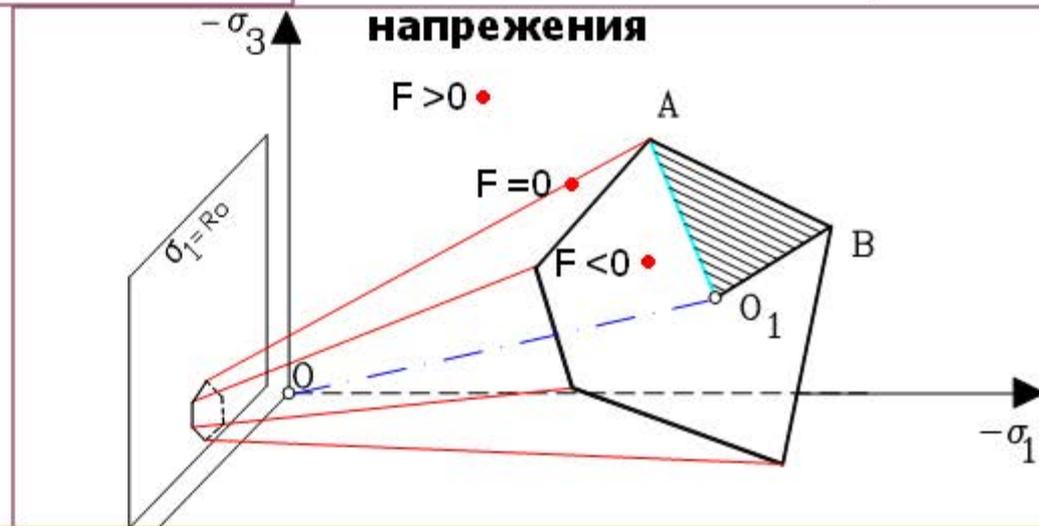


4. Критерий за разрушение на скалния масив

4.1 Критерий за разрушение на Mohr – Coulomb



Критерий на М–С в пространството на главните нормални напрежения



$$F = \sigma_1 (1 + \sin \varphi) / 2 - \sigma_3 (1 - \sin \varphi) / 2 - C \cdot \cos \varphi = 0$$

$$F = \sigma_1 - R_0 = 0$$

4.2 Критерий за разрушение на Хоек – Brown

Ненапукан скален масив (1980):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5}$$

Напукан скален масив:

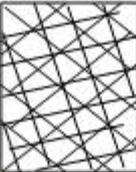
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

- Rock Mass Rating (RMR), Bieniawski, 1974
- Geological Strength Index (GSI), Hoek at all, 1995
- Disturbance Factor D (blast damage), Hoek at all, 2002

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} + e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

ОБОБЩЕН КРИТЕРИЙ НА НОЕК - BROWN		СЪСТОЯНИЕ НА ПОВЪРХНИНТЕ НА ПУКНАТИНИТЕ					
		МНОГО ДОБРО Много грапави, неизветрели, повърхности	ДОБРО - Грапави, слабоизветрели повърхности	СРЕДНО - Гладки, средно изветрели или алтерирани повърхности	ЛОШО - Гладки, силноизветрели повърхности, заплънител, съдържащ ъглести ск. късове	МНОГО ЛОШО - Гладки, силно изветрели повърхности, заплънител мек глин. материал	
СТРУКТУРА							
	БЛОКОВА – ненарушен скален масив състоящ се от кубични блокове формирани от три взаимно-перпендикулярни системи пукнатини.	m_b/m_i s a E_m V GSI	0.60 0.190 0.5 75000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20000 0.25 48	0.16 0.003 0.5 9000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3000 0.25 34
	МНОГОБЛОКОВА – частично нарушен скален масив с многоъглови скални блокове, формирани от 4 и повече системи пукнатини.	m_b/m_i s a E_m V GSI	0.40 0.062 0.5 40000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5000 0.25 38	0.07 0 0.53 2500 0.3 25
	БЛОКОВО/ НАПЛАСТЕНА – нагънат и тектонски обработен скален масив с много пресичащи се системи пукнатини, образуващи ъгловати блокове.	m_b/m_i s a E_m V GSI	0.24 0.012 0.5 18000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6000 0.25 40	0.08 0 0.5 3000 0.3 30	0.06 0 0.55 2000 0.3 20
	НАТРОШЕНА – силно натрошен скален масив, състоящ се от слабосвързани ъгловати и заоблени блокове.	m_b/m_i s a E_m V GSI	0.17 0.004 0.5 10000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6000 0.25 40	0.08 0 0.5 3000 0.3 30	0.06 0 0.5 2000 0.3 20	0.04 0 0.60 1000 0.3 10

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002

$$\phi' = \sin^{-1} \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n} \right] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}$$

where, for tunnels

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad - H \text{ is the depth below surface}$$

for slopes

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad - H \text{ is the slope height}$$

Hoek and Diederichs equation:

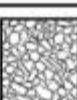
$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

Hoek and Diederichs, 2006

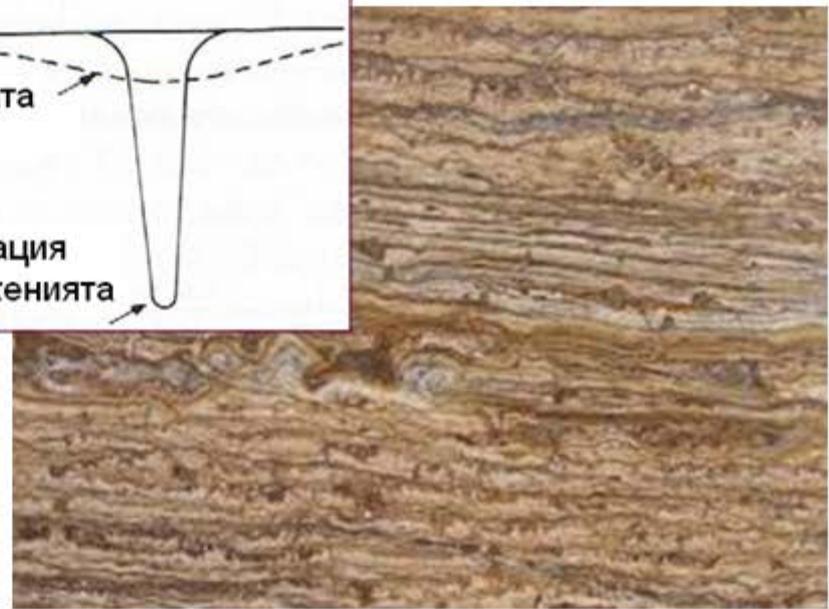
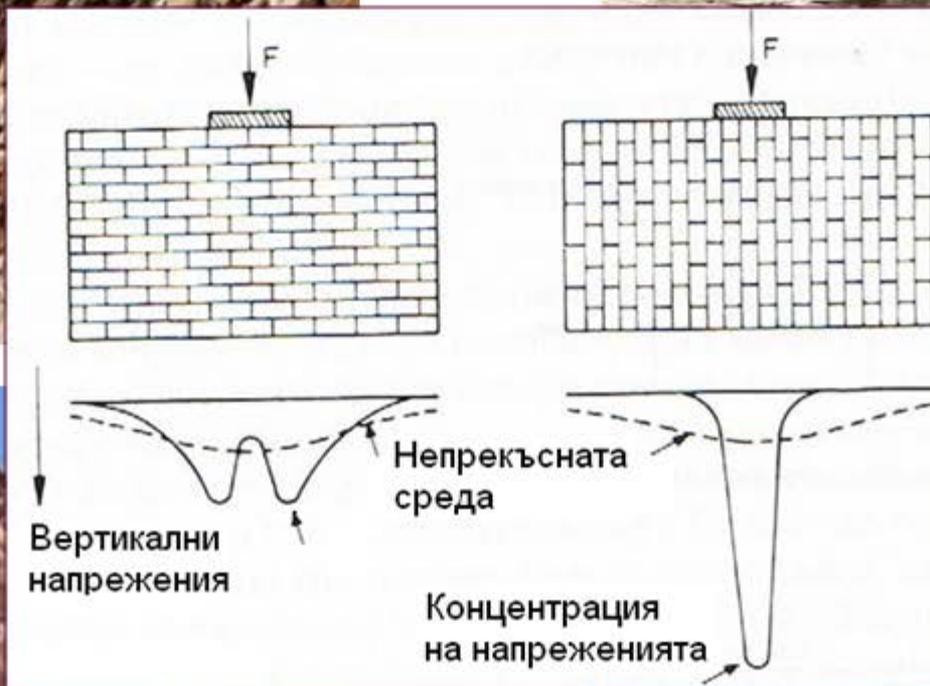
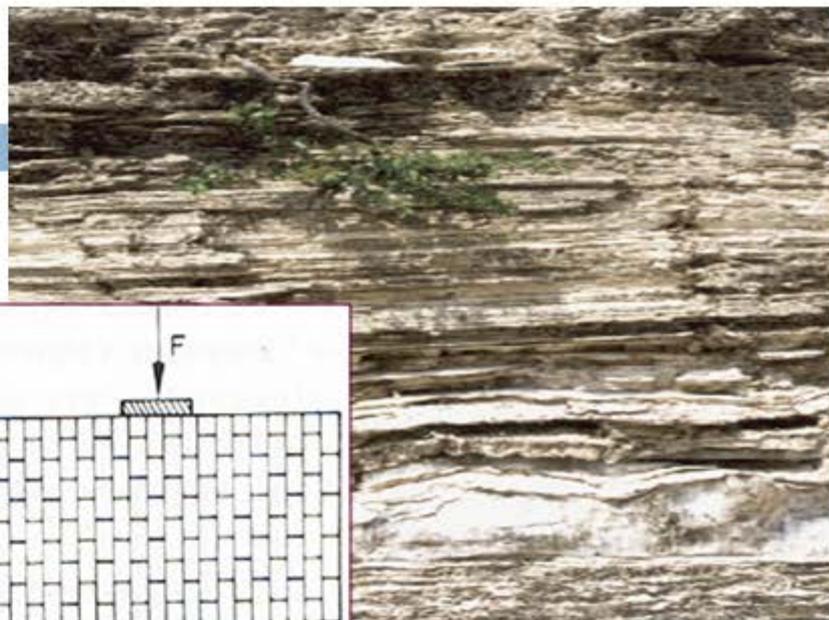
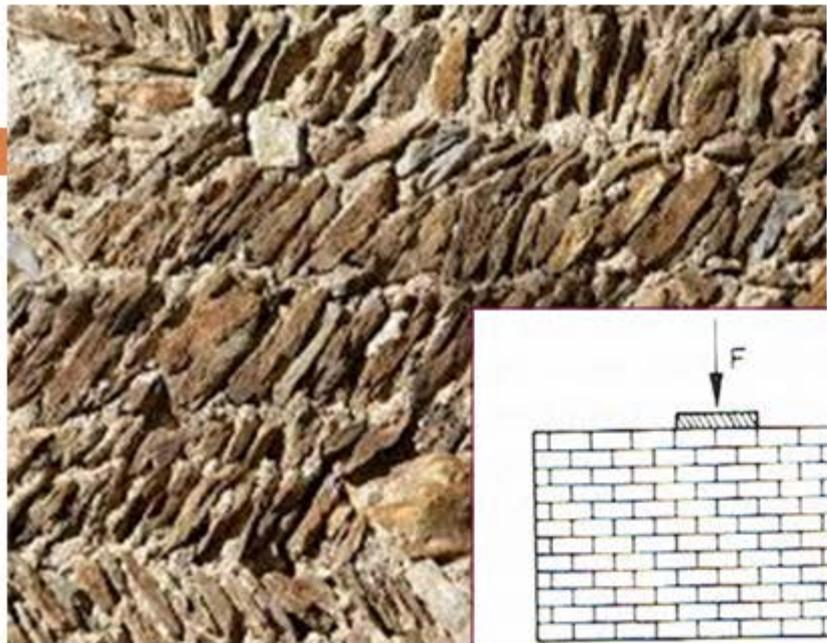
GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

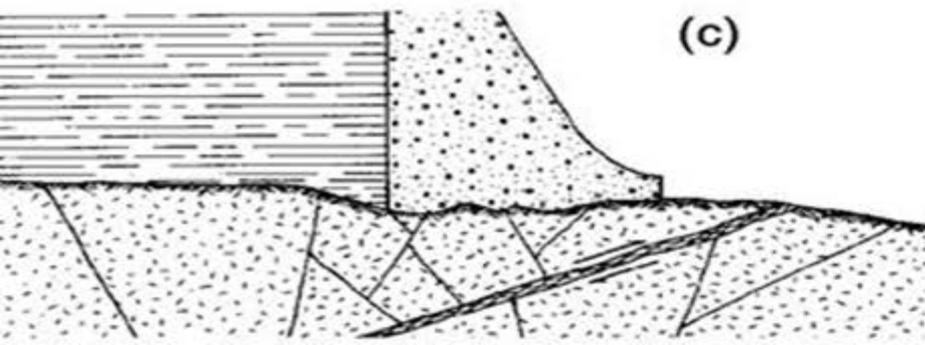
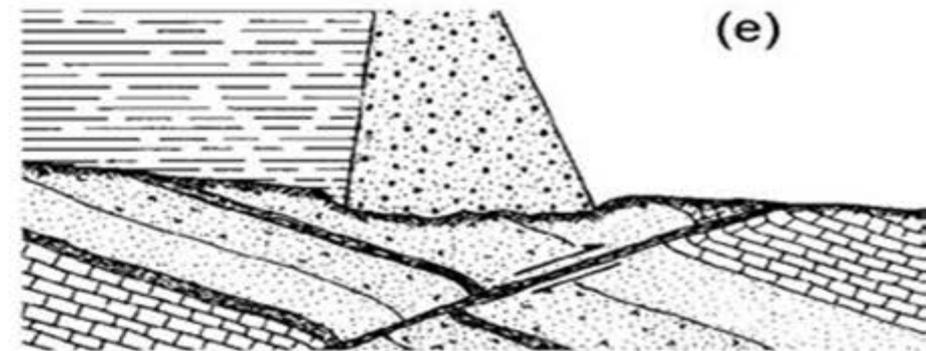
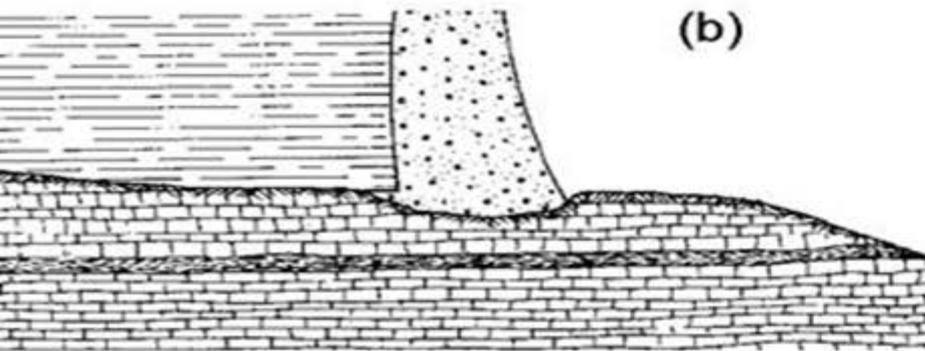
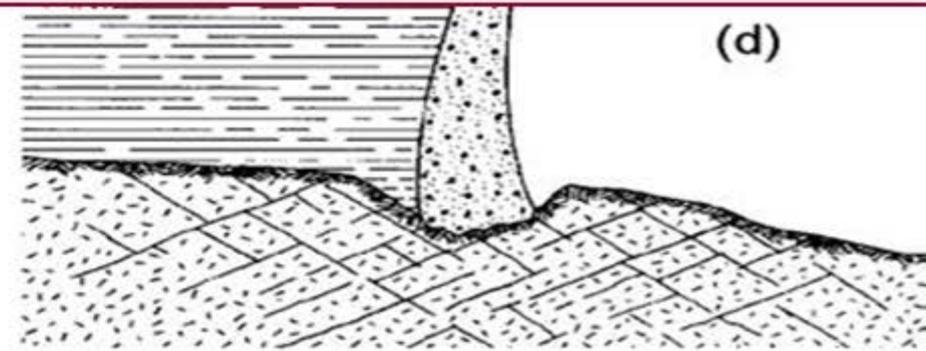
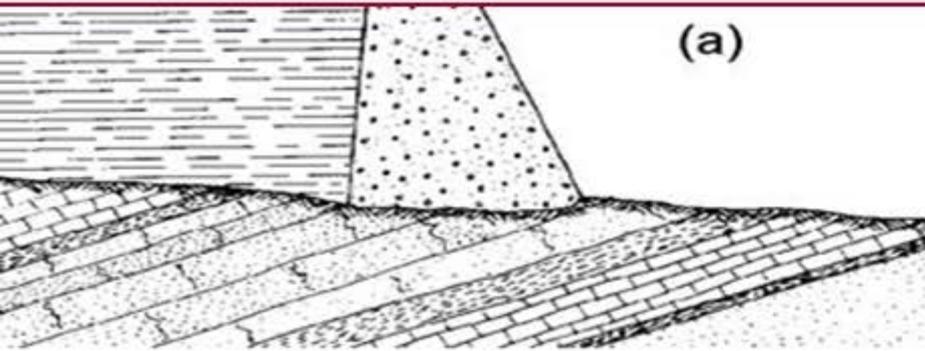
Geological Strength Index Chart

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
	N/A	N/A			

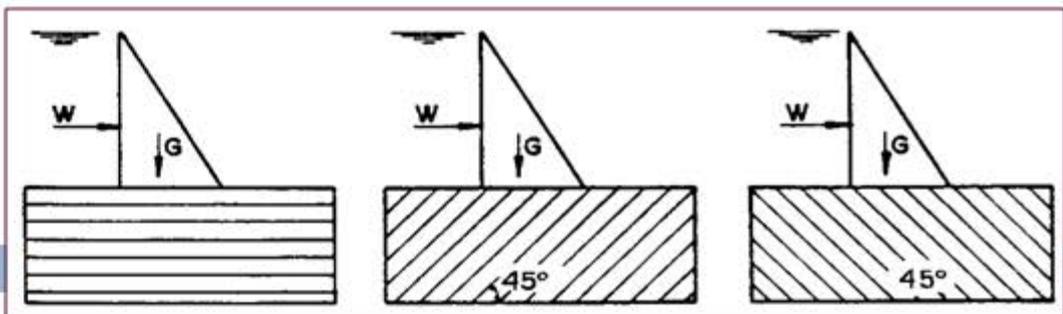
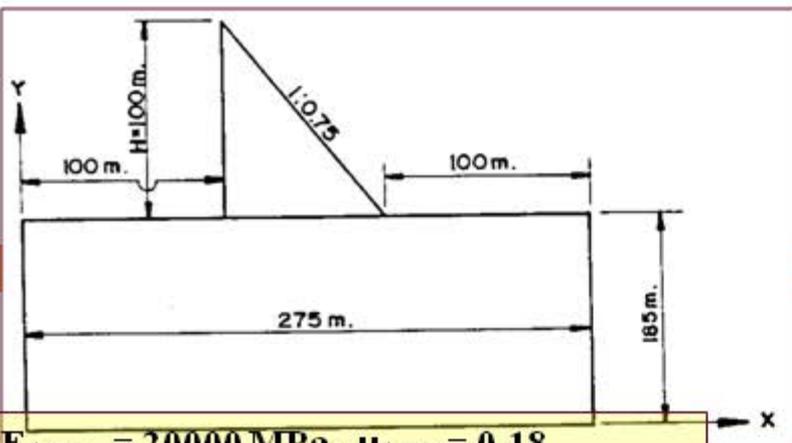
5. Напластяване и анизотропия на скалния масив



Възможни случаи на неблагоприятно залягане на скалните пластовете в основата на бетонни язовирни стени



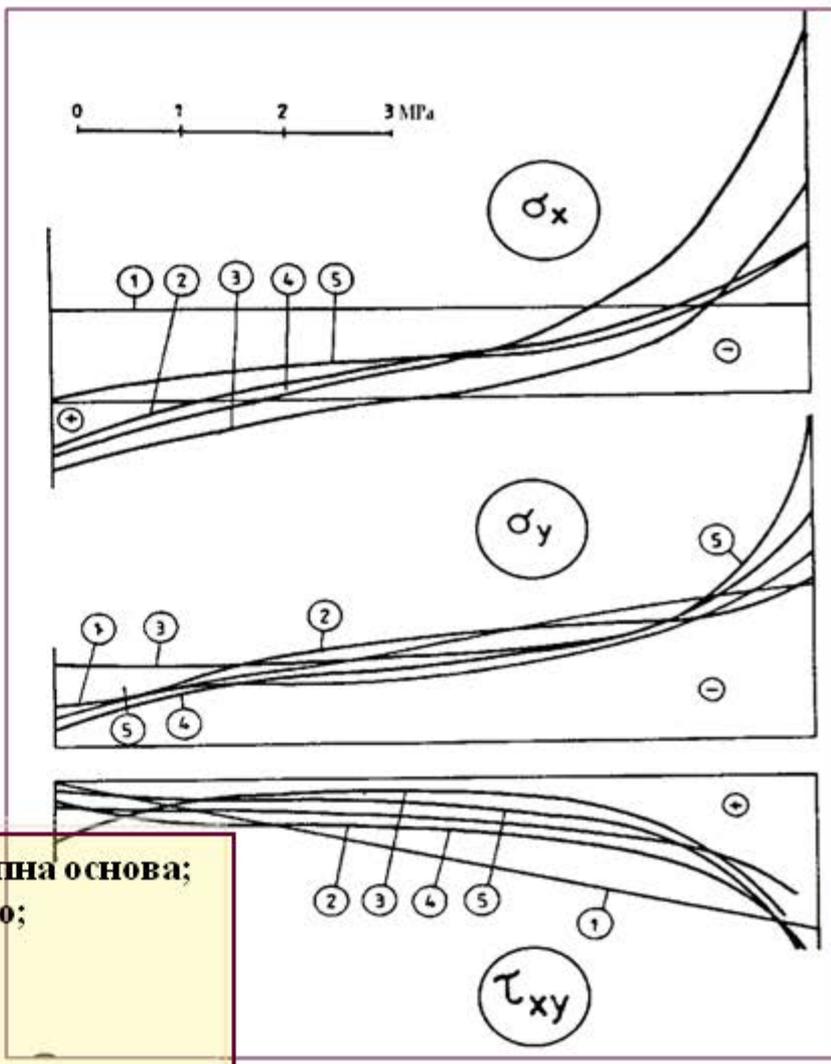
по Wahlstrom, 1974)



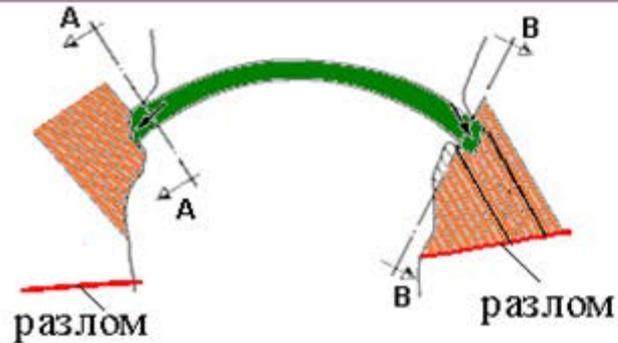
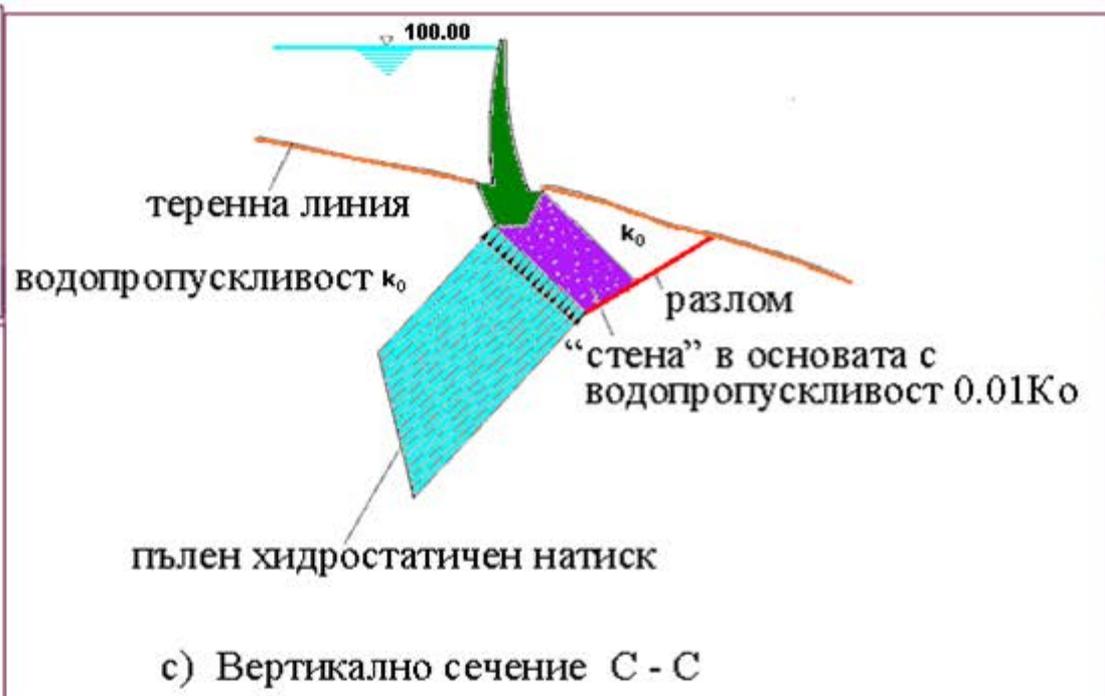
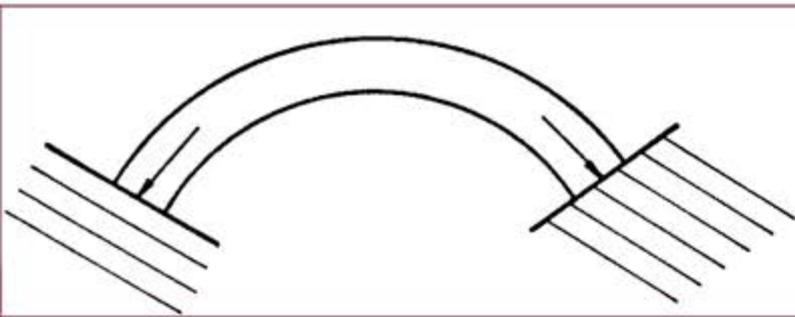
$E_{\text{бетон}} = 20000 \text{ МПа}, \mu_{\text{бетон}} = 0,18$
 $E_{1\text{скала}} = 2000 \text{ МПа}, \mu_1 = 0,10$
 $E_{2\text{скала}} = 20000 \text{ МПа}, \mu_2 = 0,30$

ИЗВОДИ:

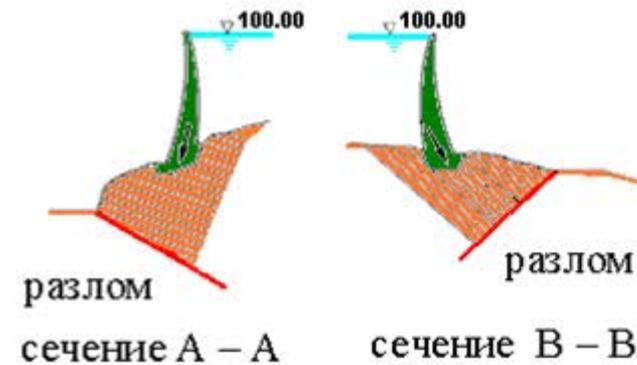
- ◆ Ниски напрежения в средата на контакта "основа – стена" и концентрация в ръбовете;
- ◆ При наклон на пластовете 45о по посока на течението σ_x, σ_y и τ_{xy} запазват високи стойности в дълбочина под петата на възд. откос (до 40 - 50м!!!).
- ◆ Деформациите на стената зависят от напластяването на основата. **Най-големи** са при ъгъл на напластяване 45° **срещу** течението, а **най-малки** - при ъгъл 45° по течението на реката.



1 – по теория на еластичността, изотропна основа;
 2 – МКЕ, напластяване срещу течението;
 3 – МКЕ, напластяване по течението;
 4 – МКЕ, хоризонтално напластяване;
 5 – МКЕ, изотропна основа.



а) Хоризонтално сечение на кота 65.00



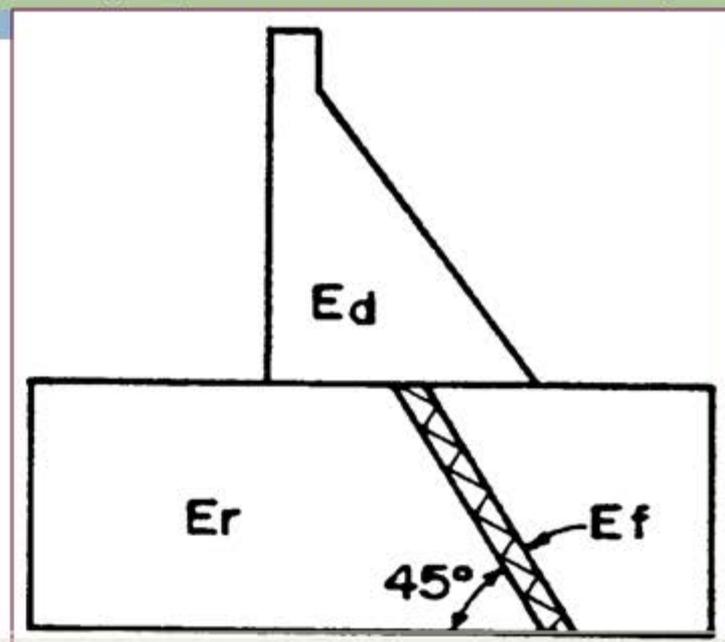
б) Вертикални сечения А - А и В - В



Язовирната стена
Malpasset
(Франция), 1959г.

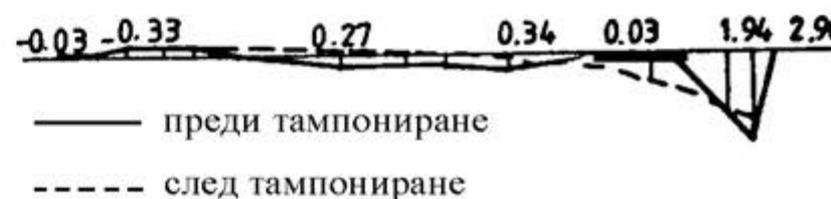
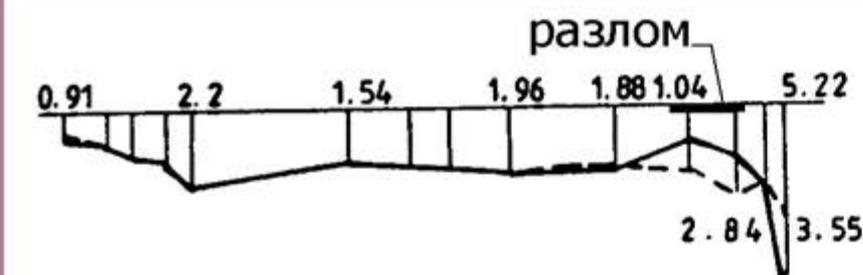
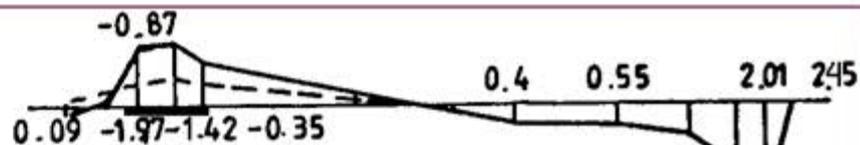
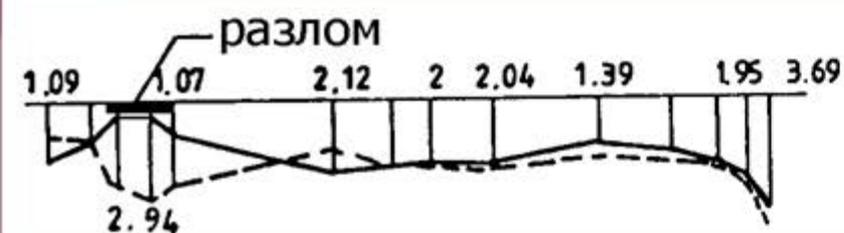
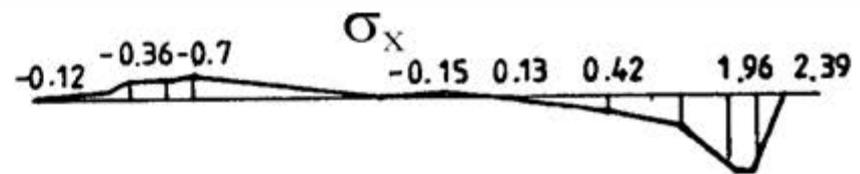
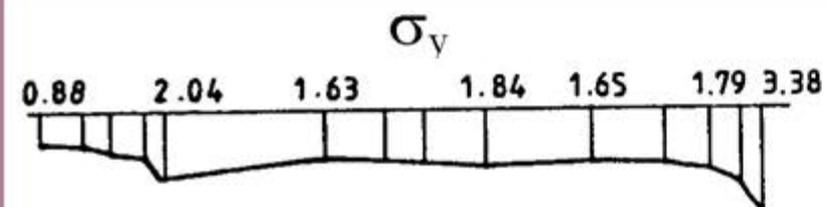
6. Тектонски разломи в скалния масив

International Society of Rock Mechanics (ISRM): тектонският разлом (fault) се дефинира като напукана зона, по дължината на която има забележимо преместване на скалата от няколко сантиметра до няколко километра (Somerville и Paul, 1983).



► Запълването (тампонирането) на слаби зони с бетон до дълбочина 0.7 до $1.4d$, където d е широчината на зоната, подобрява напрегнатото състояние на стената (с пунктирната линия).

► Запечатването на зоната с бетон, който е по-корав от основата, довежда до концентрация на напреженията и затова е желателно бетонната тапа да се прави от нискомодулен бетон.



N1 - еднородна основа; N2 - разлом под водната стъпка;
N3 - разлом в средата на основата; N4 - разлом под въздушната стъпка

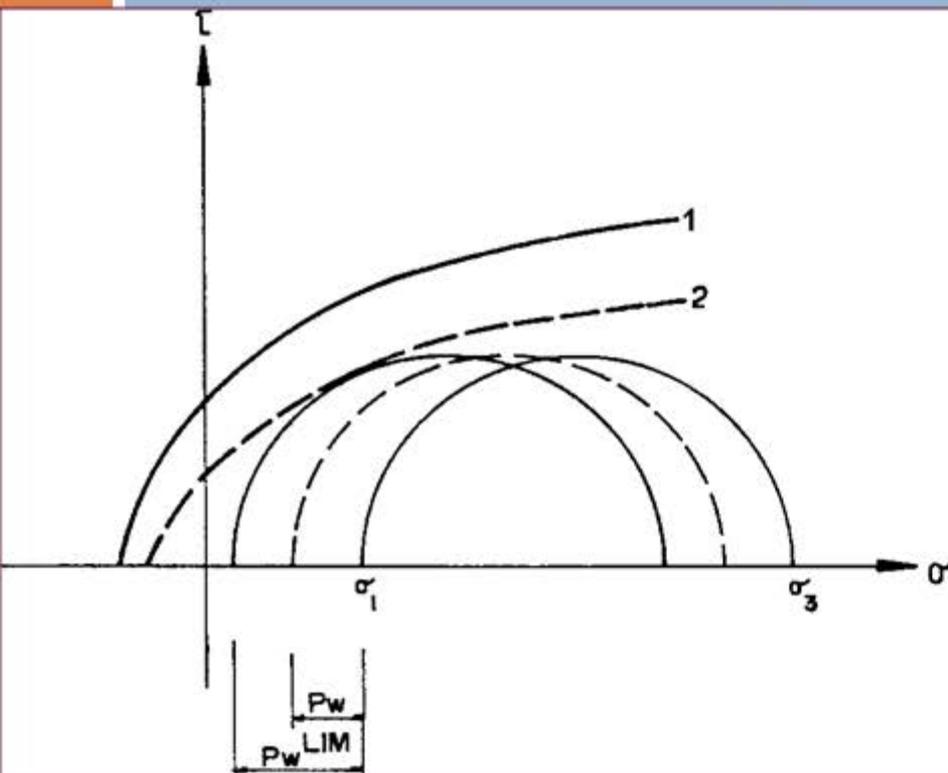
**Контрафорсна яз. стена върху разлом,
N=107м, $E_d/E_r=4$; $E_r/E_f=20$ (Гришин и др., 1975)**

7. Влияние на водата(1-2)

Влияние върху НДС

1 – сухо състояние;

2 – водонаситено състояние



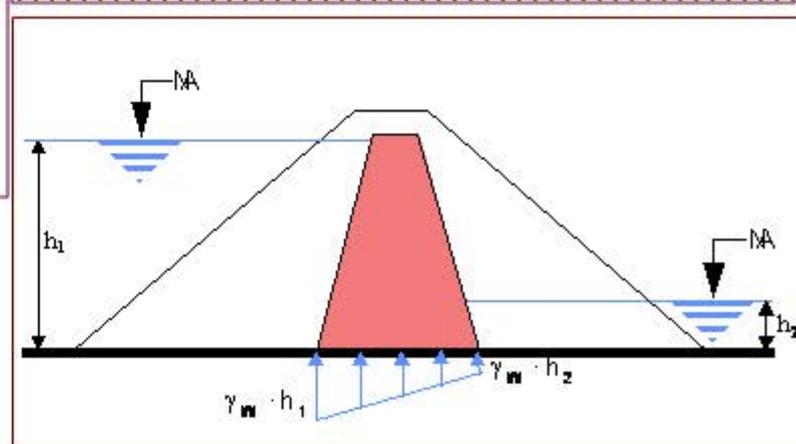
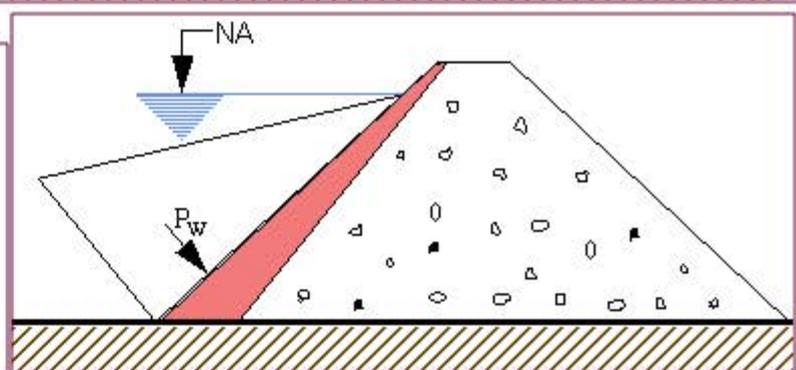
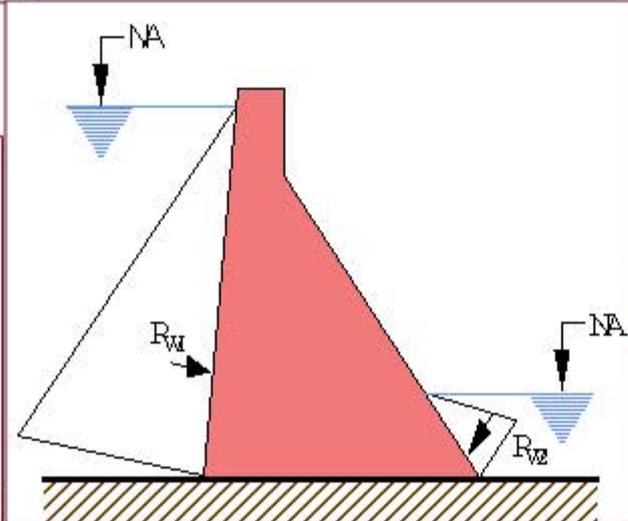
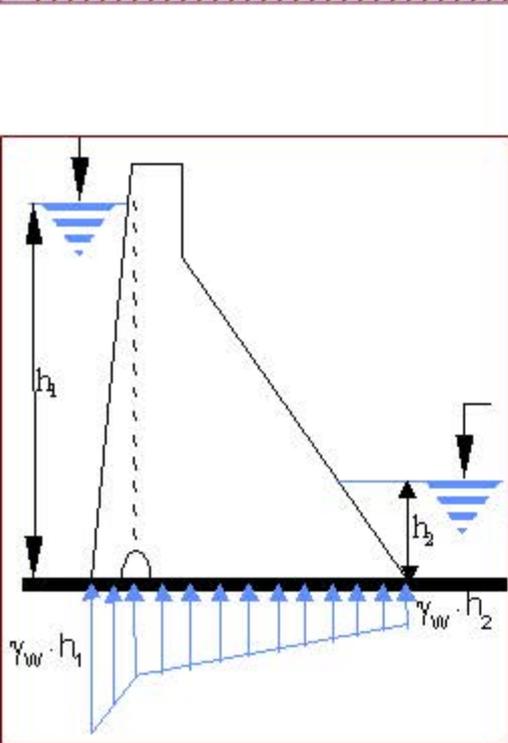
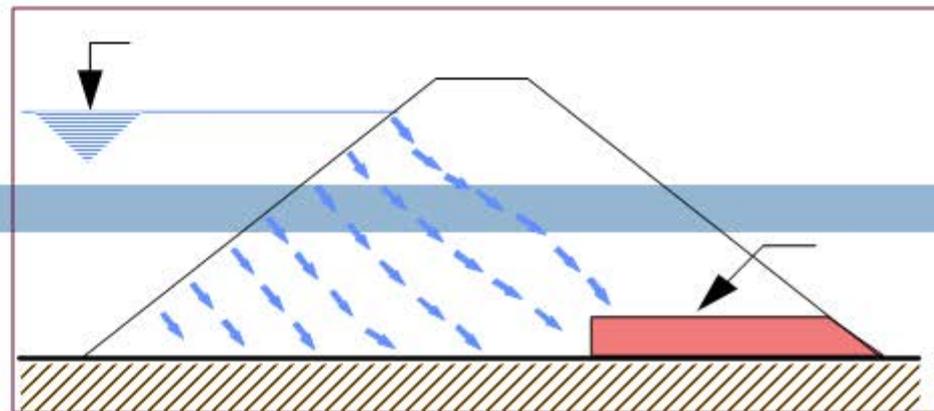
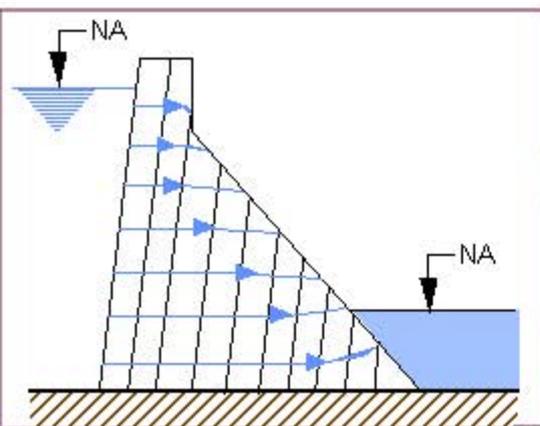
1) Директно влияние върху напрегнатото и деформирано състояние на системата

2) Изменение на филтрационните условия в скалния масив, а вследствие на това и изменение на неговите физико-механически свойства

Яз. стена **Saint Francis**
след катастрофата(1928г.)
(Гравитачна, $H=56m$,
 $V\sim 50$ млн.м³)



7. Влияние на водата (2-2)



Иделизирани схеми на прилагане на натоварването от воден натиск върху язовирните стени

8. Инженерни мерки за подобряване на физико – механичните характеристики на основата (1-2)

◆ Бетонен зъб и наклон на основната фуга

◆ Изкопаване на изветрялата скала

◆ Тампониране на тектонски зони на дълбочина:

1. Според US Bureau of Reclamation:

$$d = 0,002 \cdot V_{\text{зона}} \cdot H_{\text{стена}} + 5 \quad \text{за } H_{\text{стена}} > 150\text{ft}$$
$$d = 0,3 V_{\text{зона}} + 5 \quad \text{за } H_{\text{стена}} < 150\text{ft}$$

2. Според (Гришин, 1975):

$$d = (1-1,5) V_{\text{зона}}[\text{m}]$$

◆ Укрепване на скална основа чрез специални конструкции

◆ Цементация

◆ Здрав бетон в контактната област

◆ Противофилтрационни завеси

◆ Дренажни системи



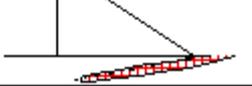
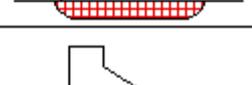
8. Инженерни мерки за подобряване на физико – механичните характеристики на основата (1-2)

Изискване за недопускане на гранични състояния в стената или основата:

I -По загуба на носеща способност и по непригодност за експлоатация - загуба на устойчивост; разрушение на съоръжението или основата. Спиране на експлоатацията.

II -По непригодност за нормална експлоатация – състояние, което затруднява експлоатацията на съоръжението и основата или намалява тяхната дълговечност и изисква ремонти.

9. Оценка на мерките за укрепване на основата с оглед влиянието им върху НДС и устойчивостта на бетонните язовирни стени

№	Конструктивна мярка	Схема	I Г.С.	II Г.С.
1	Изкопи до здрава скала под цялата стена		+	0
2	Изкопи до здрава скала под въздушната стъпка		+	+
3	Изкопи до здрава скала под водната стъпка		0	-
4	Увеличаване на якостта на бетона в контакта откъм въздушната страна		+	0
5	Увеличаване на коравината на бетона по целия контакт		+	+
6	Укрепване на слаби зони и тектонски разломи		+	0
7	Укрепваща циментация на основата под цялата стена		+	-
8	Укрепваща циментация на основата под въздушната стъпка		+	+
9	Укрепваща циментация на основата под водната стъпка		0	-

ЛЕГЕНДА: + положителен ефект; - отрицателен ефект; 0 нулев ефект

9. Оценка на мерките за укрепване на основата с оглед влиянието им върху НДС и устойчивостта на бетонните язовирни стени

10	Обратен наклон на контактната фуга		0	—
11	Бетонен зъб под водната стъпка		0	—
12	Анкериране на язовирната стена откъм водната стъпка		+	+
13	Анкериране на язовирната стена откъм въздушната стъпка		0	0
14	Противофилтарционна завеса под водната стъпка		+	—
15	Изнасяне на противофилтрац. завеса пред язовирната стена		+	+
16	Понур пред язовирната стена		+	+
17	Дренажна завеса под водната стъпка		+	+
18	Дренажна завеса под въздушната стъпка		0	0

ЛЕГЕНДА: + положителен ефект; — отрицателен ефект; 0 нулев ефект

Използвана литература

Василев, В. (2001), Дисертация за присъждане на научна степен "Доктор на техническите науки" на тема: "Моделиране на напрегнатото състояние на масивни хидротехнически съоръжения по метода на крайните елементи."

Гришин, К. М. И др., (1975), *Бетонные плотины (на скальных основаниях)*, Стройиздат, Москва.

Христов, Т. и др., (1981), *Числени методи за определяне на напреженията и деформациите на хидротехническите съоръжения*, Техника, София.

Jean Bernaix, (1966), *Contribution to the study of the stability of dam supports*, Geotechnical Study of the rock of Malpasset, Ecole Polytechnique, Paris.

SOMERVILLE, S. H., M.A. PAUL, 1983. *Dictionary of Geotechnics*, Butterworths & Co Ltd, London.

JANSEN, R. B., 1988. *Advanced dam engineering*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Wahlstrom, E.E. 1974. *Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites*. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company.