

Reference:

ชินอรส ทองธรรมชาติ. 2554. การแปลผลเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนเพื่อการประเมินความปลอดภัยเขื่อน. เอกสารประกอบการอบรม "การวิเคราะห์เพื่อออกแบบและประเมินความปลอดภัยเขื่อน", ระหว่างวันที่ 5,7 และ 8 เมษายน 2554, จัดโดย ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับ Thai Geotechnical Society (TGS), ณ โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น, กรุงเทพฯ.

# การแปลผลเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เพื่อการประเมิน **ความปลอดภัย**

ชินอรส ทองธรรมชาติ

วิศวกรปฐพีอาวุโส

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

# เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน

( Dam Instruments )

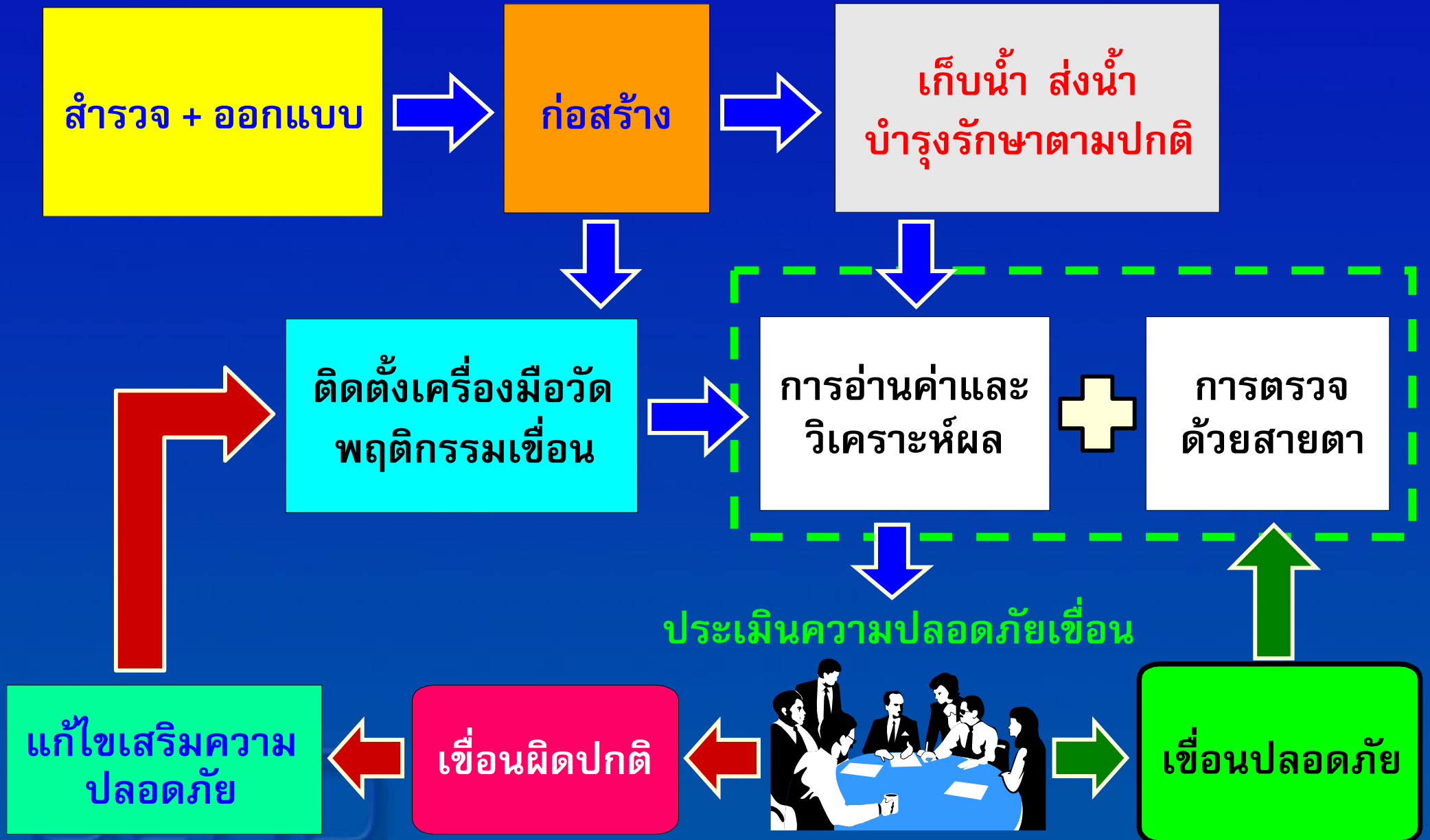
คือ เครื่องมือที่วิศวกรใช้ติดตั้งในเขื่อน ฐานราก ฐานยัน หรือ บริเวณอื่น ๆ ที่จำเป็น เพื่อติดตามพฤติกรรมที่สำคัญของเขื่อนทั้งในระหว่างการก่อสร้าง การใช้งาน ซึ่งสามารถเตือนภัยล่วงหน้าเมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นกับเขื่อน

นอกจากนั้นยังสามารถยืนยันพฤติกรรมของเขื่อนว่าใกล้เคียงกับสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบ และช่วยควบคุมพฤติกรรมในระหว่างการก่อสร้างได้อีกด้วย

GERD

วารสาร ไม้เรียง, 2538

# การประเมินความปลอดภัยของเขื่อนด้วยเครื่องมือวัด



# ความปลอดภัยเขื่อนคืออะไร

สถานะเป็นปกติ  $FS \gg 1$

การพิบัติของตัวเขื่อน (Breach)  $FS < 1.001$



# เกณฑ์การเตือนภัย



- **ระดับปกติ (Normal)** หมายถึง ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอยู่ในเกณฑ์ที่พฤติกรรมเขื่อนเป็นปกติ ให้ดำเนินการอ่านค่าและติดตามพฤติกรรมตามกำหนดการปกติ
- **ระดับเฝ้าระวัง (Alert)** หมายถึง ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอยู่ในเกณฑ์ที่พฤติกรรมเริ่มผิดปกติ ผู้อ่านค่าและติดตามพฤติกรรมจะต้องเฝ้าระวังพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอย่างใกล้ชิด มีการติดตามอ่านค่าให้ถี่ขึ้น ตรวจสอบพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องจากเครื่องมือวัดอื่นๆ เพื่อยืนยันพฤติกรรม ตรวจสอบความผิดปกติที่เกี่ยวข้องกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมืออื่นนั้น แจ้งให้ผู้บังคับบัญชาชั้นต้นทราบเพื่อวินิจฉัยสั่งการต่อไป
- **ระดับเตือนภัย (Alarm)** หมายถึง ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอยู่ในเกณฑ์ที่พฤติกรรมผิดปกติในระดับอันตราย ผู้อ่านค่าและติดตามพฤติกรรมจะต้องแจ้งให้ผู้บังคับบัญชาทราบโดยด่วนเพื่อวินิจฉัยสั่งการเตือนภัย ตรวจสอบความผิดปกติของเขื่อนเพื่อหาทางแก้ไขโดยเร็ว รายงานให้ทางฝ่ายความปลอดภัยเขื่อนทราบเพื่อร่วมวินิจฉัยทางด้านเทคนิค มีการประกาศให้ผู้ที่เกี่ยวข้องที่อยู่ในเขตอันตรายเตรียมพร้อมอพยพเคลื่อนย้ายได้ทันทีเมื่อมีการสั่งการ
- **ระดับอพยพหนีภัย (Action)** หมายถึง ค่าที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์อันตรายอาจนำไปสู่การพิบัติได้ ประกอบกับการตรวจสอบเขื่อนด้วยตาพบข้อบ่งชี้ที่เป็นอันตราย ผู้ที่รับผิดชอบจะต้องรายงานด่วนให้ผู้บังคับบัญชาที่มีอำนาจสั่งการในการอพยพผู้ที่อยู่ในเขตอันตรายหนีภัยไปอยู่ในที่ปลอดภัยที่จัดเตรียมไว้ คงเหลือไว้เฉพาะผู้ที่มีหน้าที่ปฏิบัติงานเพื่อกู้สถานการณ์เท่านั้น 5





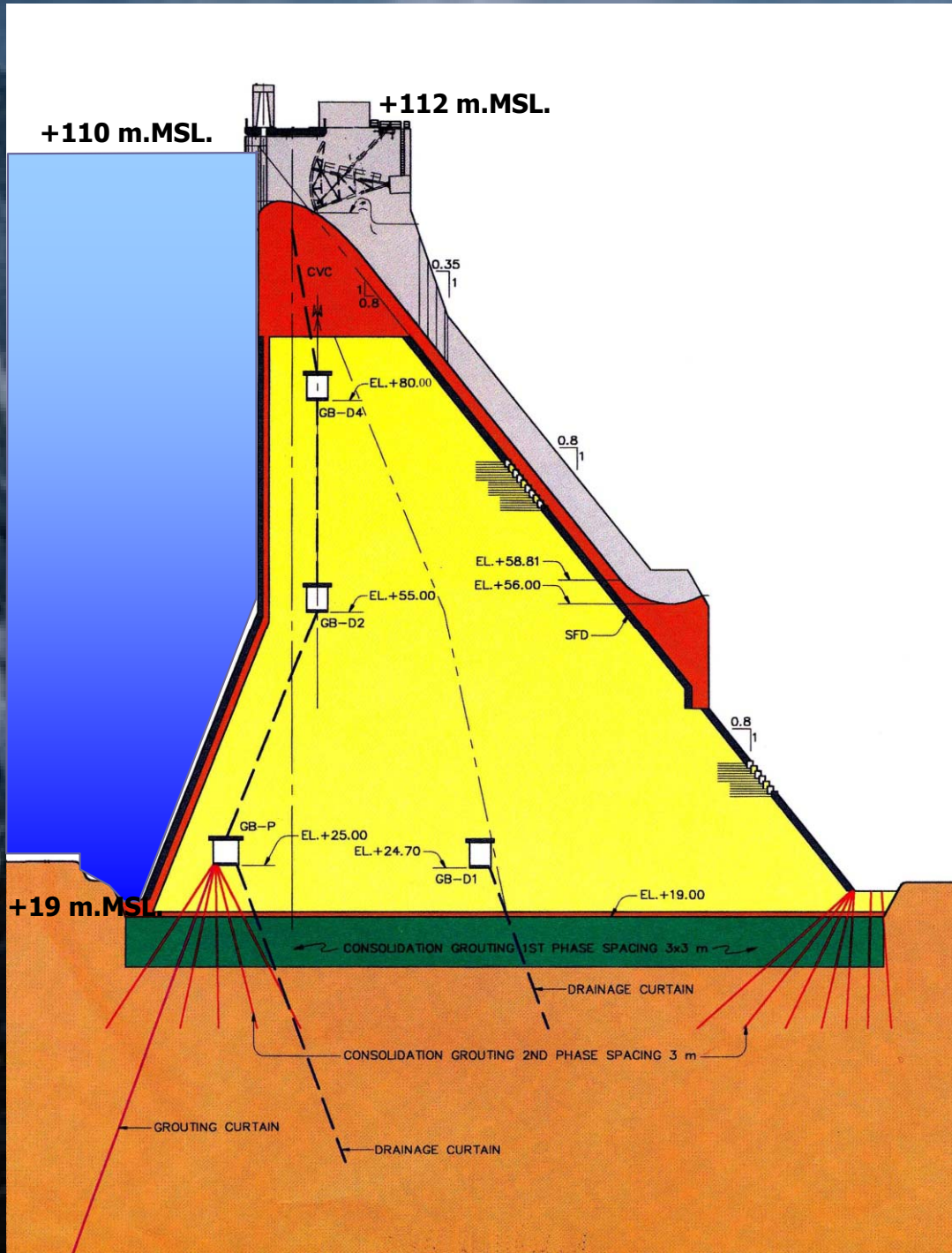
# กรณีศึกษา

เขื่อนคลองท่าด่าน อันเนื่องมาจาก  
พระราชดำริ

(เขื่อนขุนด่านปราการชล)  
09/29/2005



# Dam Section



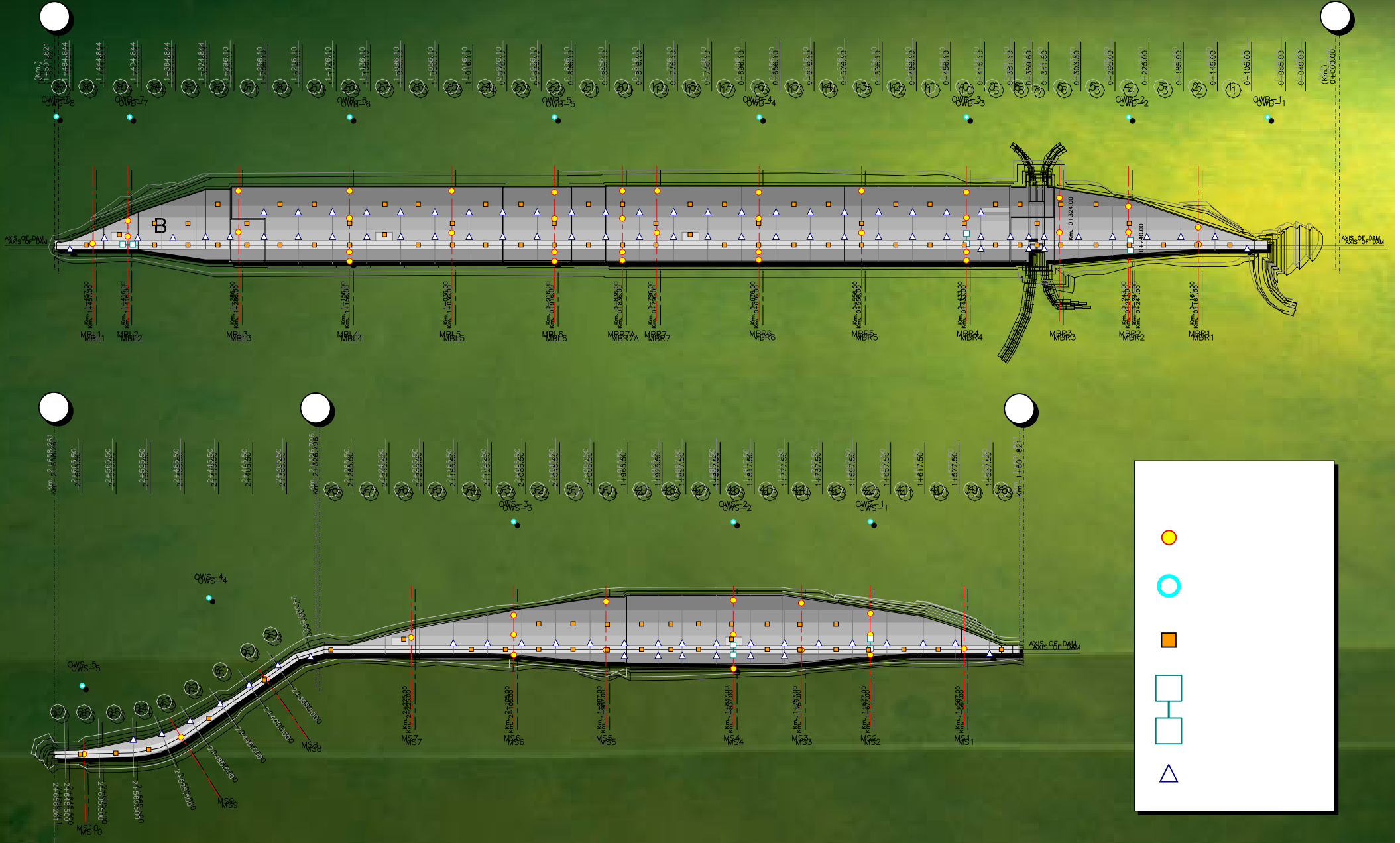


# สรุปผลงานติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน

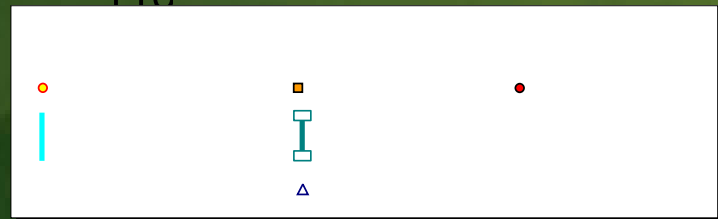
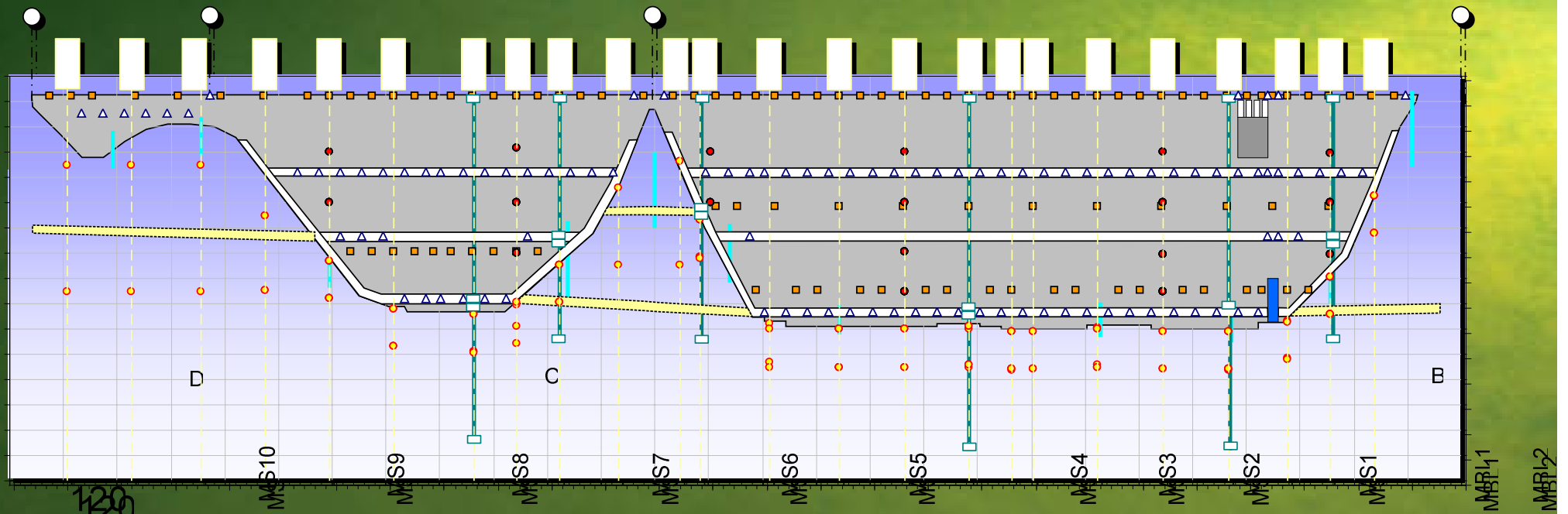
เครื่องมือวัด	จำนวนการติดตั้ง	
	RCC Dam	Saddle Dam
• <b>กลุ่มเครื่องมือวัดความดันน้ำ</b>		
– Piezometer	106	18
– Observation Well	13	6
• <b>กลุ่มเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว</b>		
– Pendulum (Inverted & Direct)	12	-
– Jointmeter	100	-
– Level & Position Survey Station	200	-
– Permanent Benchmark	7	8
– Inclinometer	-	2
– Surface Monument	-	19
• <b>กลุ่มเครื่องมือวัดอุณหภูมิ</b>		
– Thermocouple	139	-



# Plan View



# Profile



(MSL)

70  
60  
50

$T_{SL}^{D2}$

$G_{SS}^{D4}$

$G_{SS}^{D2}$

$T_{SB}^{D3}$

# พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับเขื่อนคอนกรีตบดอัด



## พฤติกรรมเขื่อนคอนกรีตบดอัด

### พฤติกรรมการไหลซึม และแรงดันน้ำ

- Piezometer
- Seepage Flowmeter
- Observation well

- ปริมาณการไหลซึม
- แรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อน
- ความมั่นคงของเขื่อน

### พฤติกรรมการเคลื่อนตัว

- Pendulum
- Jointmeter
- Survey Station

- การเคลื่อนตัวของเขื่อน
- ความมั่นคงของเขื่อน

### พฤติกรรมด้านอุณหภูมิ

- Thermocouple

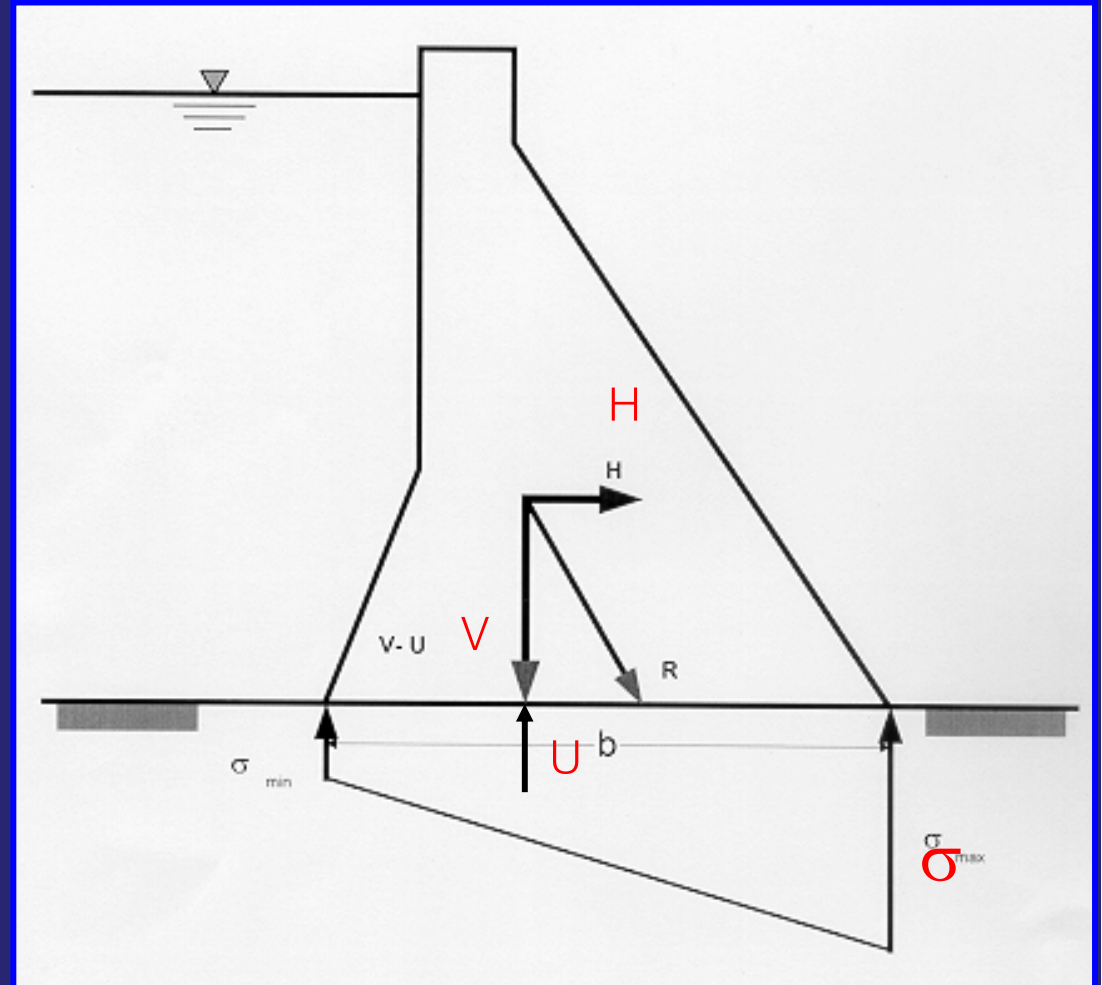
- อุณหภูมิในตัวเขื่อน

# Design concepts for stability of dam

$$SFS = \frac{Ac + (V - U) \cdot \tan \phi}{H}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\Sigma V}{b} + \frac{6M}{b^2} < FS f'_c$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\Sigma V}{b} - \frac{6M}{b^2} > 0$$

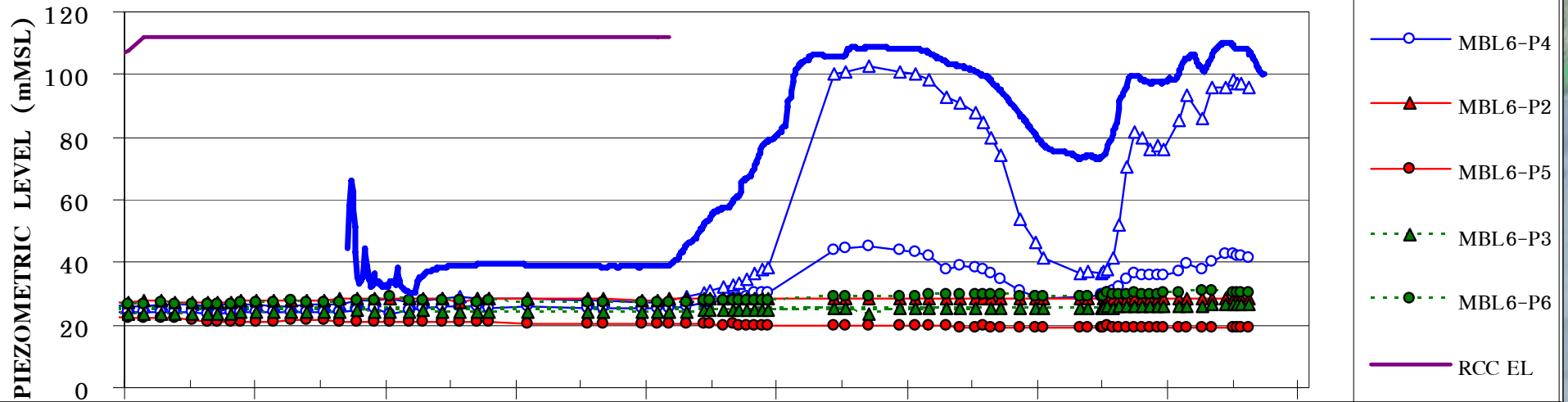




# ความดันน้ำใต้ฐานเขื่อน

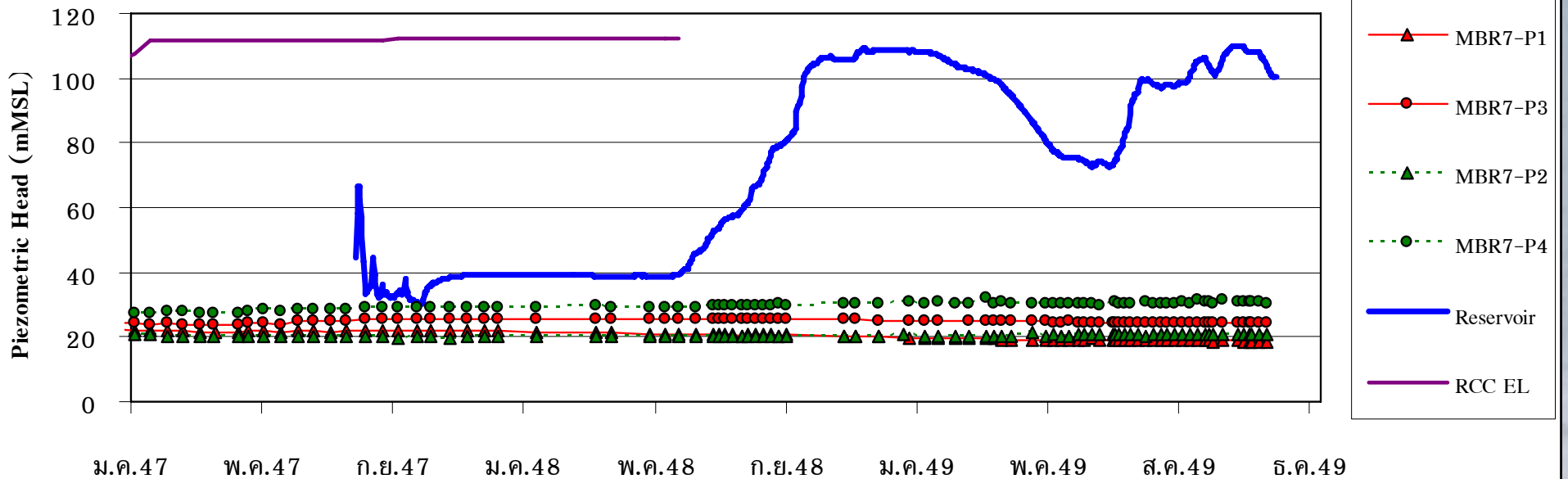
PIEZOMETRIC LEVEL VS. TIME

INSTRUMENT SECTION MBL6 at KM. 0+916

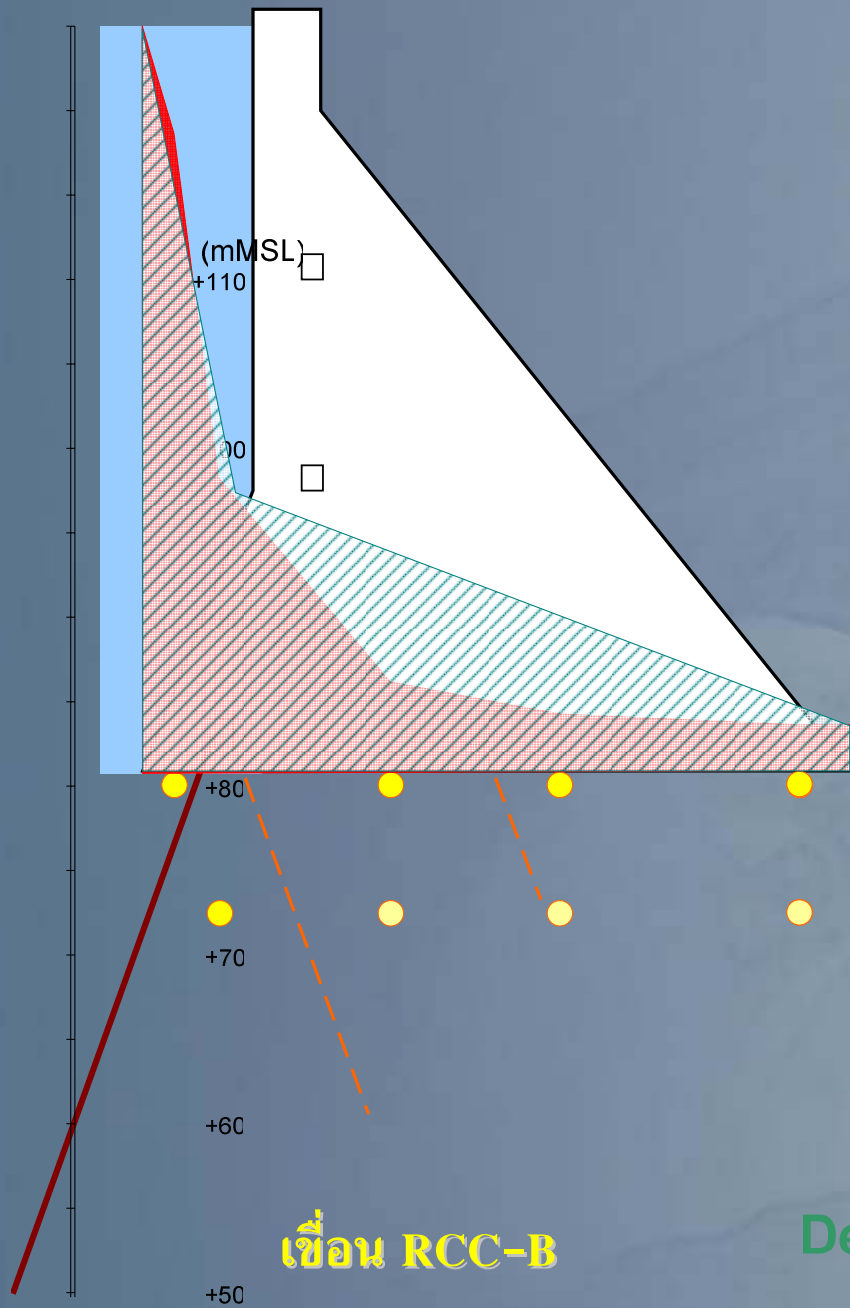


PIEZOMETRIC HEAD VS. TIME

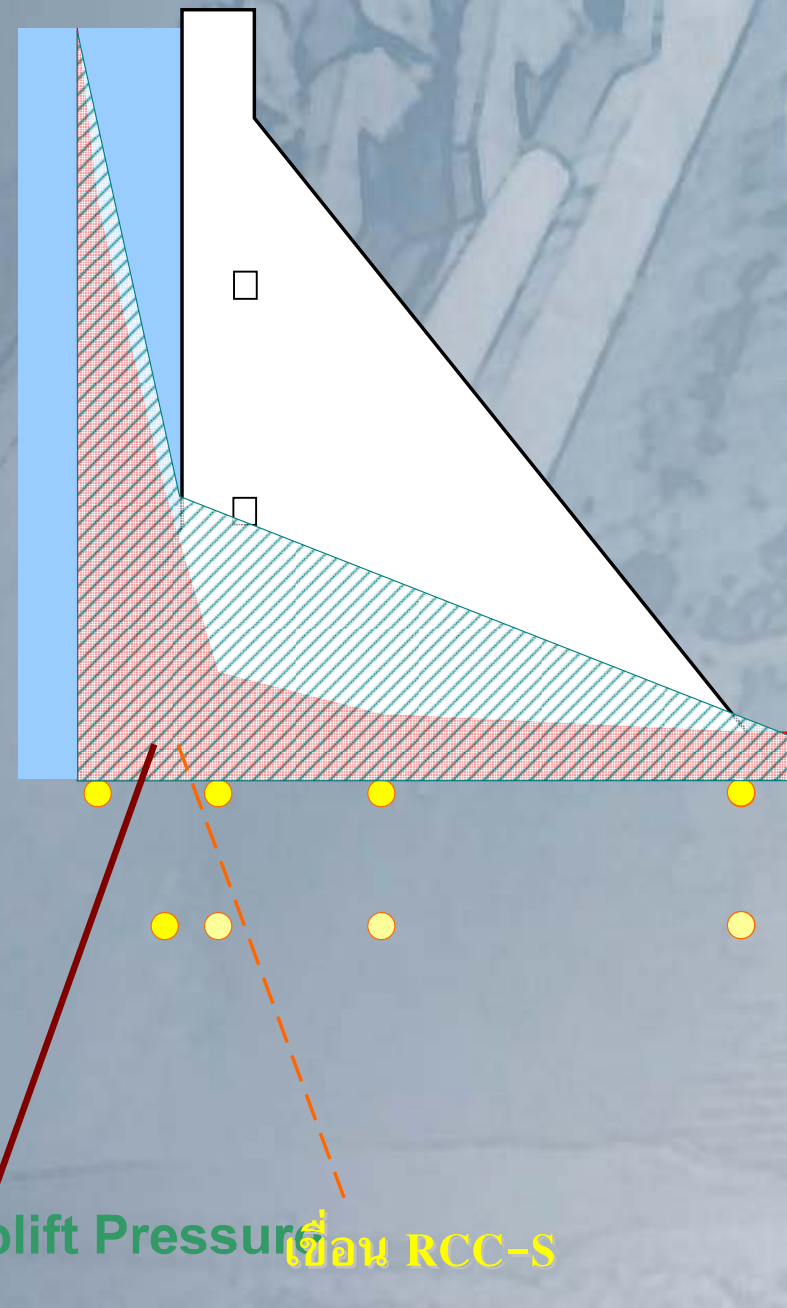
INSTRUMENT SECTION MBR7 at KM. 0+796



# พฤติกรรมแรงดันน้ำ



Design Uplift Pressure



# แรงดันลอยตัวใต้ฐานเขื่อน หน้าตัด MBL6

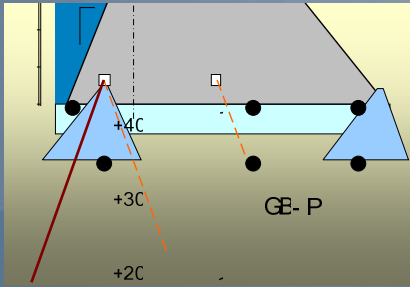
วันที่อ่านค่า	ระดับน้ำ (ม.รทก.)	แรงลอยตัว (ตัน/เมตร)		FSS*		FSO*	
		ผลการ ตรวจวัด	การ ออกแบบ	ผลการ ตรวจวัด	การ ออกแบบ	ผลการ ตรวจวัด	การ ออกแบบ
28 ต.ค. 48	+105.9	1,140	1,850	3.4	2.4	2.5	2.0
29 พ.ย. 48	+108.7	1,068	1,922	3.2	3.0	2.3	2.0
08 ก.พ. 49	+104.0	992	1,808	3.6	3.3	2.7	2.1
24 ก.ค. 49	+95.8	709	1,690	4.4	4.1	3.5	2.5
24 ธ.ค. 49	+109.8	1,070	1,980	3.1	2.9	2.3	1.9

หมายเหตุ : FSS เป็นอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถล (Factor of Safety against Sliding)

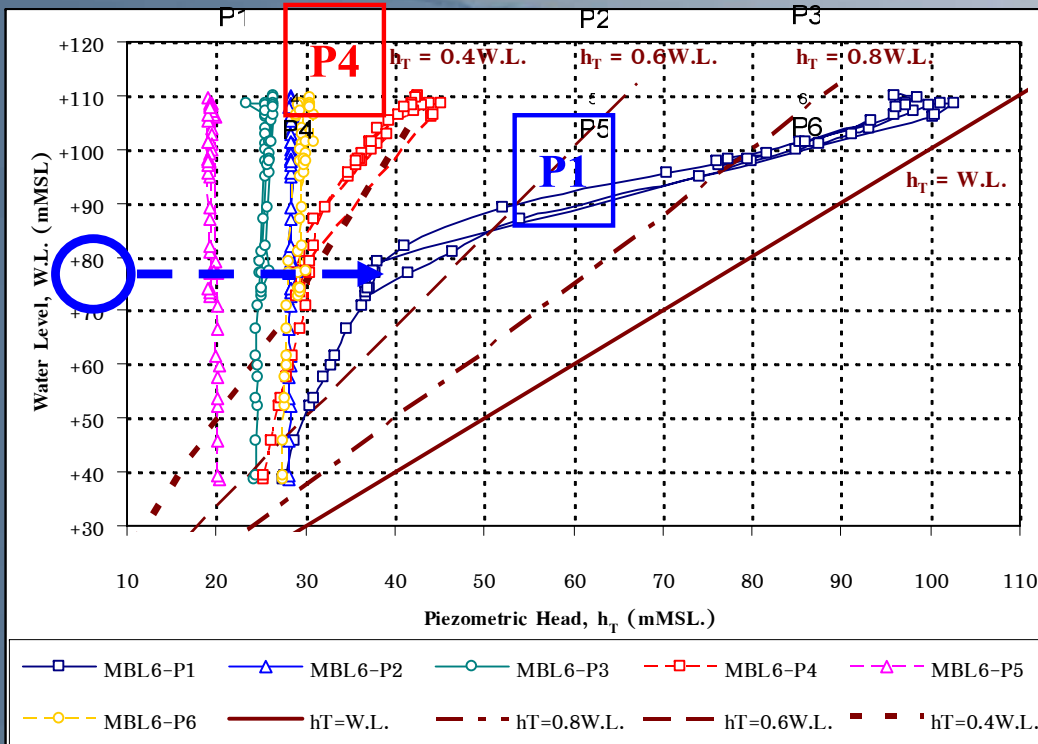
FSO เป็นอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ (Factor of Safety against Overturning)



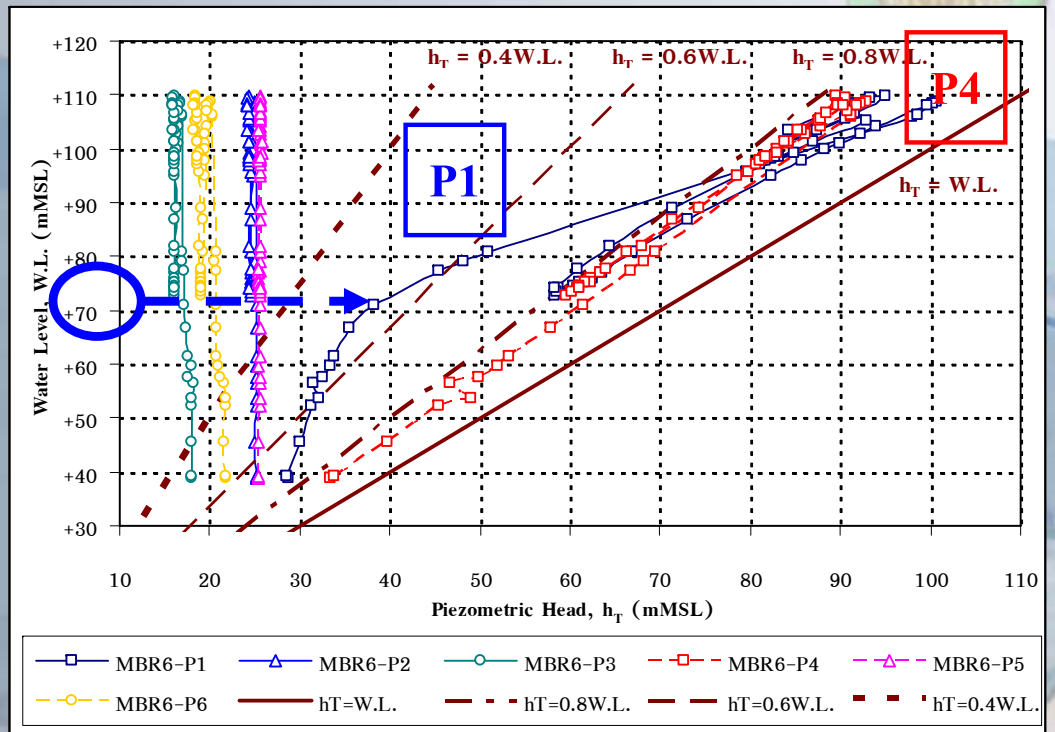
# แรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อนกับระดับน้ำเก็บกัก



GE-D1



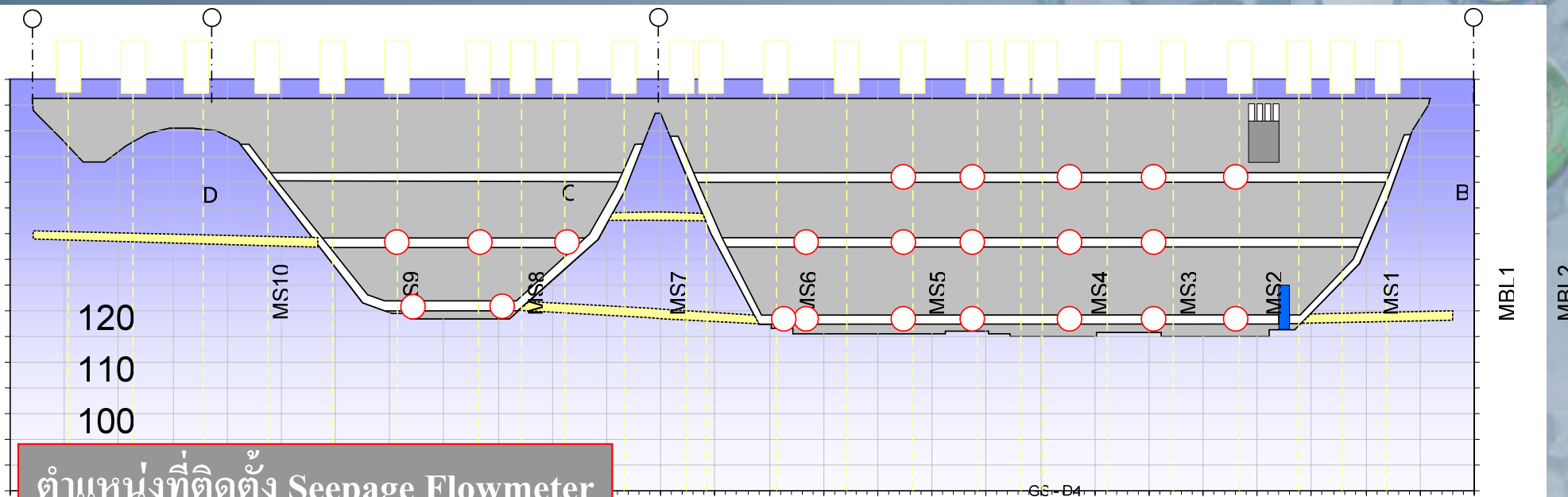
## MBL 6



## MBR 6

- ✓ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำชัดเจนที่ Upstream Zone เมื่อระดับน้ำในอ่าง > +80 mMSL
- ✓ มีอากาศค้างหลงเหลือบริเวณหน้าตัด MBL6-P1 (กราฟเป็นเส้นโค้ง)
- ✓ ประสิทธิภาพการปิดกั้นของม่านอัดฉีดน้ำปูน MBL6 ดีกว่า MBR6 (MBL6-P4 สูญเสียศักย์มากกว่า MBR6-P4)

# การไหลซึมผ่านตัวเชื่อมและฐานราก

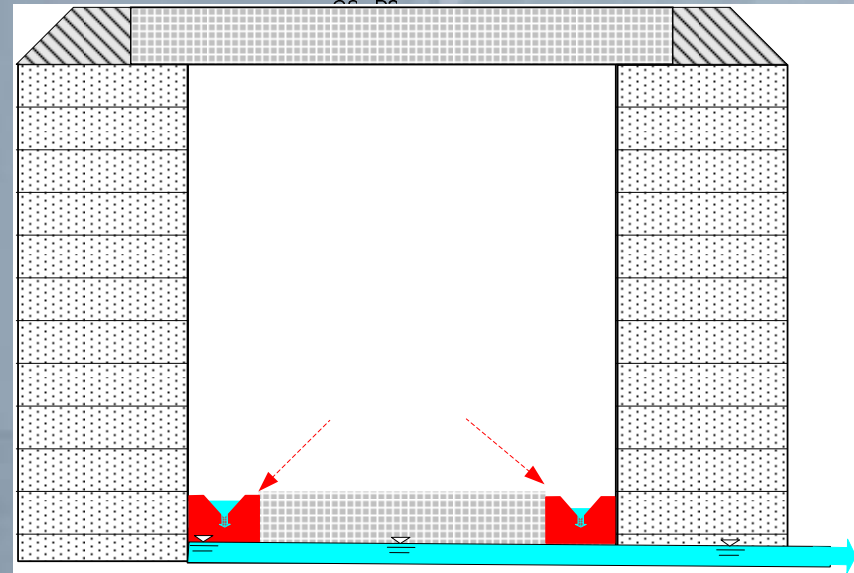
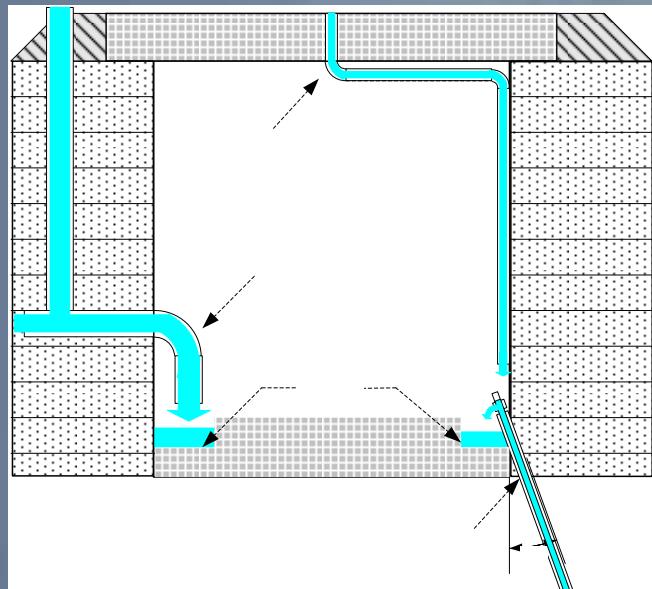


ตำแหน่งที่ติดตั้ง Seepage Flowmeter

TSB - D3

Elevation (mMSL)

80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0  
-10  
-20  
-30



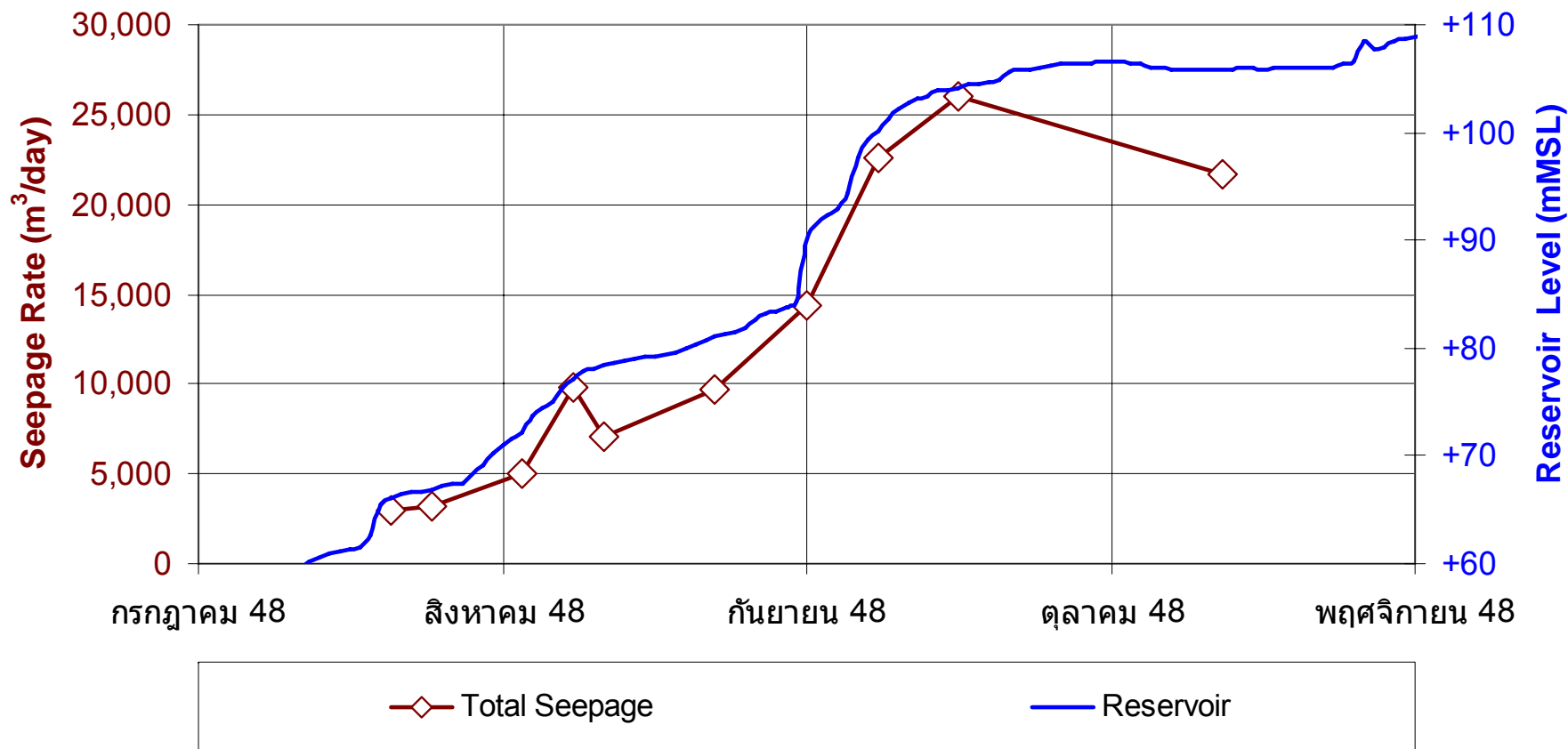
17



# อัตราการไหลซึมรวมทั้งผ่านตัวเขื่อนและผ่านฐานราก



## อัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากในช่วงเก็บน้ำปีแรก

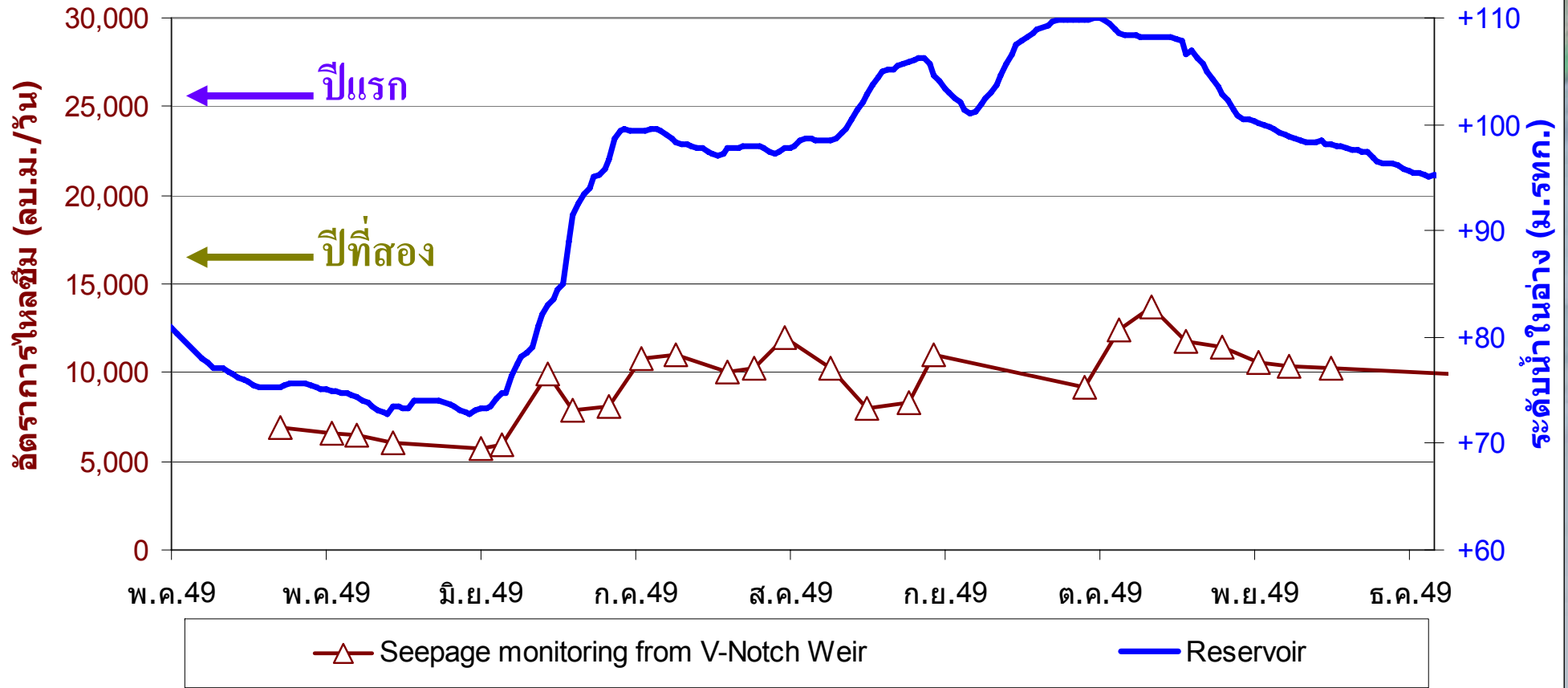


ปีแรกของการเก็บกักน้ำ

# การไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก



**อัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากในช่วงเก็บน้ำปีที่สอง**



## ปีที่สองของการเก็บกักน้ำ

\* 15 % ของปริมาณการไหลซึมทั้งหมดไม่ได้ถูกตรวจวัดผ่าน Seepage Flowmeter เนื่องจากมีจำนวนที่ติดตั้งไม่เพียงพอตลอดแนวเขื่อน

**A**



**B**

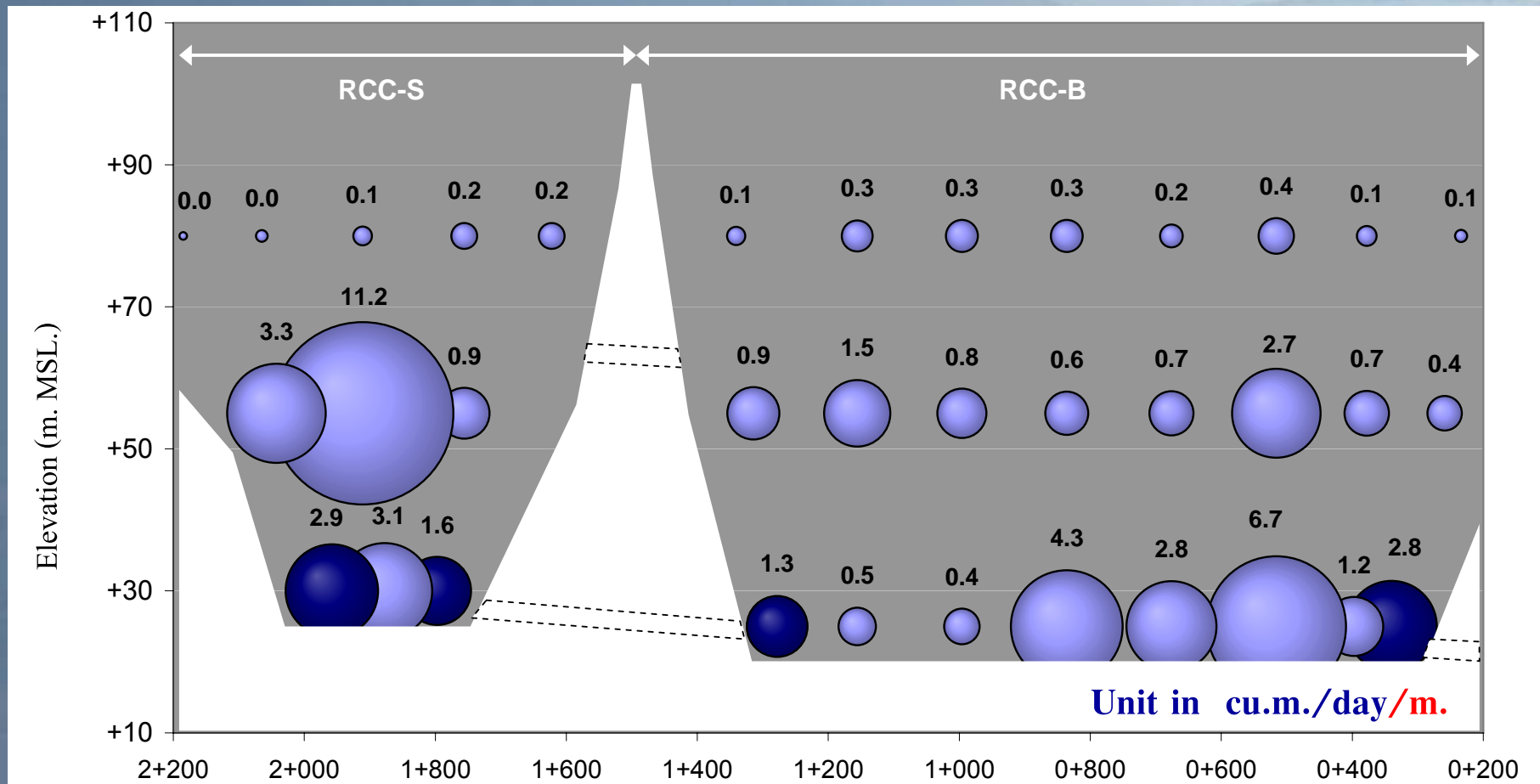




# Distribution on seepage flows



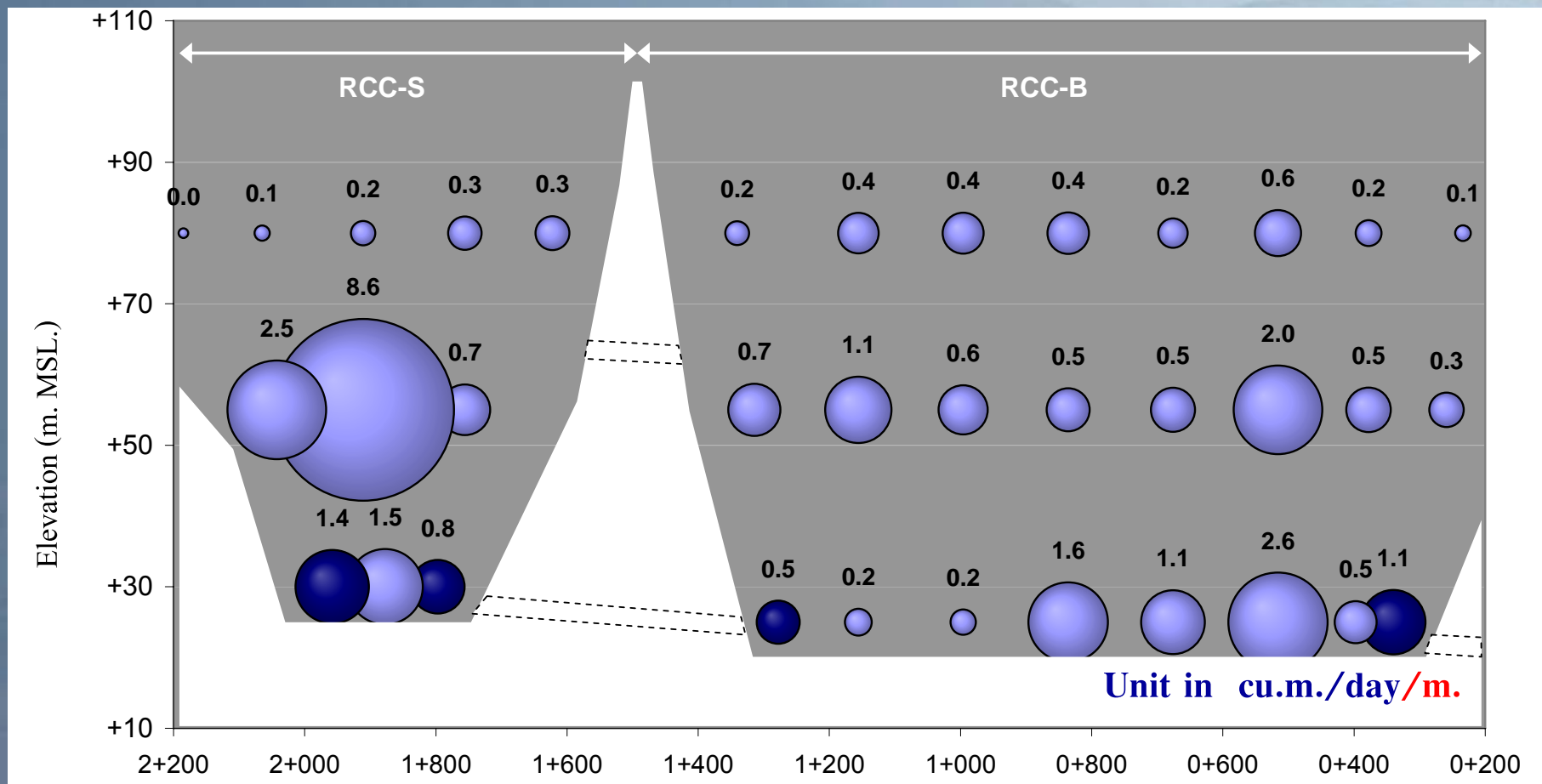
## FIRST YEAR IMPOUNDING



# Distribution on seepage flows



## SECOND YEAR IMPOUNDING



# ตัวอย่างเกณฑ์เตือนภัย



ชนิดเครื่องมือวัด	เกณฑ์เฝ้าระวัง	เกณฑ์เตือนภัย	เกณฑ์อพยพหนีภัย
Piezometer (ได้วิเคราะห์หาแรงดันลอยตัวและอัตราส่วนปลอดภัยของตัวเชื่อม)	$FSS \leq 3$ $FSO \leq 2$	$FSS \leq 1.5$ $FSO \leq 1.5$	$FSS \leq 1.1$ $FSO \leq 1.1$
Seepage Flowmeter (ปริมาณการไหล ม. <sup>3</sup> /วัน/ม.)	$GB-P \geq 3.8$ $GB-D1 \geq 0.7$ $GB-D2 \geq 0.5$ $GB-D4 \geq 0.3$ $GS-P \geq 2.0$ $GS-D2 \geq 0.5$ $GS-D4 \geq 0.3$	$GB-P \geq 19.7$ $GB-D1 \geq 4.1$ $GB-D2 \geq 4.2$ $GB-D4 \geq 1.3$ $GS-P \geq 8.2$ $GS-D2 \geq 4.2$ $GS-D4 \geq 1.3$	$GB-P \geq 39.4$ $GB-D1 \geq 8.2$ $GB-D2 \geq 8.4$ $GB-D4 \geq 2.6$ $GS-P \geq 16.4$ $GS-D2 \geq 8.4$ $GS-D4 \geq 2.6$

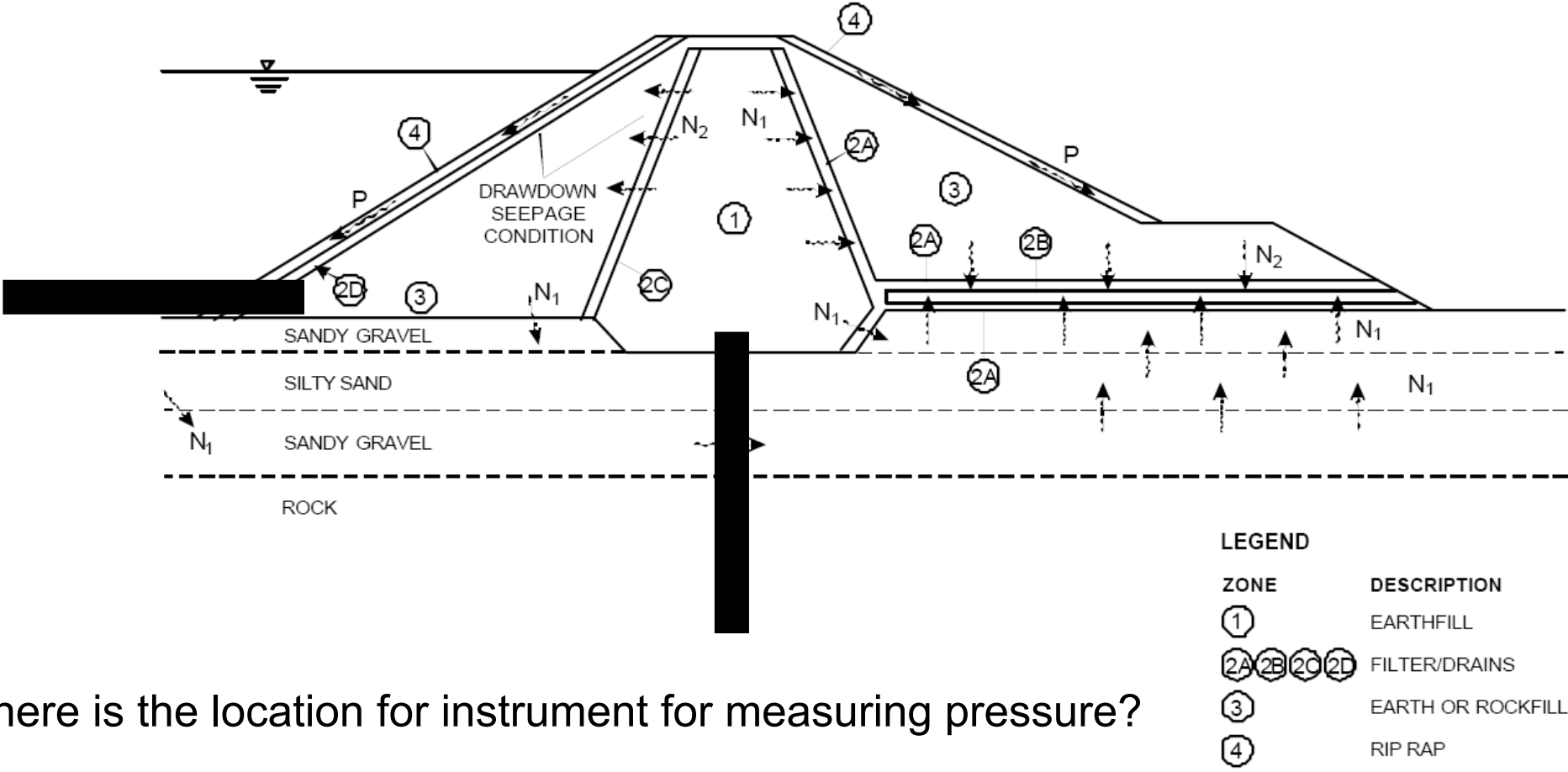


# กรณีศึกษา

เขื่อนดินถมหินถม



# Question

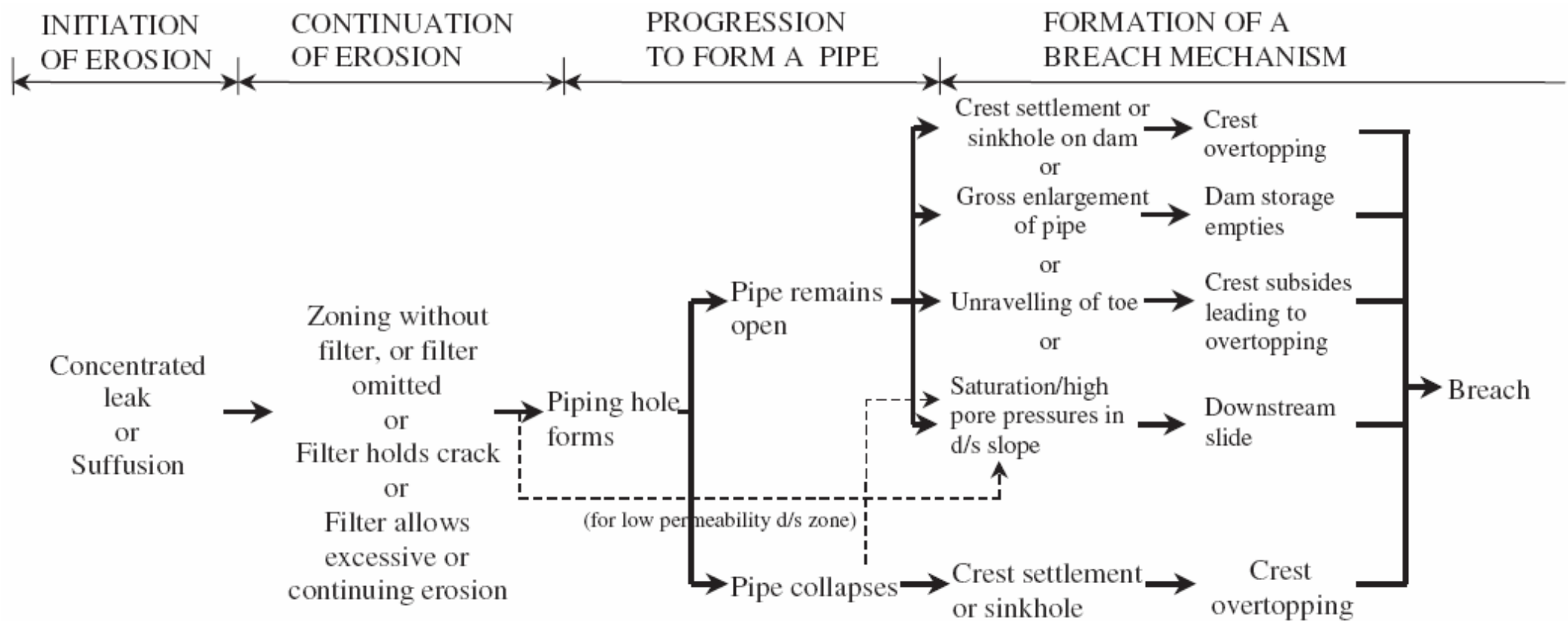


Where is the location for instrument for measuring pressure?

# Clip Video



# System Responses of Embankment dam



# Critical Hydraulic Gradient

Khilar, Folger and Gray (1985)

$$i_c = \frac{\tau_c}{2.878\gamma_w} \left(\frac{n_0}{K_0}\right)^{1/2}$$

When  $i_c$  Critical Hydraulic Gradient

$\tau_c$  Critical tractive shear stress (0.2 - 20 dynes/cm<sup>2</sup>)  
for clay is related to PI, LL (Wan and Fell, 2004)  
for nonerodible soil if  $\tau_c > 10$  dynes/cm<sup>2</sup>

$n_0$  Initial porosity

$K_0$  Intrinsic permeability

for  $k = 10^{-5}$  cm/sec,  $K = 10^{-10}$  cm<sup>2</sup>



# Hydraulic Fracturing

Duncan and Seed (1981)

$$u_f < \sigma_3 + t_s$$

where

$\sigma_3$       minor principle stress

$t_s$         tensile strength of the soil

$u_f$         hydraulic fracturing pressure

# Dam Instrument Section

Construction Period: 1973-1978

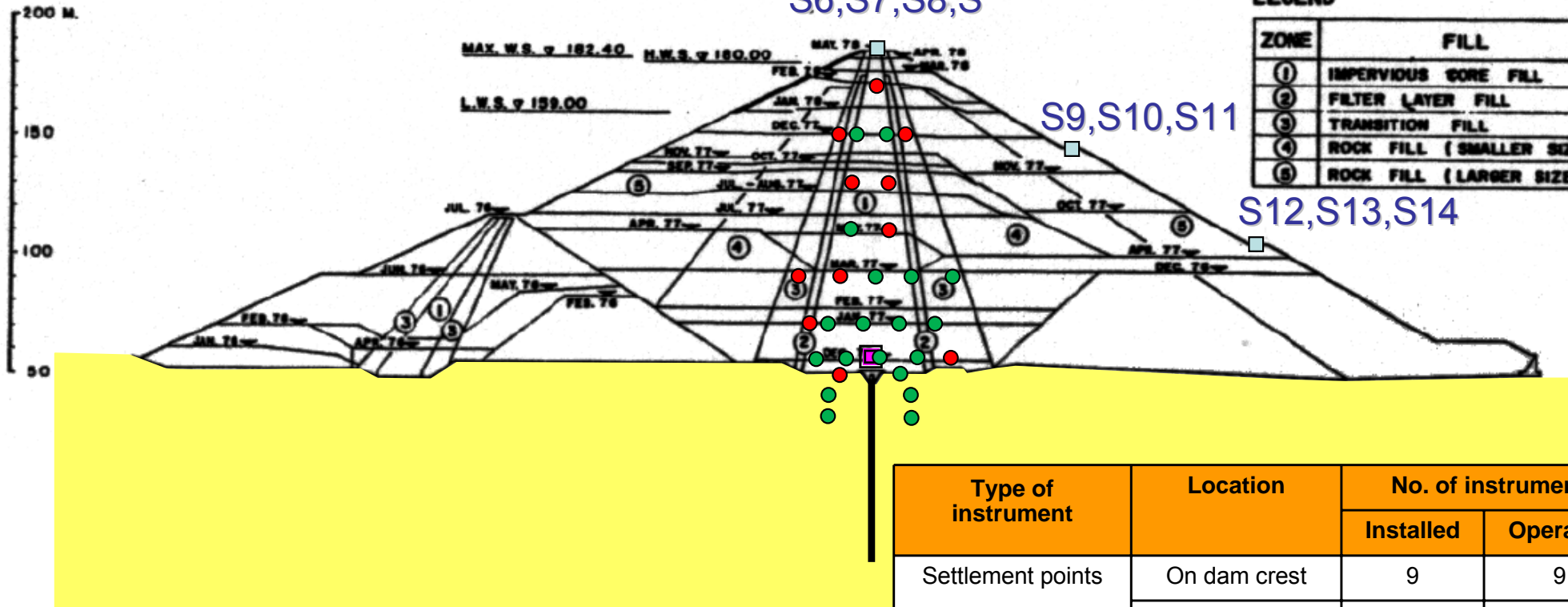
S1,S2,S3,S4,S5,  
S6,S7,S8,S\*

S9,S10,S11

LEGEND

ZONE	FILL
①	IMPERVIOUS SORE FILL
②	FILTER LAYER FILL
③	TRANSITION FILL
④	ROCK FILL (SMALLER SIZE)
⑤	ROCK FILL (LARGER SIZE)

S12,S13,S14



**Settlement points**



**Operating Piezometers**



**Non-operating Piezometers**

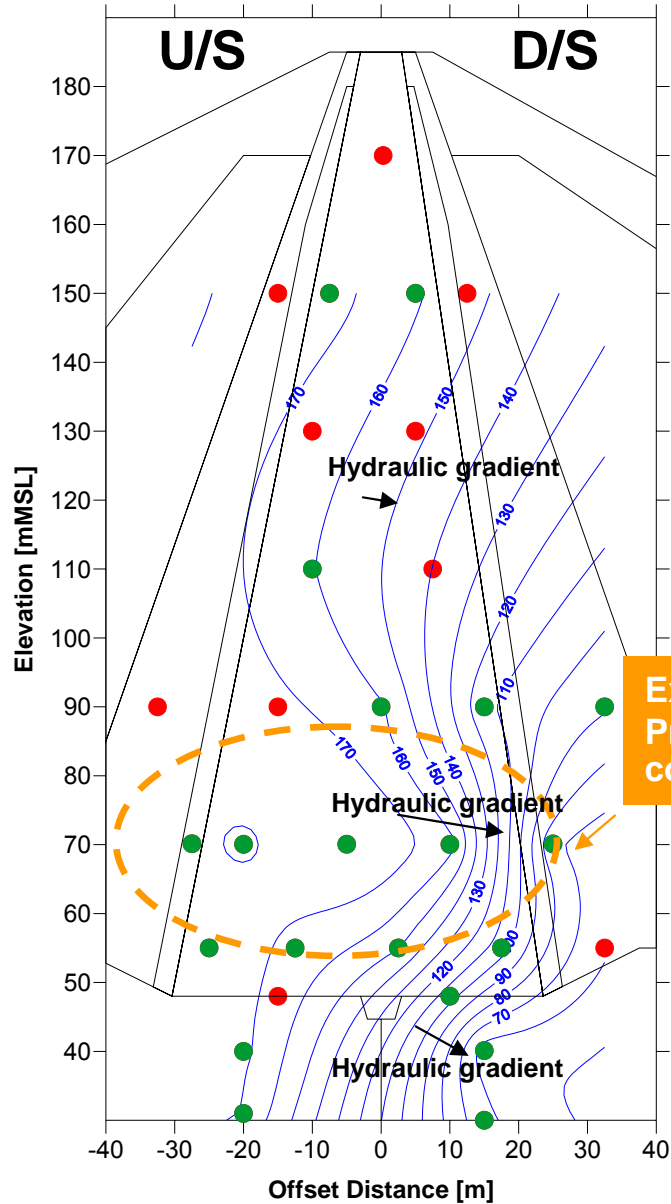


**V-Notch weir**

Type of instrument	Location	No. of instrument	
		Installed	Operated
Settlement points	On dam crest	9	9
	On downstream berms	6	6
Pore pressure transducers	Sta. 19+00	30	10
Additional pressure cells	Downstream of grouting curtain	32	14
Open standpipe piezometers	Downstream of clay core	5	5
V-notch weirs	Gallery	10	10

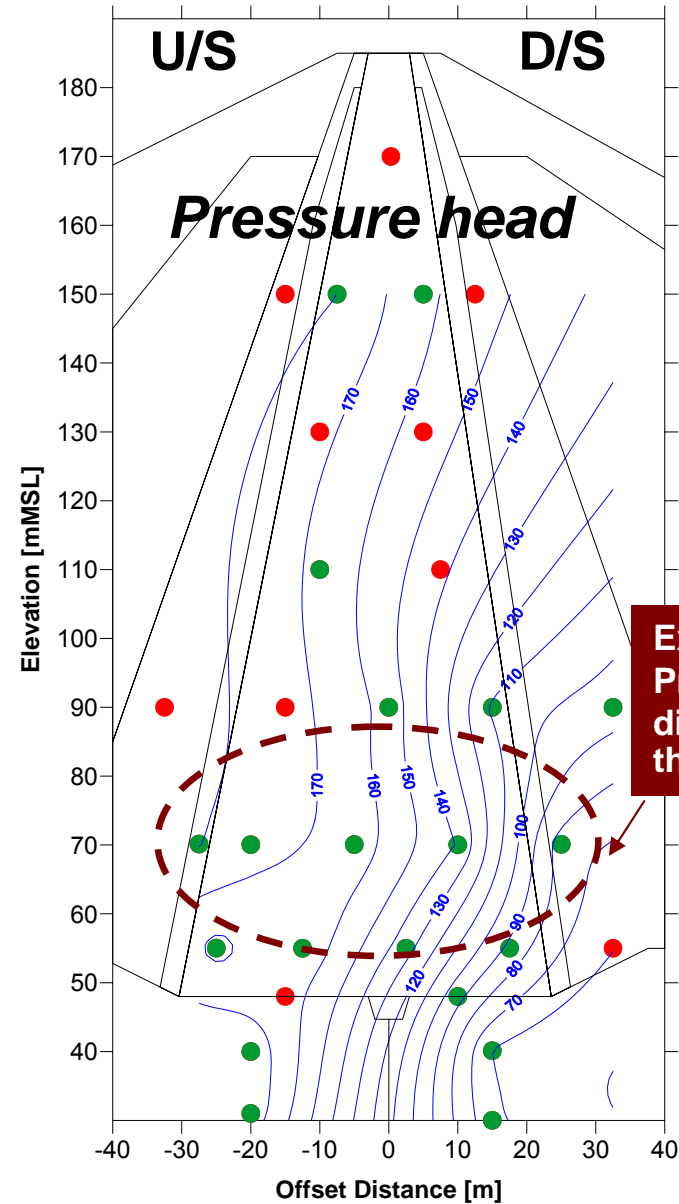
# Pore pressure contour

1982



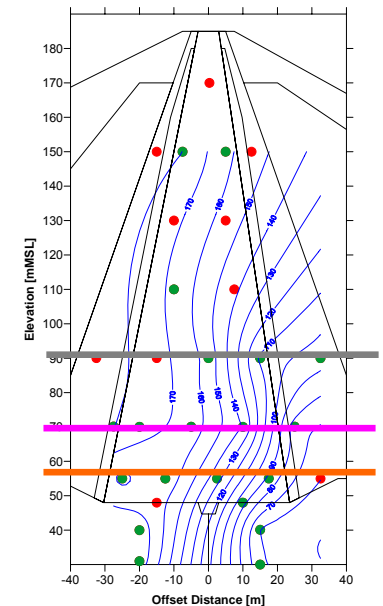
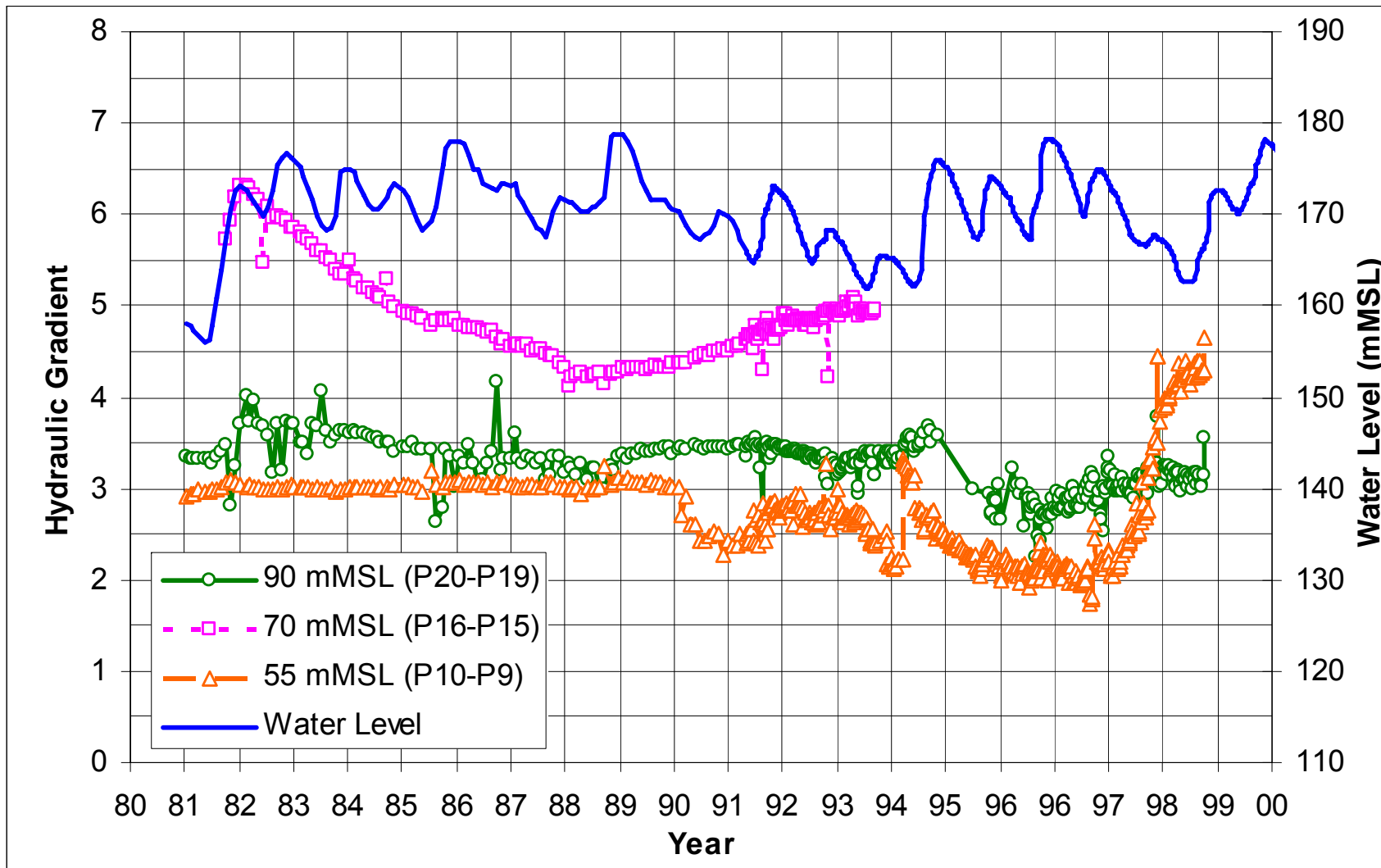
Excess Pore Pressure due to compaction

1988



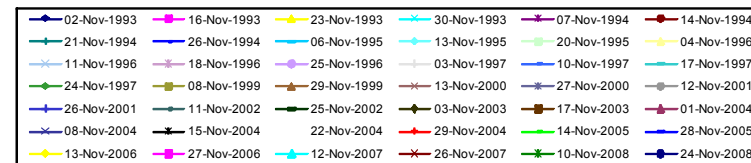
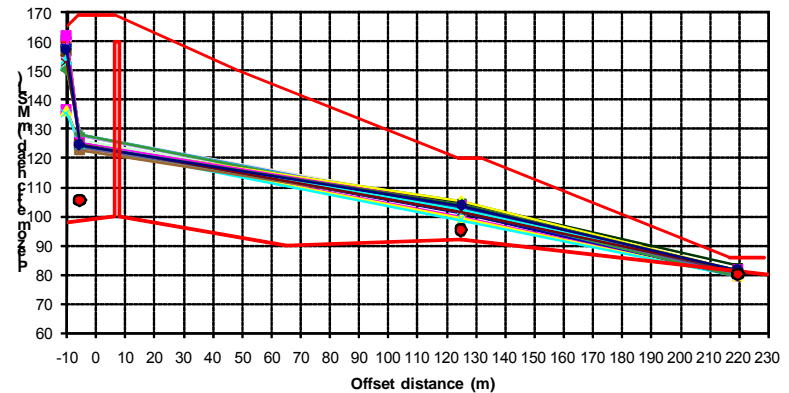
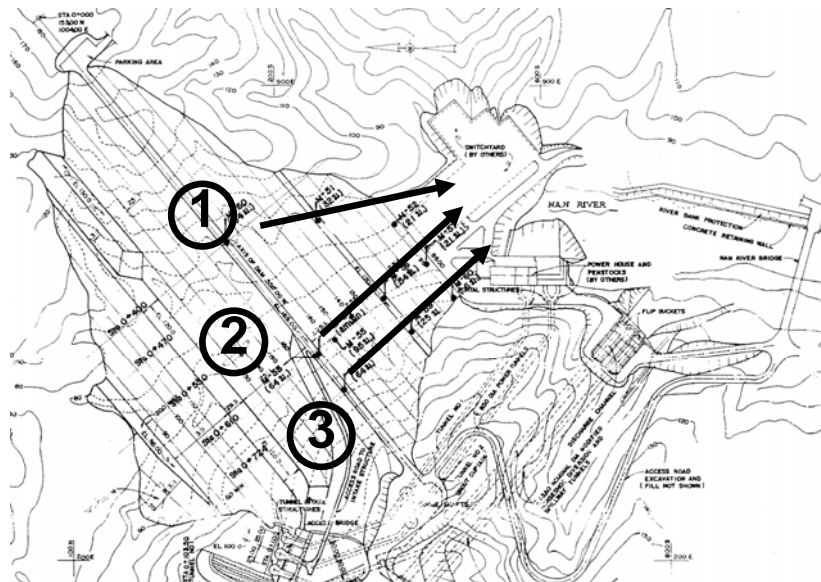
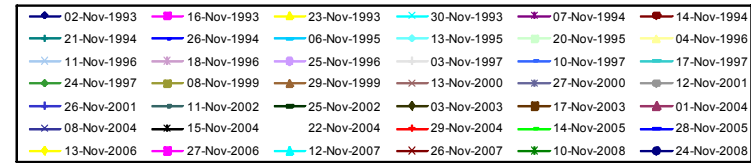
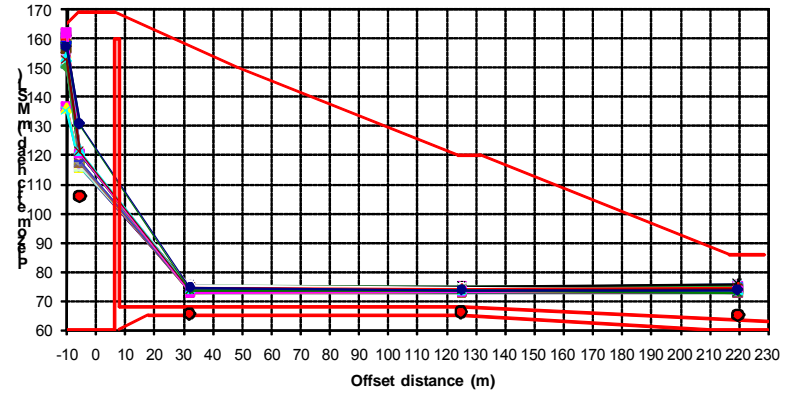
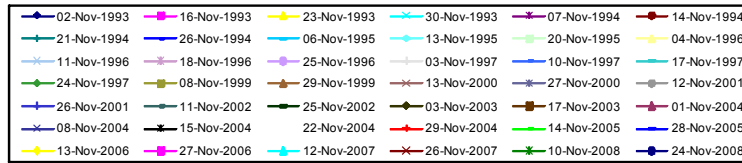
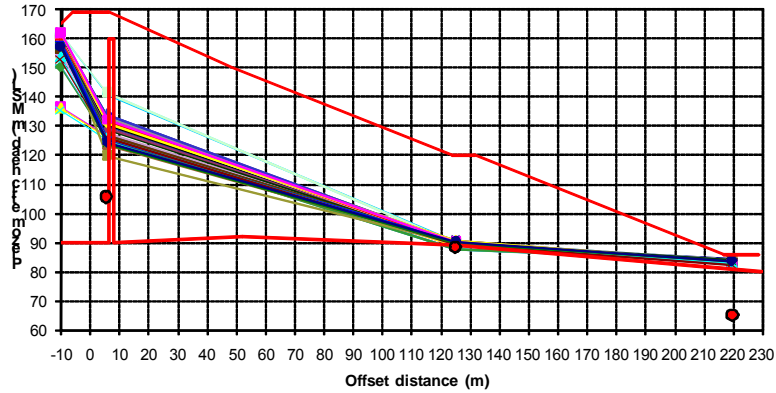
Excess Pore Pressure dissipate through filter

# Hydraulic Gradient



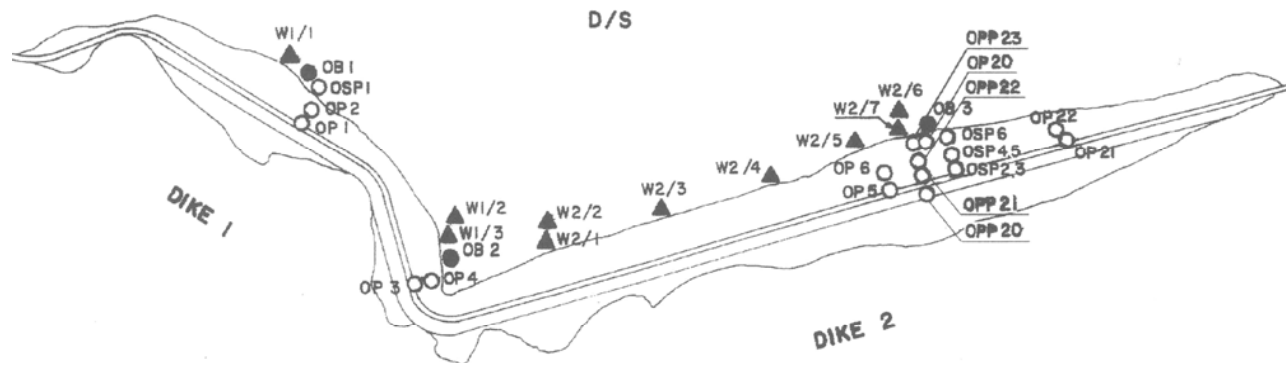
- At elevation of +70 mASL of clay core, the hydraulic gradient equaled to 6 in 1981 and it decrease with time and stable in 1988.
- At dam base (+55 mASL) and mid-height (+90 mASL) , the hydraulic gradient tended to be stable in range of 3.5 and 3 respectively.

# เส้นระดับน้ำในตัวเขื่อน

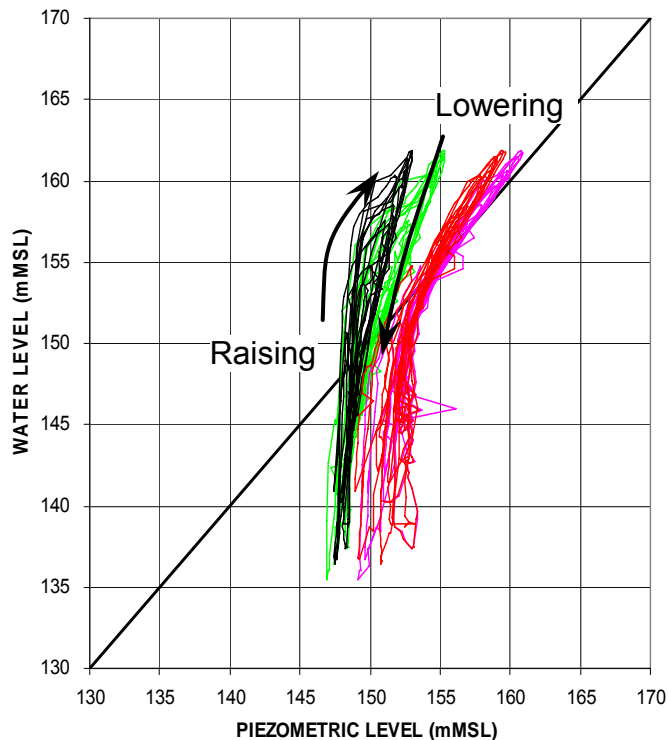


เส้นระดับน้ำในตัวเขื่อน ในช่วงเก็บน้ำไว้สูงของทุกปี

# ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกักกับความสูงของระดับน้ำในตัวเขื่อน

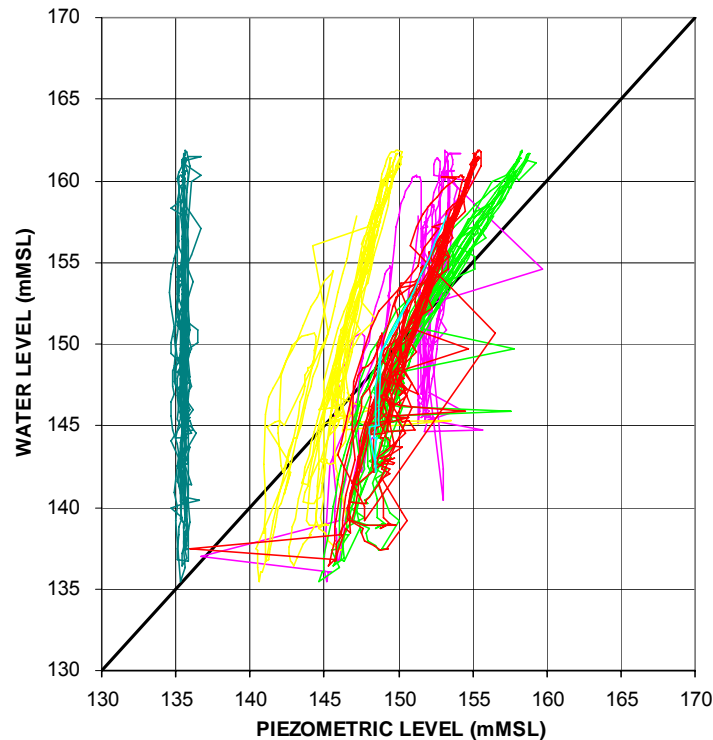


SADDLE DIKES  
OPEN STANDPIPEPIEZOMETER DIKE NO.1



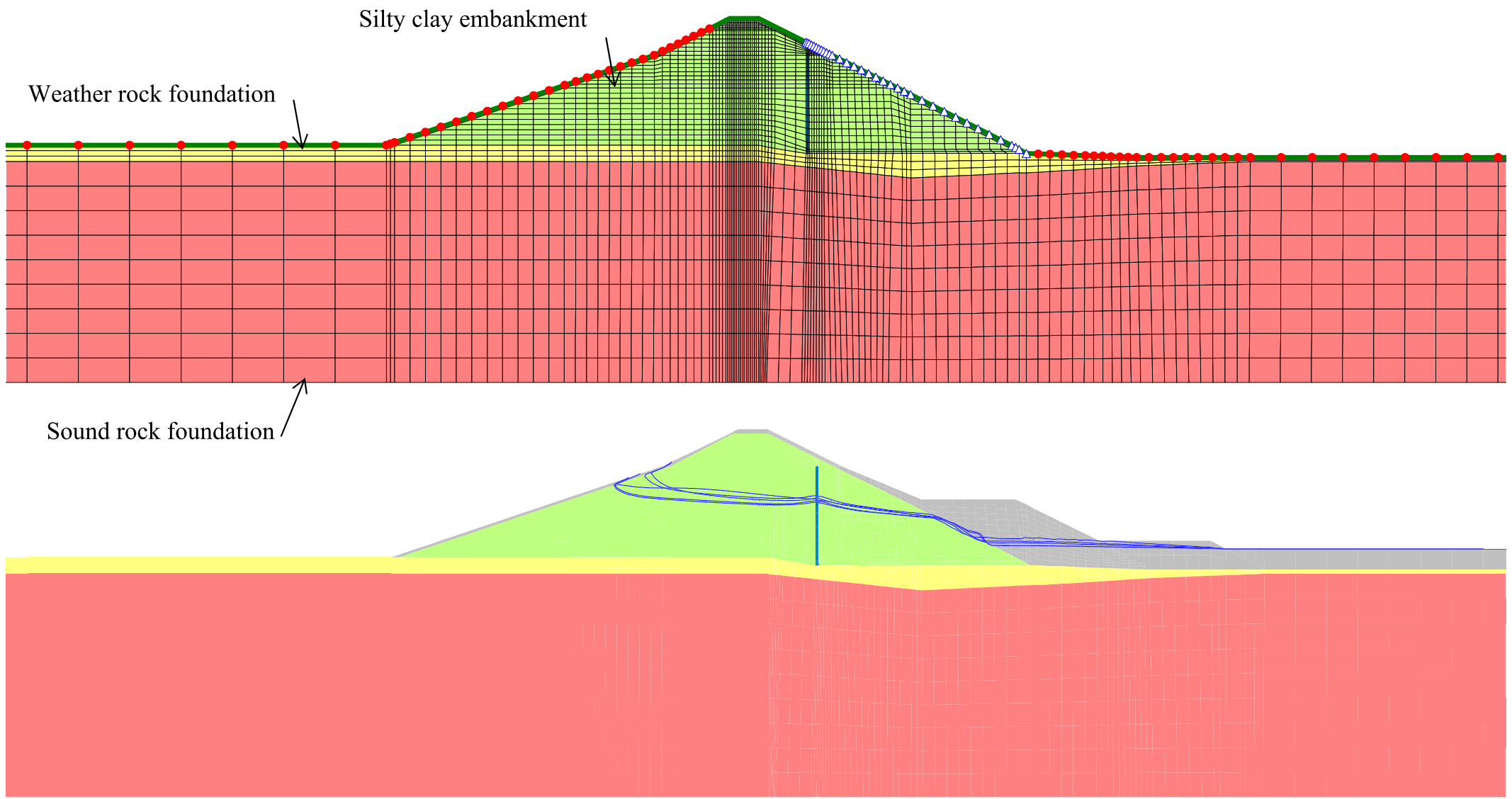
— OP - 1 — OP - 2 — OP - 3 — OP - 4

SADDLE DIKES  
OPEN STANDPIPEPIEZOMETER DIKE NO.2



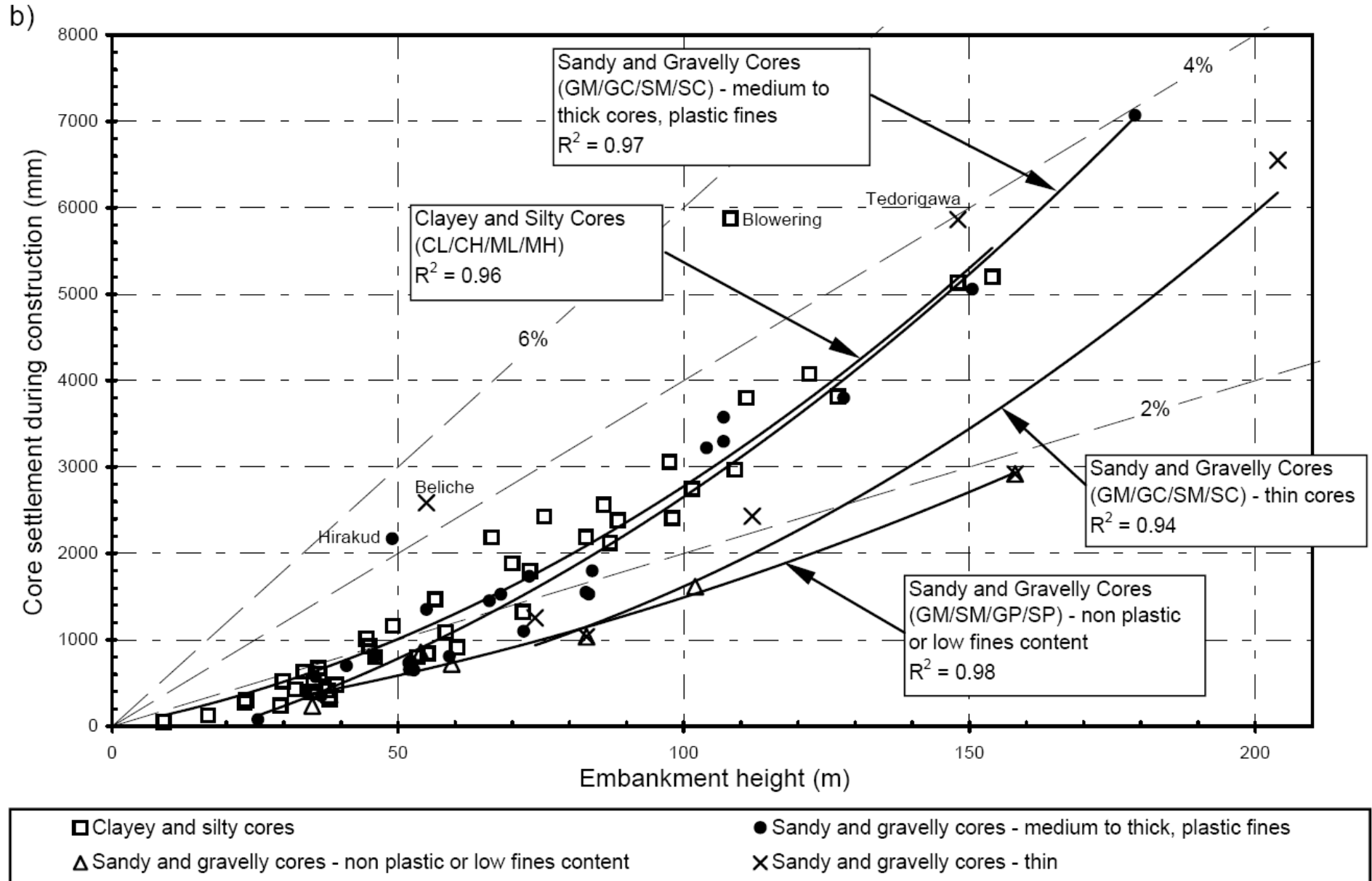
— OP - 5 — OP - 6 — OP - 21 — OP - 22 — OP - 23 — OP - 20

ความดันน้ำในฐานรากเขื่อนหลายจุดมีสัมพันธ์กับระดับเก็บกักน้ำจาก OP และ OSP ซึ่งแสดงว่าถ้าระดับน้ำอยู่สูงกว่า +150 ม.รทก. ความดันน้ำจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับเก็บกักน้ำ ในช่วงที่ระดับน้ำยกขึ้นจะมีความดันน้ำต่ำกว่า ช่วงที่ระดับน้ำลดลง และในหลายจุดเห็นว่ามี ความดันน้ำที่ใกล้กับระดับน้ำที่เก็บกักอยู่ (เส้นกราฟมีความชันเท่ากับหนึ่ง) จุดดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิด Hydraulic fracturing



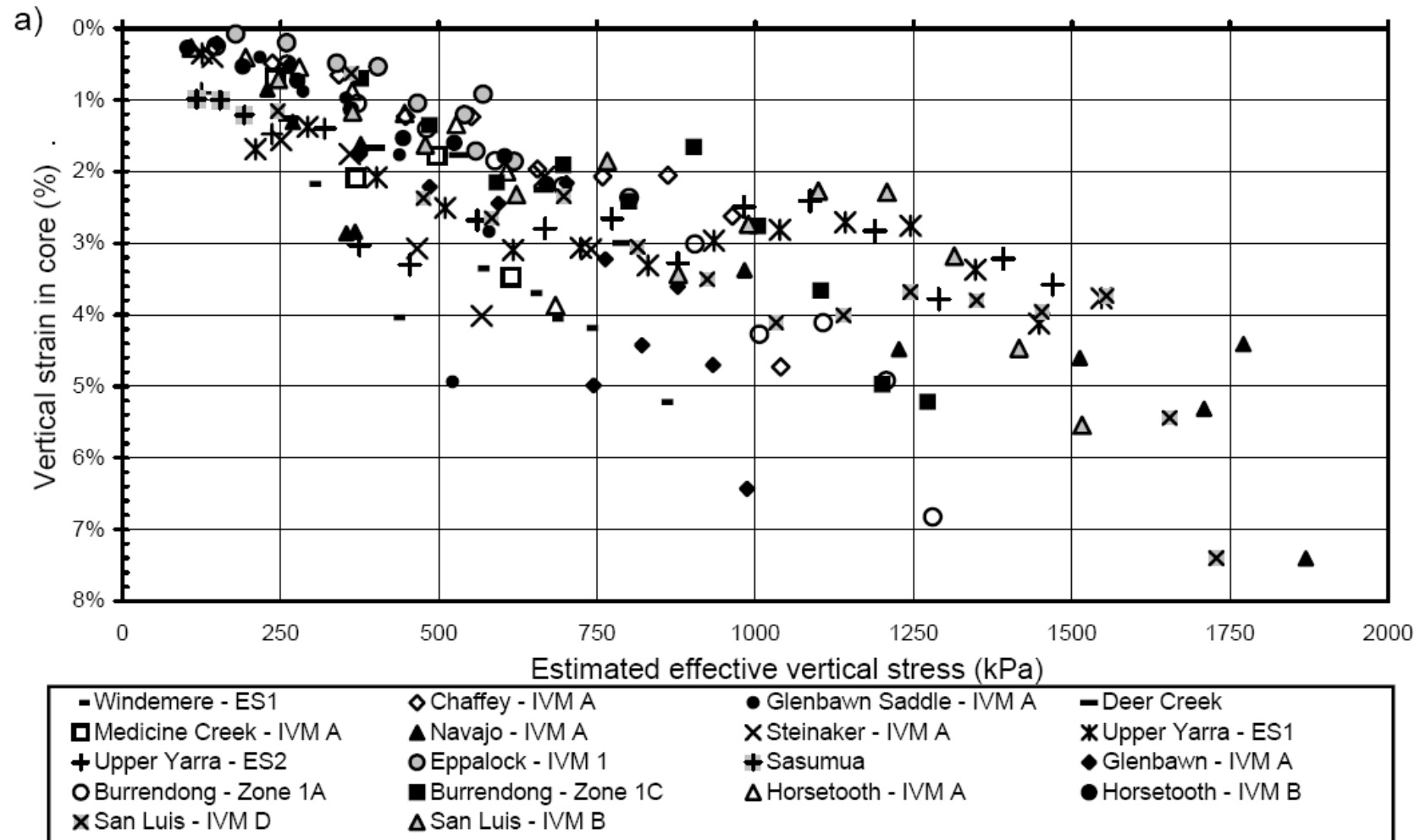


# Settlement during construction

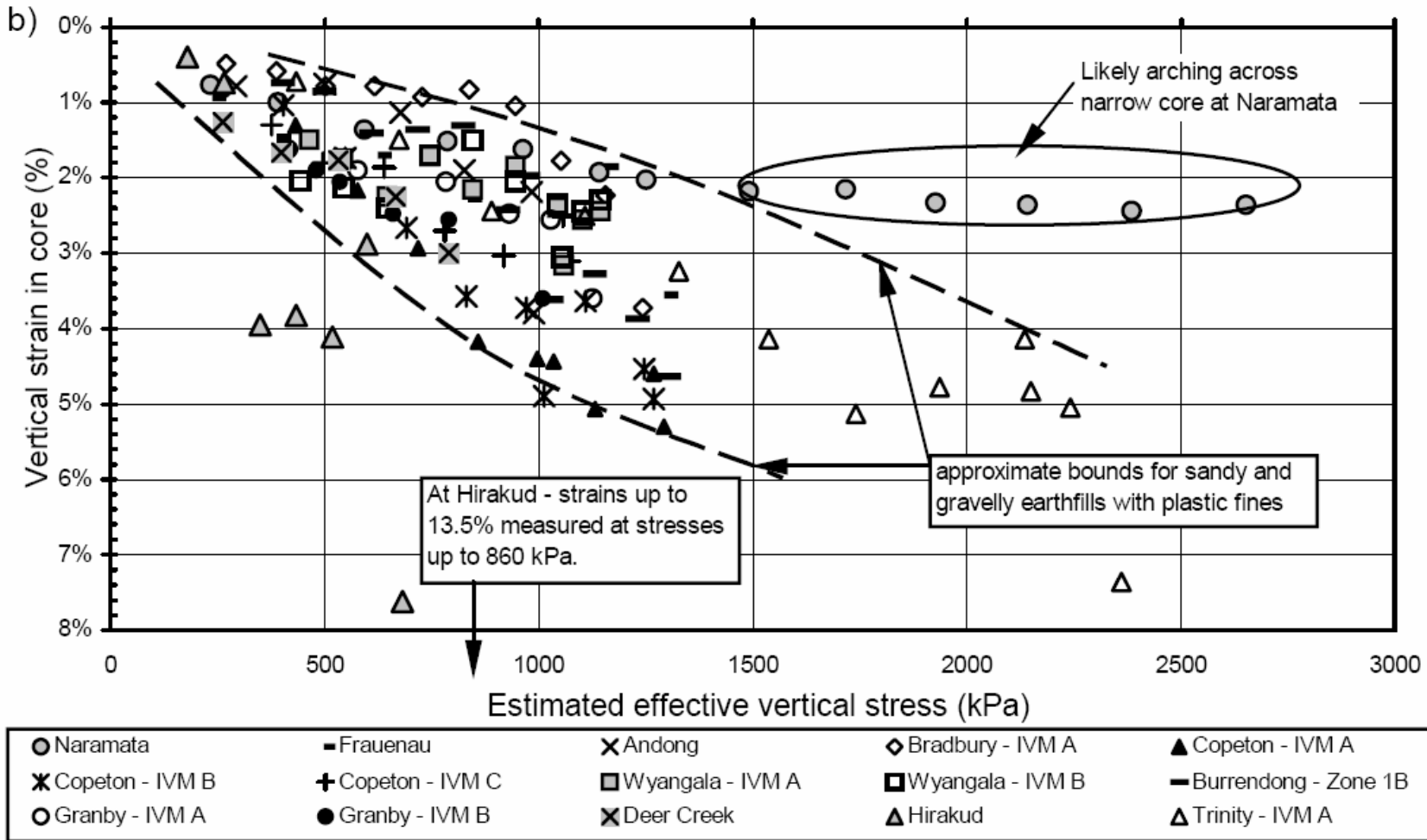




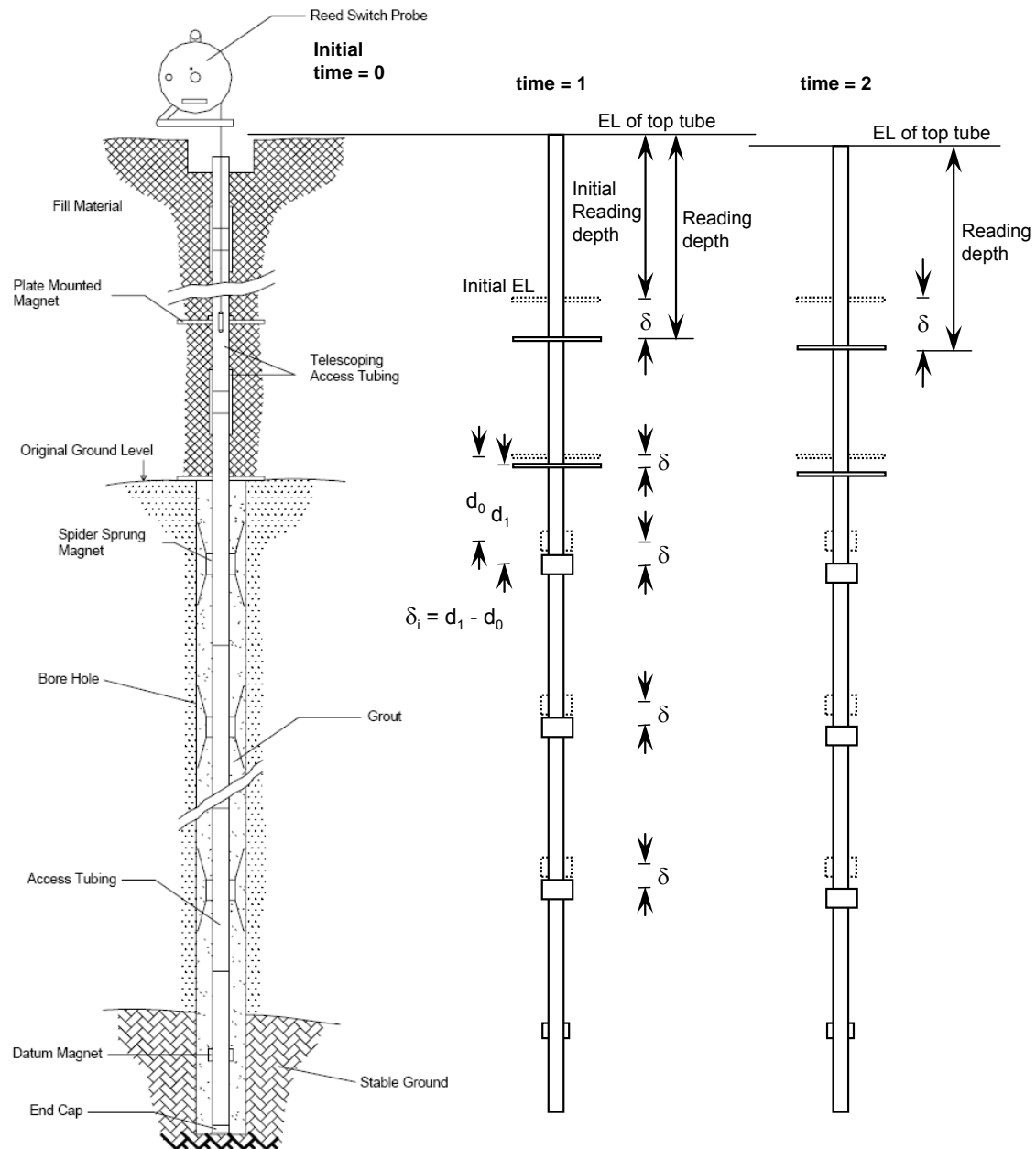
# Settlement during construction



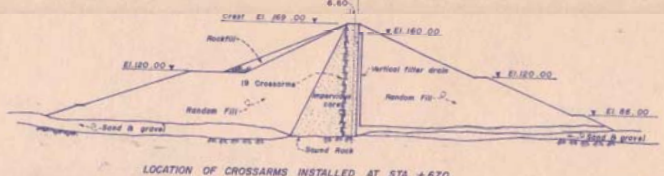
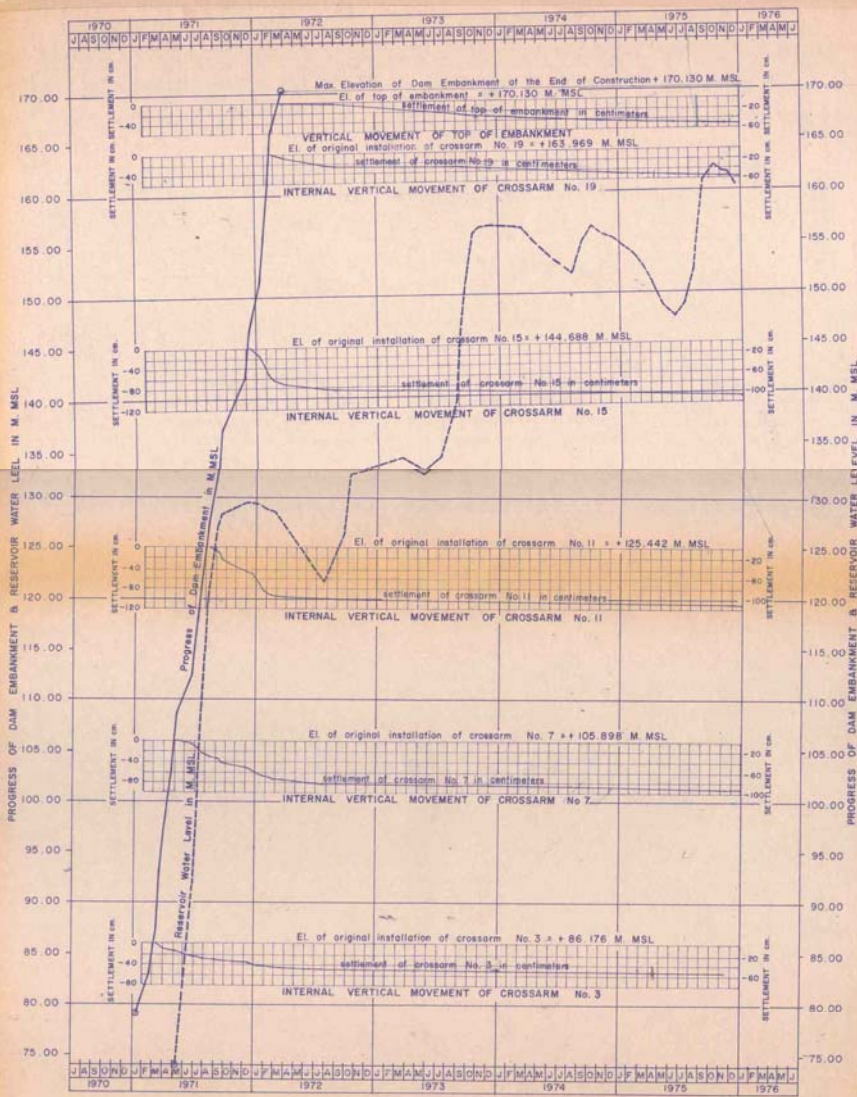
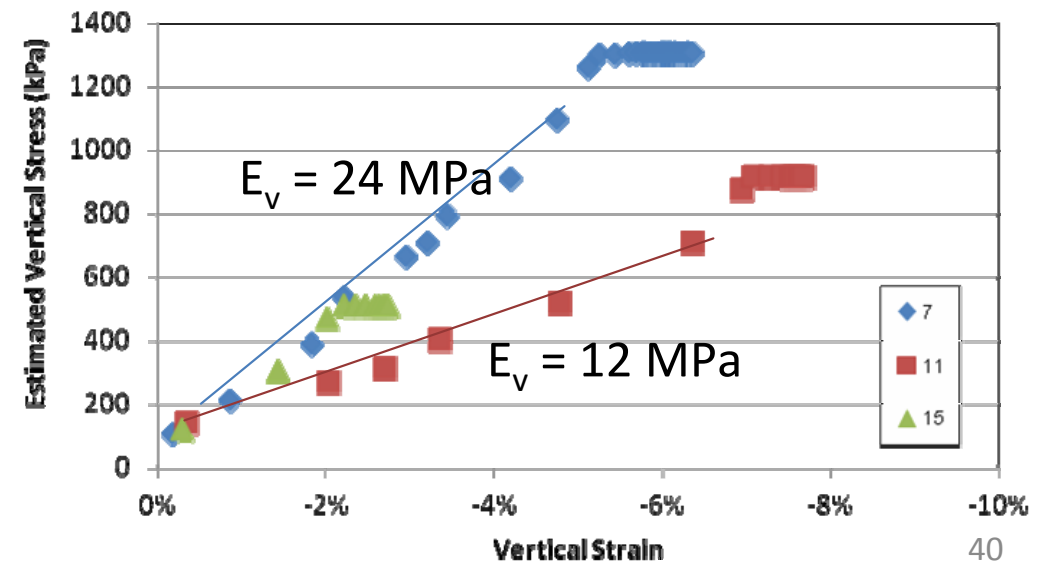
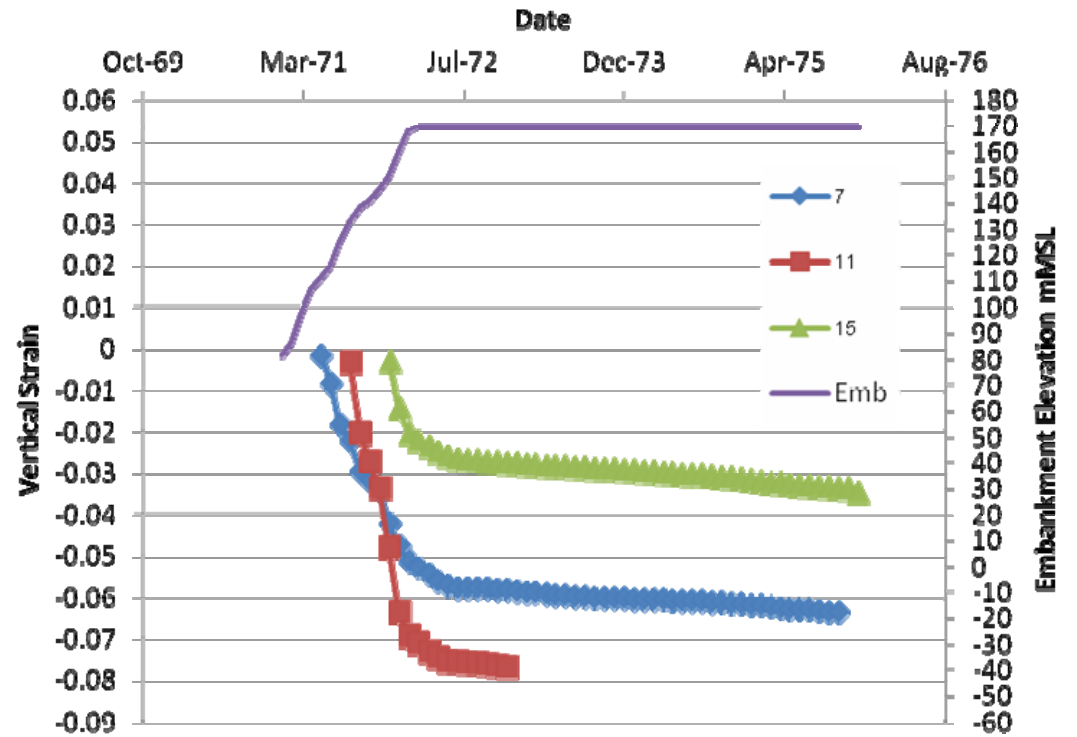
# Settlement during construction



# Magnetic Settlement Gauges



# Internal Settlement Gauges



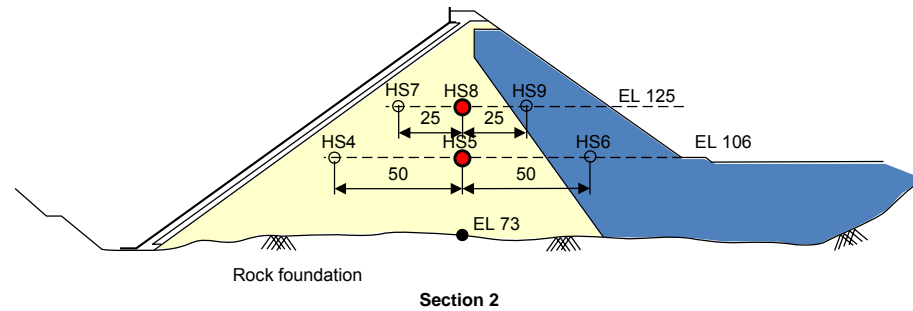
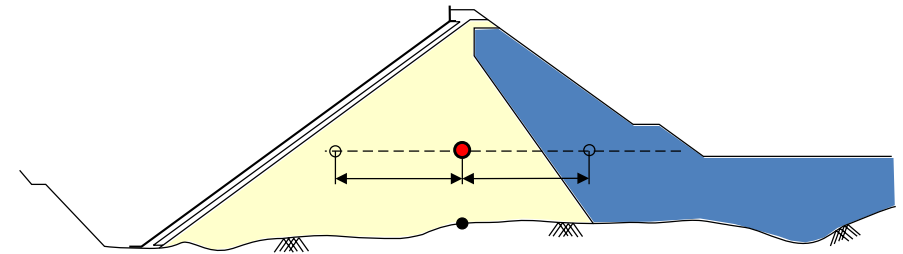
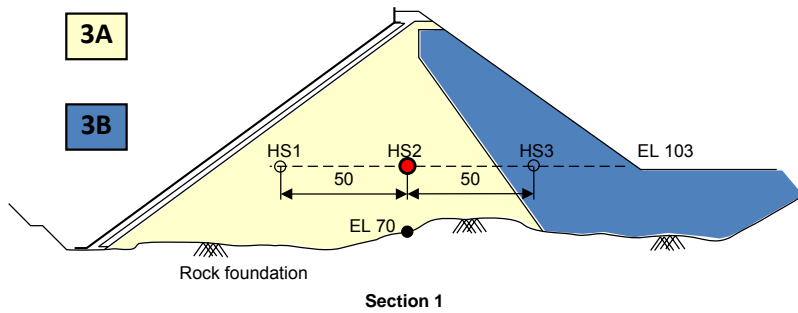
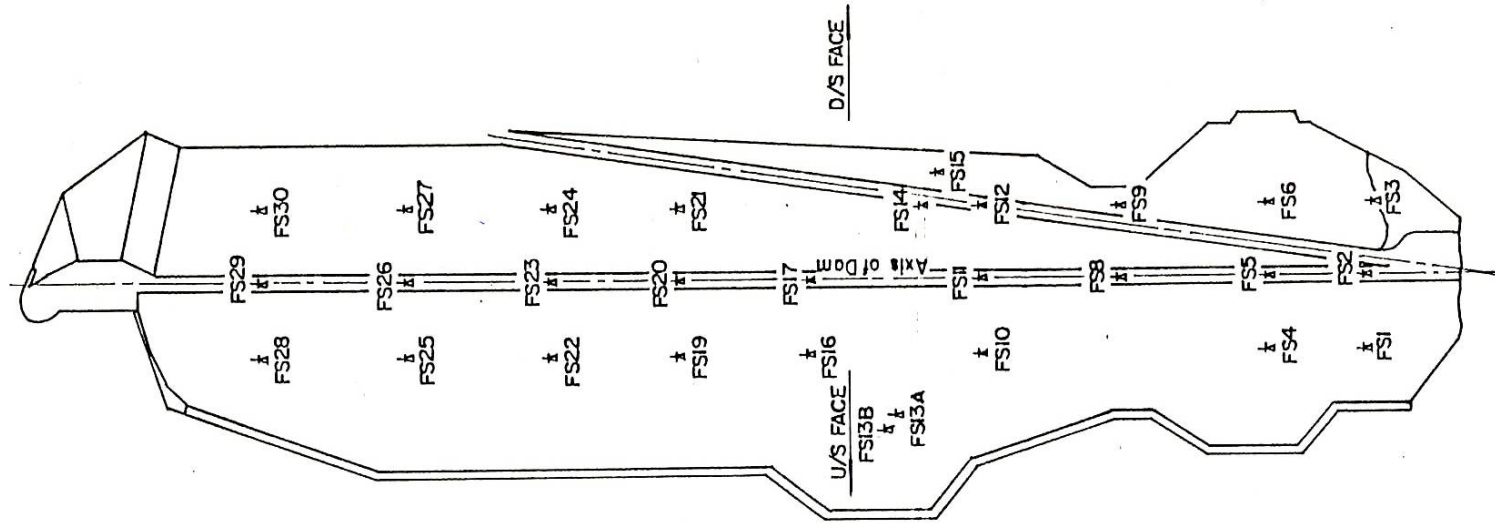
- Note:
- There are nineteen of crossarms installed in the dam at sta +670.
  - Five of crossarms were selected to plot as shown above.
  - Total settlement (up to 12 December 1975) is 255.9 cm. (or 2.91%)

Fig. 4

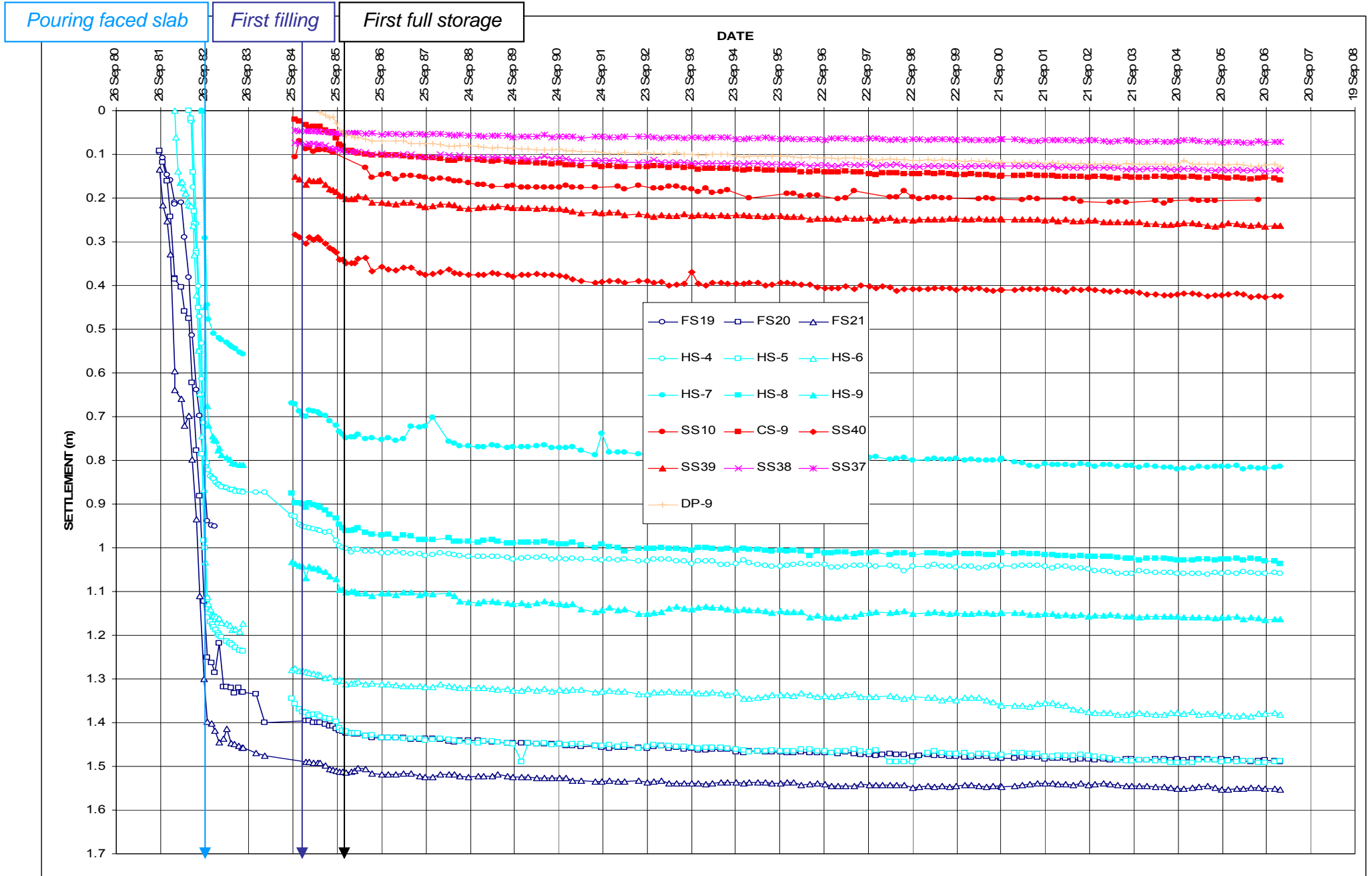
ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND			
HYDRO-ELECTRIC CONSTRUCTION DEPARTMENT			
SIRIKIT DAM			
INTERNAL VERTICAL MOVEMENT			
DRAWN:	TRACED:	CHECKED:	CONCLUDED:
Vatana	K. Palboon	M.	K. K.



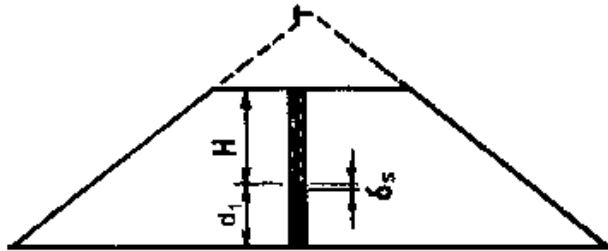
# Settlement of Khao Laem Dam



# Settlement of Khao Laem Dam



# Estimation of Moduli of Rockfill



MODULUS DURING CONSTRUCTION

$$E_{rc} = \gamma H (d_1 / \delta_s)$$

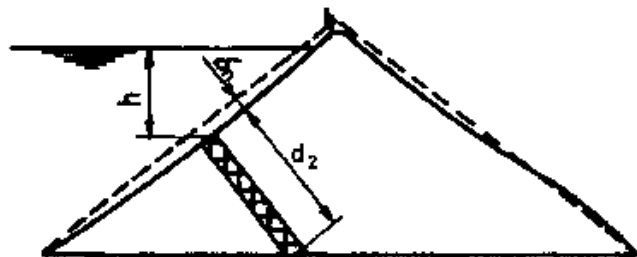
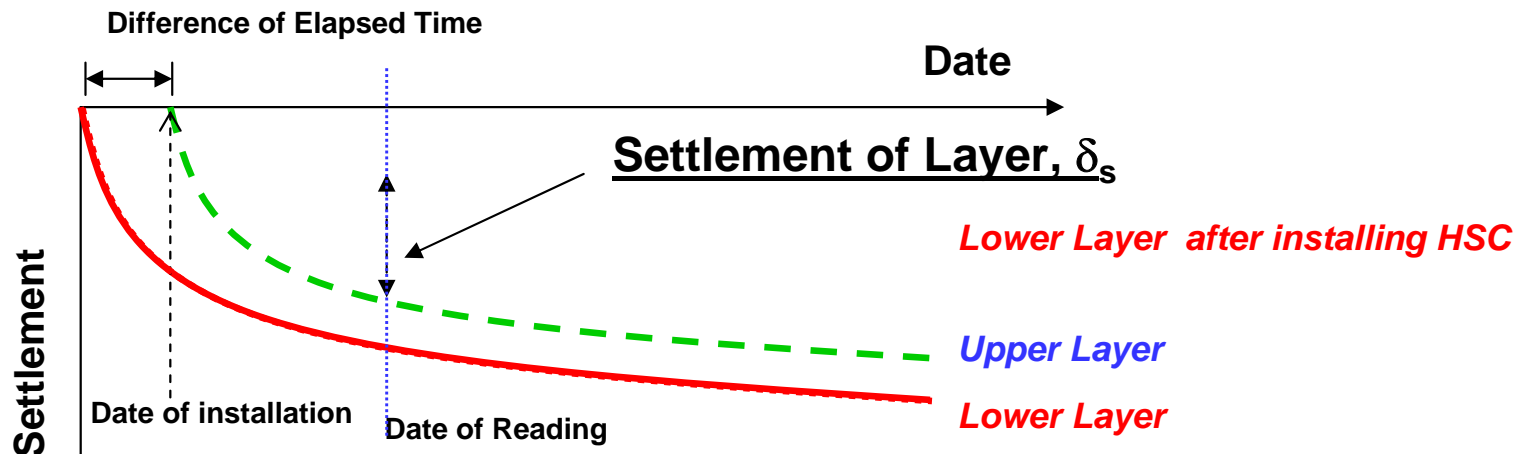
$E_{rc}$  = rockfill modulus during construction in MPa

$\gamma$  = unit weight of the rockfill in kN/m<sup>3</sup>

H = Height of fill above that layer in m

$d_1$  = a thickness of layer of the dam in m

$\delta_s$  = settlement of layer in mm



MODULUS DURING RESERVOIR FILLING

$$E_{rf} = \gamma_w h (d_2 / \delta_n)$$

$E_{rf}$  = rockfill modulus on first filling in MPa

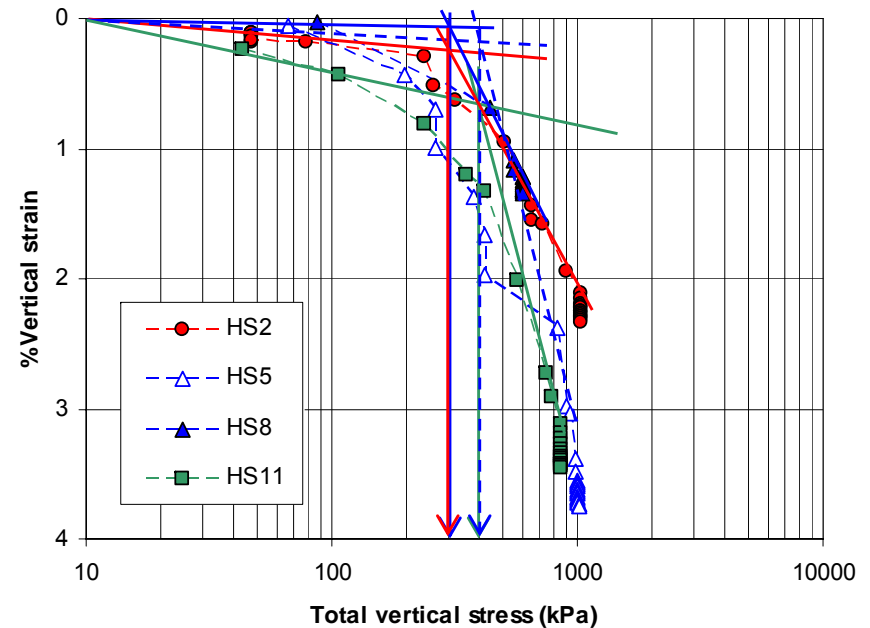
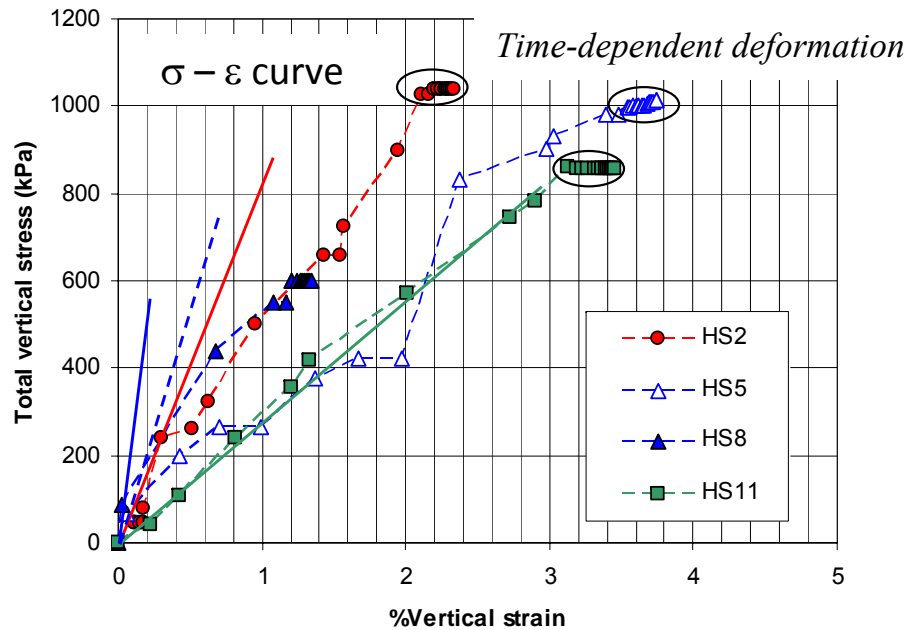
$\gamma_w$  = unit weight of water in kN/m<sup>3</sup>

h = depth from reservoir surface in m

$d_2$  = depth normal to the face slab in m

$\delta_n$  = face slab deflection at depth h from the reservoir surface in mm

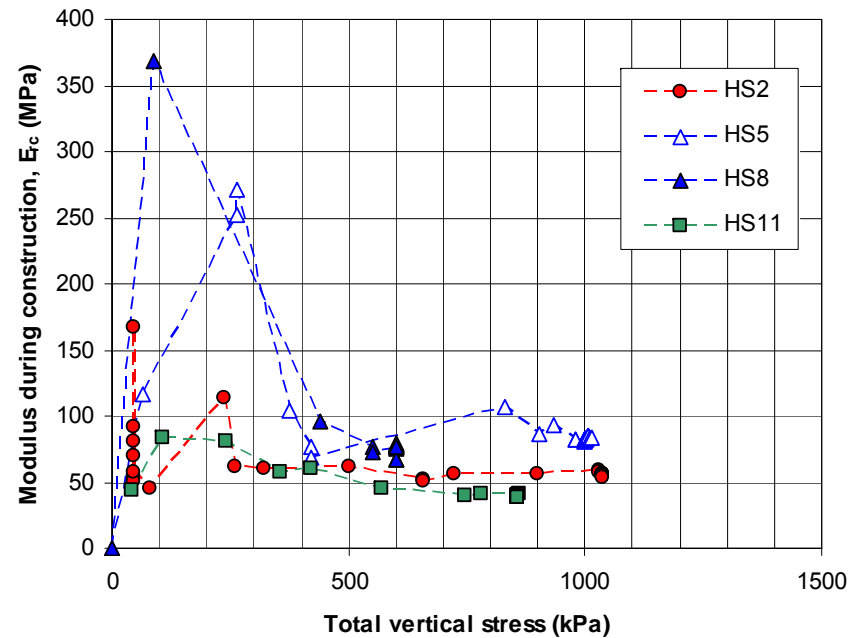
# Results from Field Monitoring



The initial tangential modulus is higher than of the higher stress level.

The clastic yield stress of the rockfill is about 300 to 400 kPa.

The Modulus at the higher stress level is about 64 MPa.





# Long term settlement

- Time-dependent settlement due to consolidation process in compacted soil, creep in compacted rockfill.
- For earthfill embankment, coefficient of secondary settlement due to consolidation should be less than 2% of dam height /log cycle time Charles and Tedd (1991)
- Hunter and Fell (2003) summarized coefficient of Earthfill and Rockfill Embankment in following tables

## Embankment crest region, typical range of post construction settlement and long-term settlement rate

Core Properties			Crest Settlement (%) <sup>*1, *2</sup>			Long-term Settlement Rate <sup>*1, *3</sup>	
Classification	Core Width	Moisture content	3 yrs	10 yrs	20 to 25 yrs	Steady/Slow Reservoir	Fluctuating Reservoir
CL/CH	Thin to medium	dry	0.05 to 0.55	0.10 to 0.65	0.20 to 0.95	0.04 to 0.50 (most < 0.26)	0.09 to 0.57
		wet	0.04 to 0.75	0.08 to 0.95	0.20 to 1.10		
	Thick	all (most dry)	0.02 to 0.75	0.10 to 1.0	0.5 to 1.0		
SC/GC	Thin to medium	dry	0.10 to 0.25	0.10 to 0.40	< 0.5	0 to 0.26	0.06 to 0.37
		wet	0.15 to 0.80	0.20 to 1.10	< 1.1		
	Thick	all (most dry)	0.05 to 0.20	0.10 to 0.35	0.10 to 0.45		
SM/GM	Thin to thick	all	0.06 to 0.30	0.10 to 0.65	< 0.5 to 0.7	< 0.10	0.03 to 0.21
Very Broad Earthfill Cores - most CL and dry placed			0.0 to 0.60	0.0 to 0.80	0.05 to 0.76	0.08 & 0.44	0.07 to 0.70 (most < 0.35)

Note: <sup>\*1</sup> excludes possible outliers.

<sup>\*2</sup> crest settlement as a percentage of the embankment height

<sup>\*3</sup> long-term settlement rate in units of % settlement per log cycle of time (settlement as a percentage of dam height).

## Embankment shoulder regions, typical range of post construction settlement and long-term settlement rate

Material Type	Compaction Rating	Downstream Shoulder *1			Upstream Shoulder *1		
		Settlement (%) *2		Settlement Rate *3	Settlement (%) *2		Settlement Rate *3
		3 yrs	10 yrs		3 yrs	10 yrs	
	Well	0.05 to 0.35	0.05 to 0.55	0.0 to 0.33	0.10 to 0.60	0.10 to 0.70	0.05 to 0.70 (most < 0.50)
	reasonably to well	< 0.30	< 0.50	0.04 to 0.31 (most > 0.15)	0 to 0.55	0.10 to 0.60	0.10 to 0.56 (most < 0.50)
	reasonable	0.20 to 1.0	0.10 to 1.0	0.10 to 1.0	< 0.70	- *5	< 0.55
	poor	0.10 to ? *5	0.15 to ? *5	0.10 to 0.25	0.10 to 1.05	0.15 to 1.20	0.10 to 0.82 (most < 0.60)
Rockfill	poor – dry *4	0.15 to 1.60	0.30 to 2.00	0.20 to 0.75	0.15 to 1.35	0.20 to 1.6	
Gravels	-	< 0.15	< 0.25	0.02 to 0.065	< 0.15	< 0.25	< 0.21
Earthfills	-	0.0 to 0.40	0.0 to 0.70	0.0 to 0.40	0.05 to 0.60	0.10 to 0.70	0.10 to 0.60

Note: \*1 Excludes possible outliers.

\*2 Settlements quoted are a percentage of the height from the SMP to foundation level.

\*3 The long-term settlement rates are in units of % settlement per log cycle of time (settlement as a percentage of the height from the SMP to foundation level).

\*4 For the dry placed and poorly compacted rockfills, a large range in settlements is observed. For rockfills placed in dry climatic regions settlements are likely to be toward the upper end of the range.

\*5 insufficient data.

# Clastic mechanics

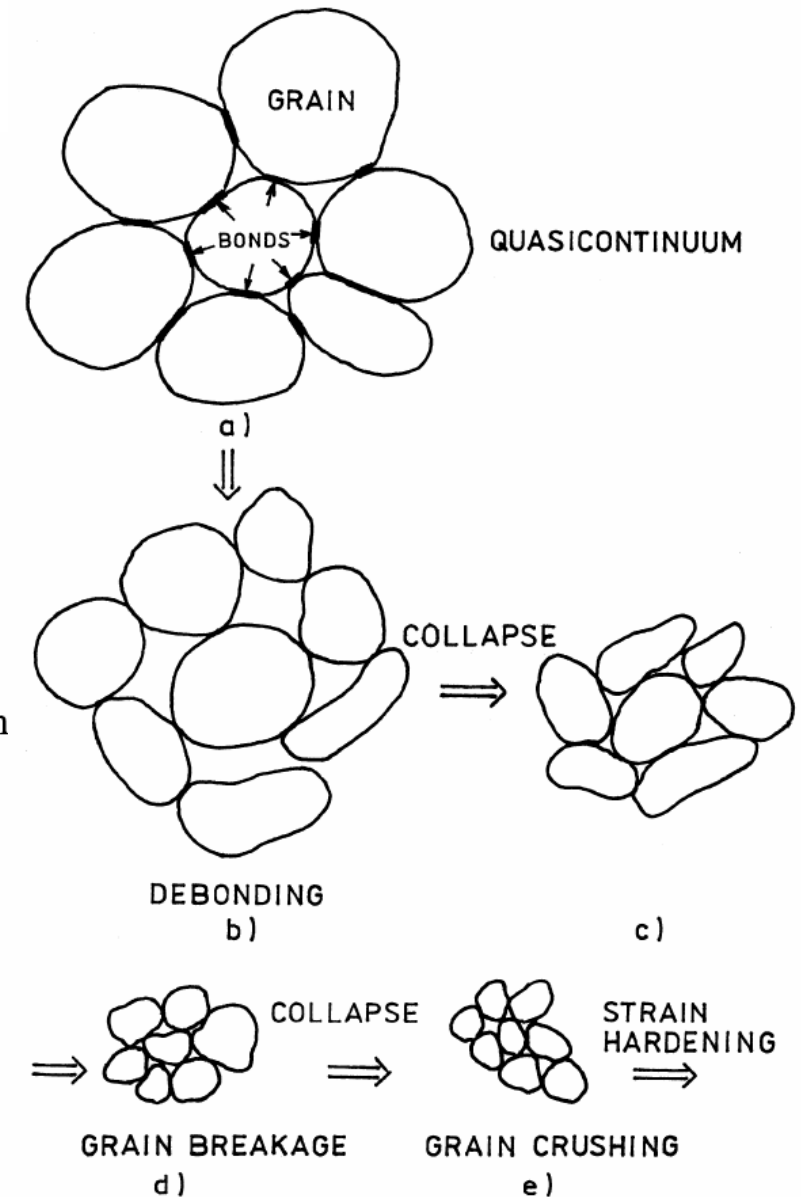
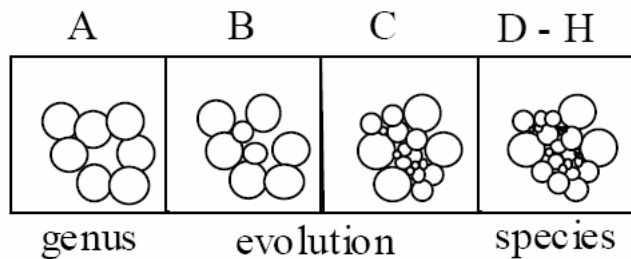
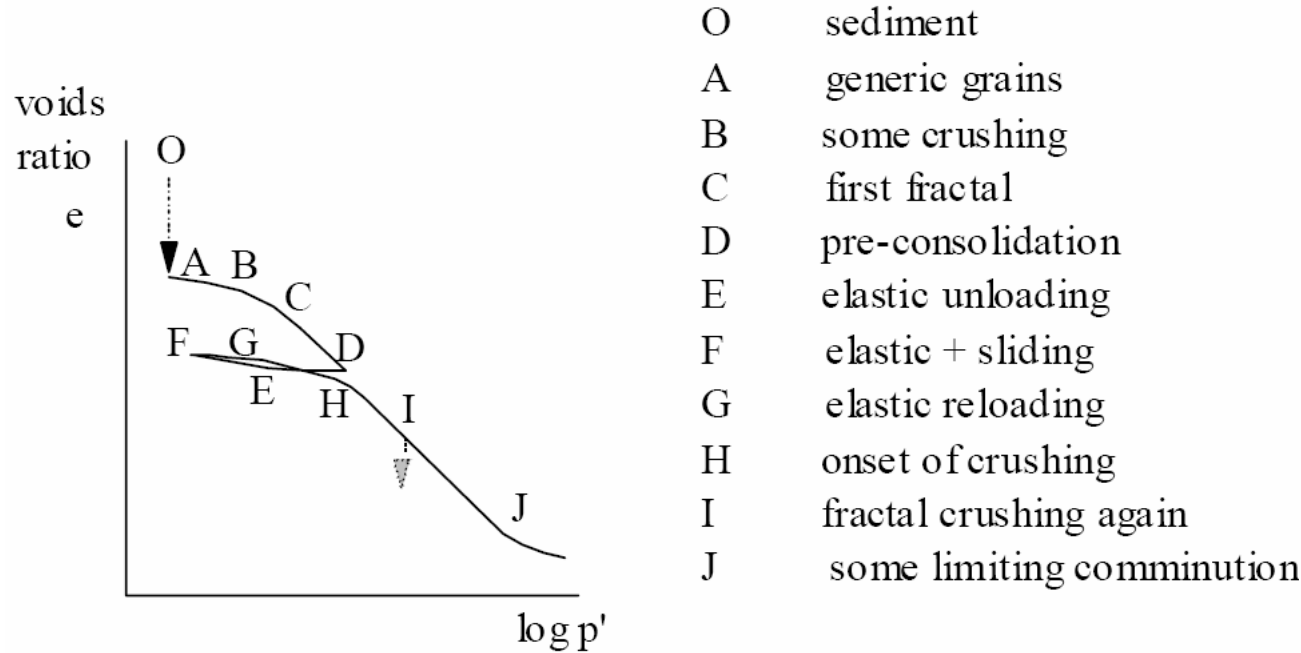


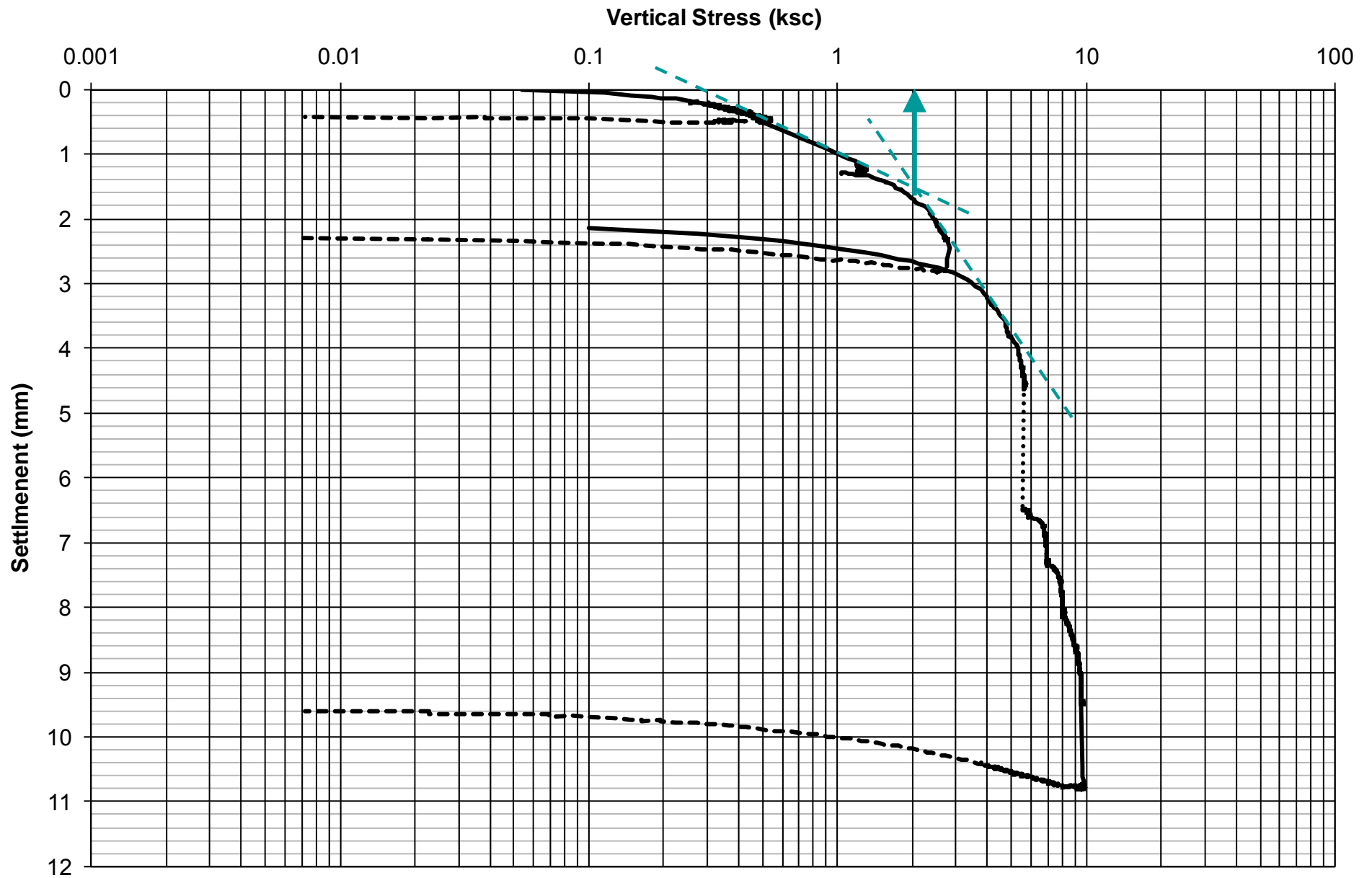
Fig. 6. Elementary cluster of structural units and its modifications.

*(Bolton, 1999)*

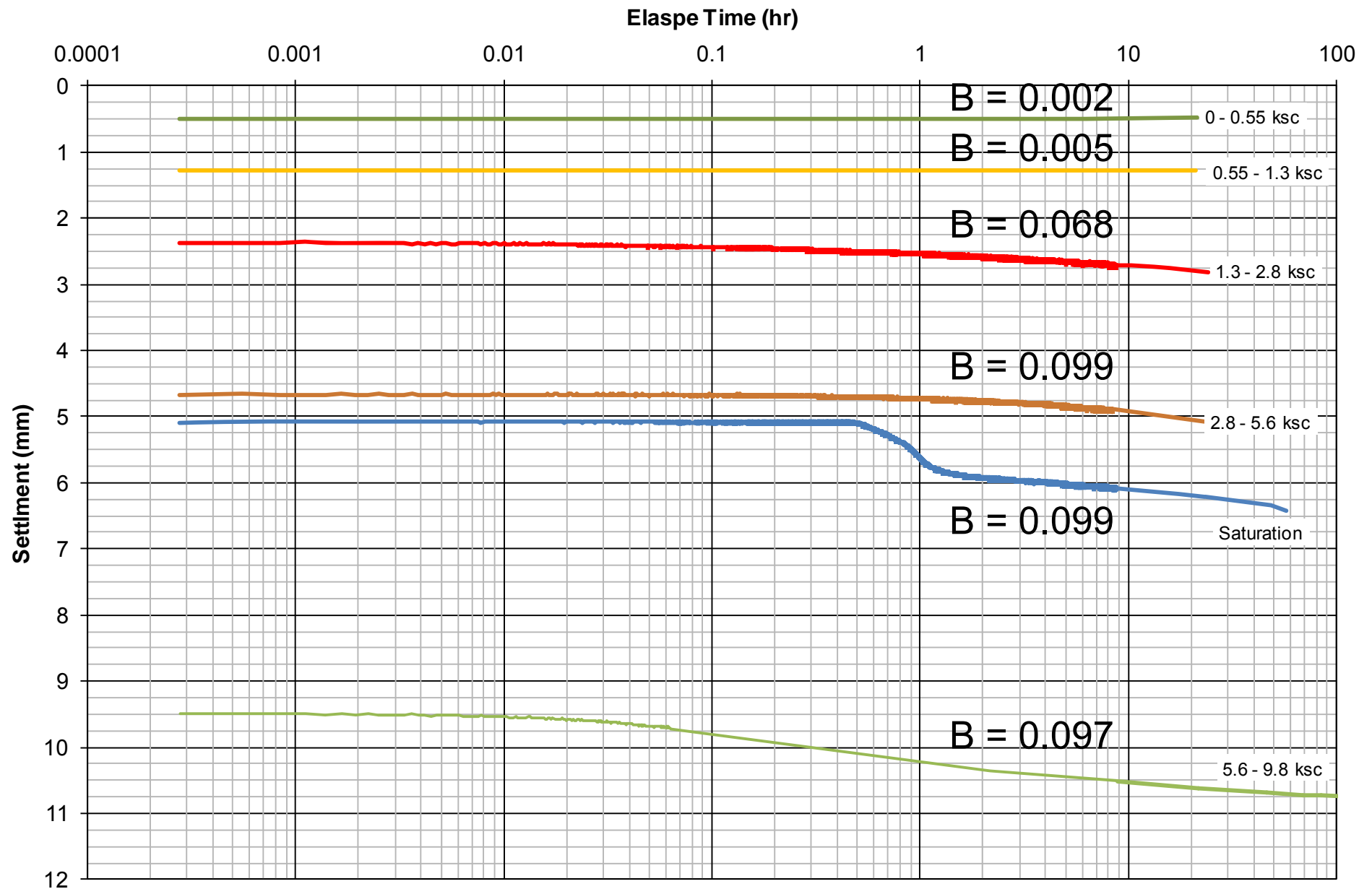
*(Feda, 2004)*



# Yield stress



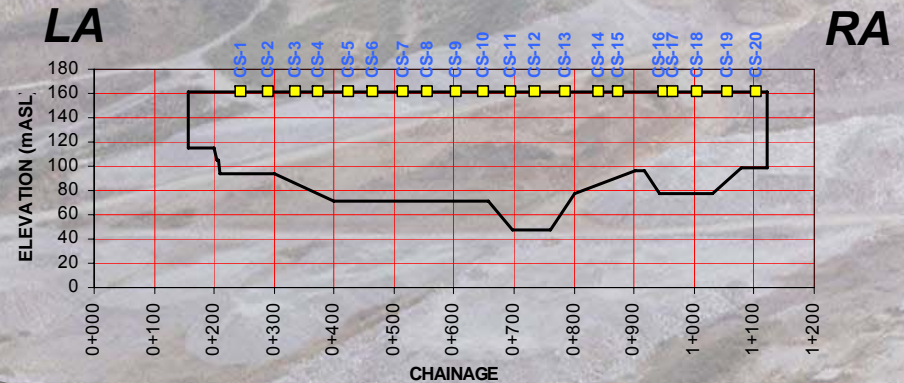
# Creep or Time-dependent



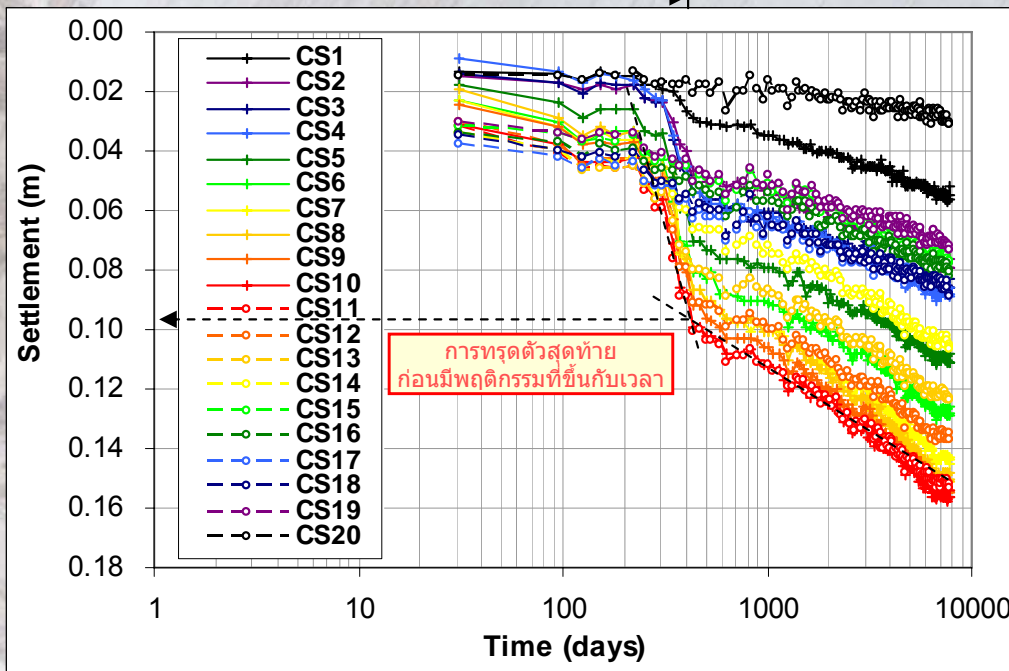
# การทรุดตัวของสันเขื่อน

## แนวกำแพงกั้นคลื่น

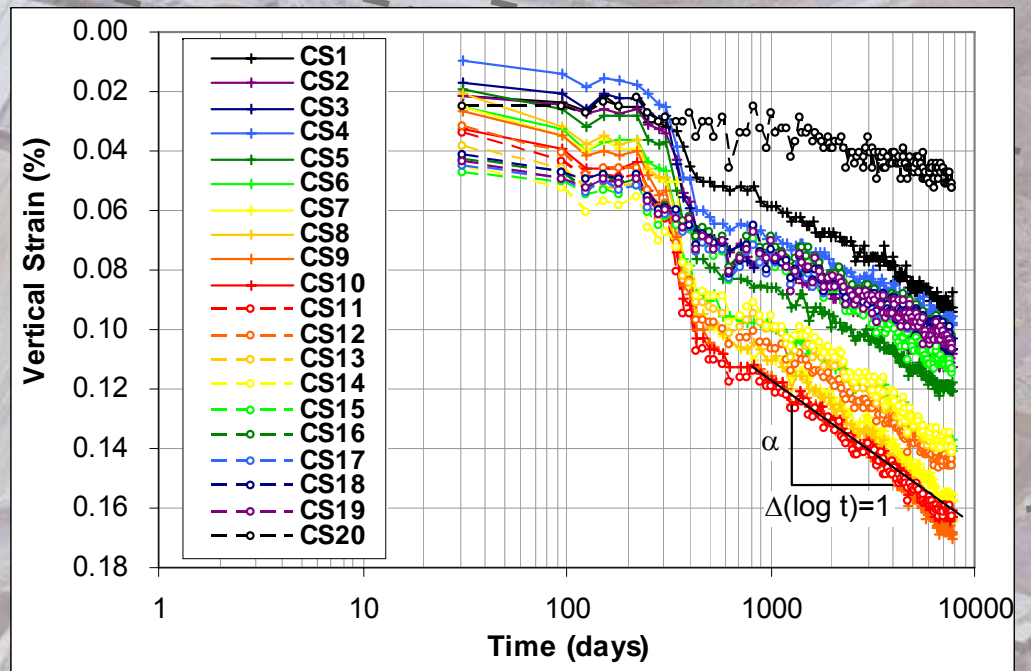
การทรุดตัวของกำแพงกั้นคลื่นเกิดขึ้นในทันทีที่เก็บน้ำครั้งแรกและหยุดลงเมื่อเก็บน้ำถึงระดับสูงสุด หลังจากนั้นเขื่อนยังคงทรุดตัวต่อไป โดยมีความสัมพันธ์กับเวลา (time dependent) อย่างเป็นเส้นตรงในกราฟ semi-log เกิดการทรุดตัวสูงสุด ณ หน้าตัดลึกสุด CH 0+700 %การทรุดตัวเทียบกับความสูงเขื่อนน้อยกว่า 1 % และอัตราการทรุดตัวมีค่าไม่ต่างกัน



ช่วงการเก็บน้ำในปีแรก (ที่เวลา 400 วัน)

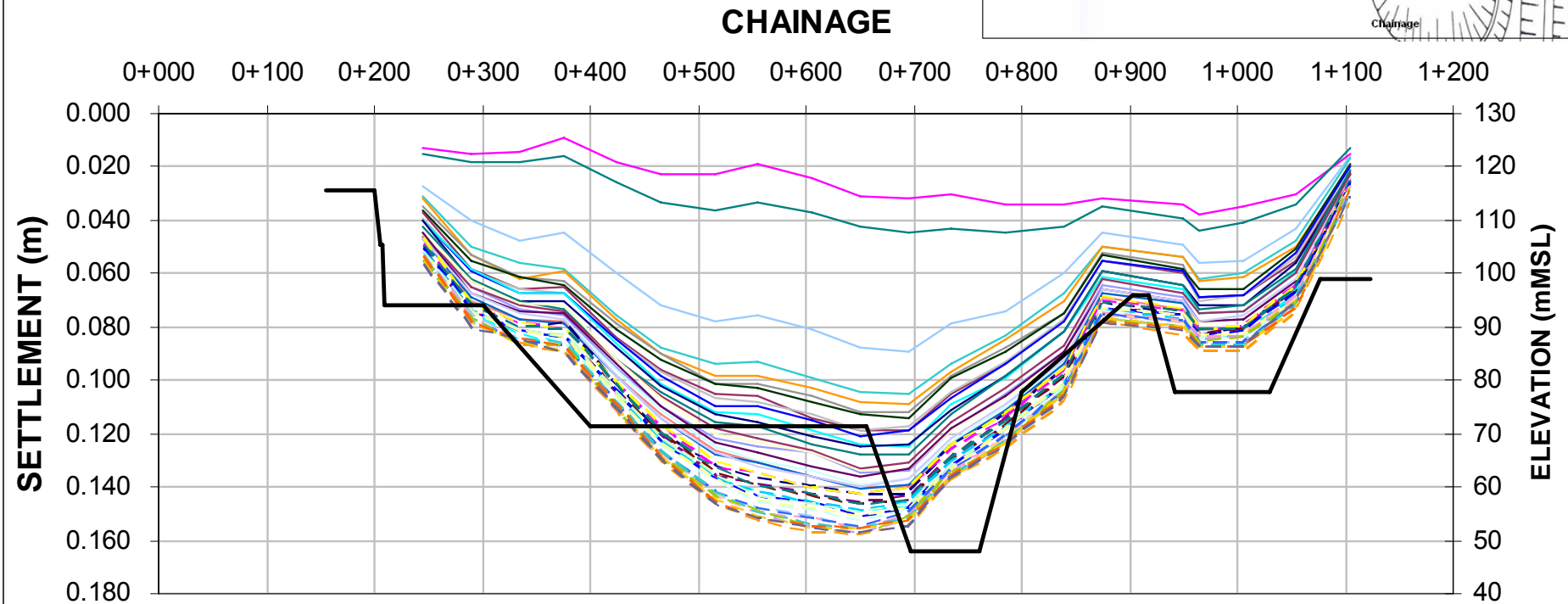
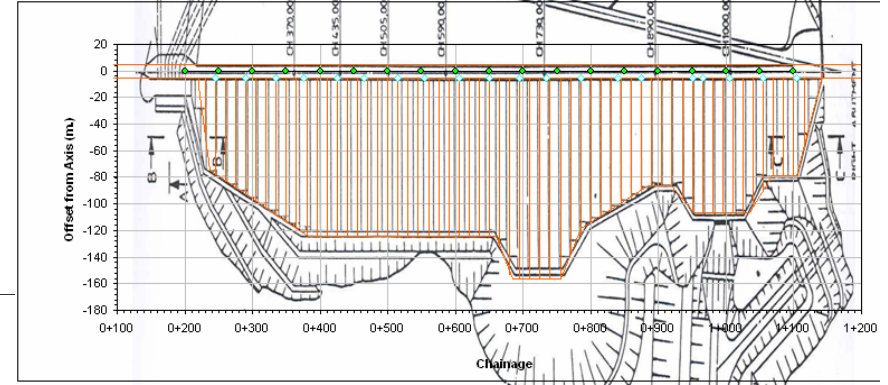


Log time กับ การทรุดตัวของสันเขื่อน



Log time กับ Strain การทรุดตัวของสันเขื่อน

# Crest Settlement points (CS)



09-Nov-1984 142.12	19-May-1985 141.84	15-Nov-1985 153.90	15-May-1986 148.54	19-Nov-1986 147.91
19-May-1987 143.01	16-Nov-1987 147.23	20-May-1988 141.98	17-Nov-1988 149.81	18-May-1989 146.06
10-Nov-1989 148.38	17-May-1990 138.61	22-Nov-1990 143.64	24-Nov-1991 149.95	20-Nov-1992 143.41
29-May-1993 136.24	26-Nov-1993 145.51	27-May-1994 137.14	25-Nov-1994 152.55	22-May-1995 142.54
27-Nov-1995 151.21	23-May-1996 143.39	19-Nov-1996 150.93	15-May-1997 144.21	19-Nov-1997 154.18
14-May-1998 144.39	16-Nov-1998 141.50	21-May-1999 137.02	25-Nov-1999 151.72	16-May-2000 145.33
14-Nov-2000 153.14	25-May-2001 145.55	15-Nov-2001 153.14	21-May-2002 145.13	07-Nov-2002 153.84
20-May-2003 144.37	12-Nov-2003 151.82	04-May-2004 142.32	19-Nov-2004 148.33	09-May-2005 138.80
10-Nov-2005 153.27	15-May-2006 144.43	11-Nov-2006 152.62	14-May-2007 143.15	



# Estimation of differential settlement

Settlement point	Dam Height (m)	%Settlement before time dependent	Alpha % log cycle	Settlement (m)				
				2008 (Now)	2013 (5 yrs)	2018 (10 yrs)	2028 (20 yrs)	2038 (30 yrs)
CS10	95.90	0.10	0.05	0.159	0.163	0.167	0.172	0.177
CS14	75.57	0.08	0.06	0.120	0.124	0.128	0.132	0.137
Difference				0.039	0.039	0.039	0.040	0.040

## การประมาณการทรุดตัว

พฤติกรรมทรุดตัวเริ่มเกิดขึ้นเมื่อเก็บน้ำสูงสุดครั้งแรก เวลาประมาณ  $t_1 = 400$  วัน ณ ประมาณวันที่ 15 พ.ย. 2528 ปัจจุบันเป็นวันที่ 22 ก.ค. 2551 หรือเวลาประมาณ  $t_2 = 8285$  วัน (จากวันที่ 15 พ.ย. 2528)

ตัวอย่าง CS-10

$\% \text{Settlement} = \% \text{Settlement before time dependent} + \alpha (\log t_2 - \log t_1)$

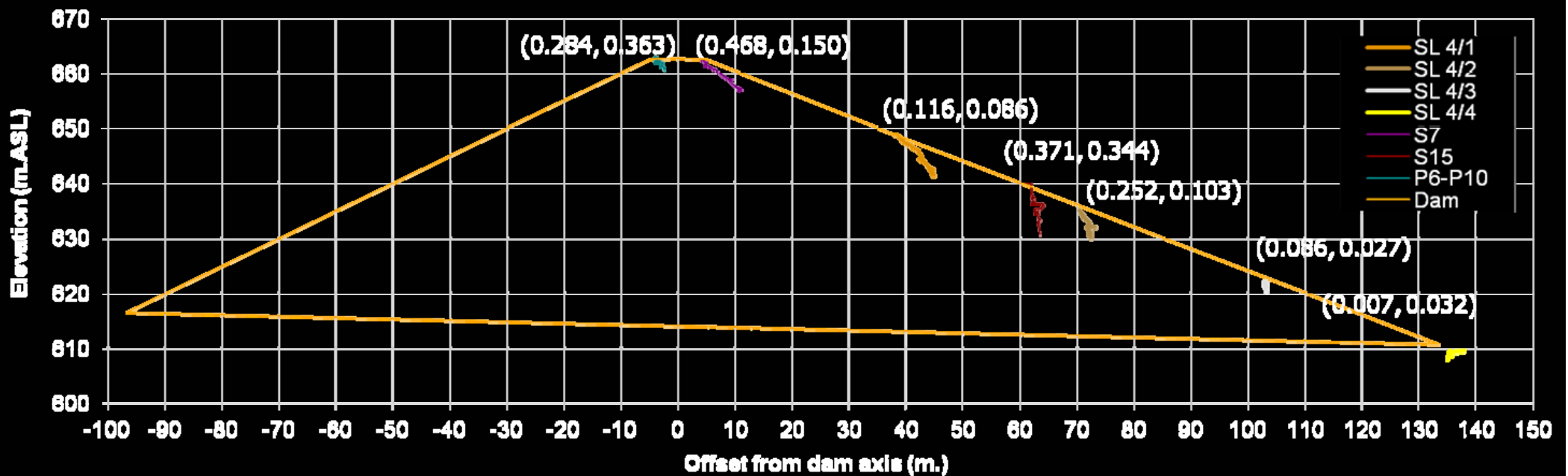
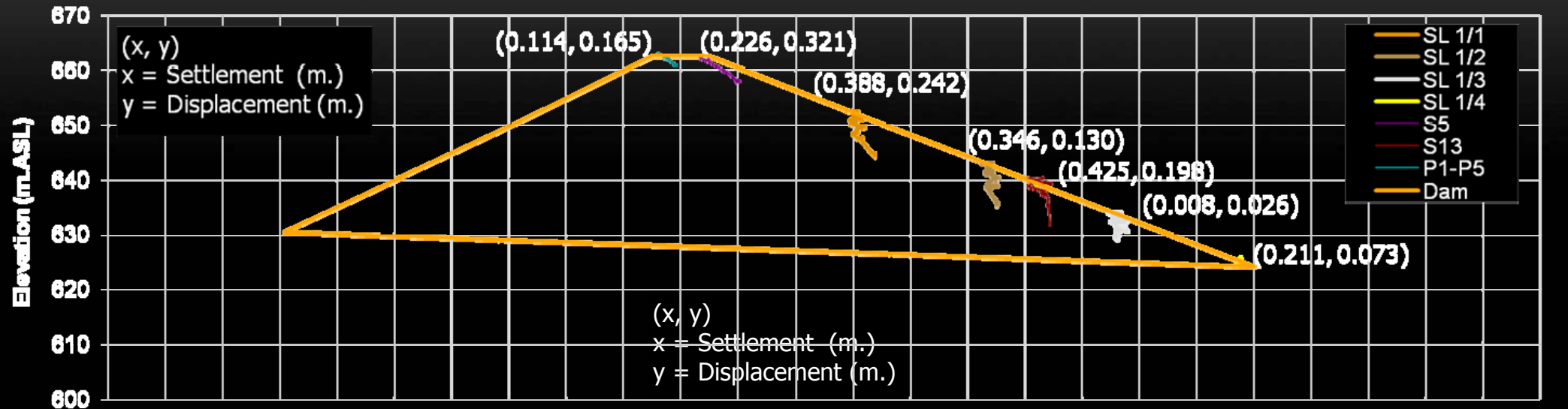
$\% \text{Settlement} = 0.10 + 0.05 * (\log 8285 - \log 400) = 0.166\%$

$\text{Settlement} = \% \text{Settlement} \times \text{dam height} / 100 = 0.166 \times 95.90 / 100 = 0.159 \text{ m}$



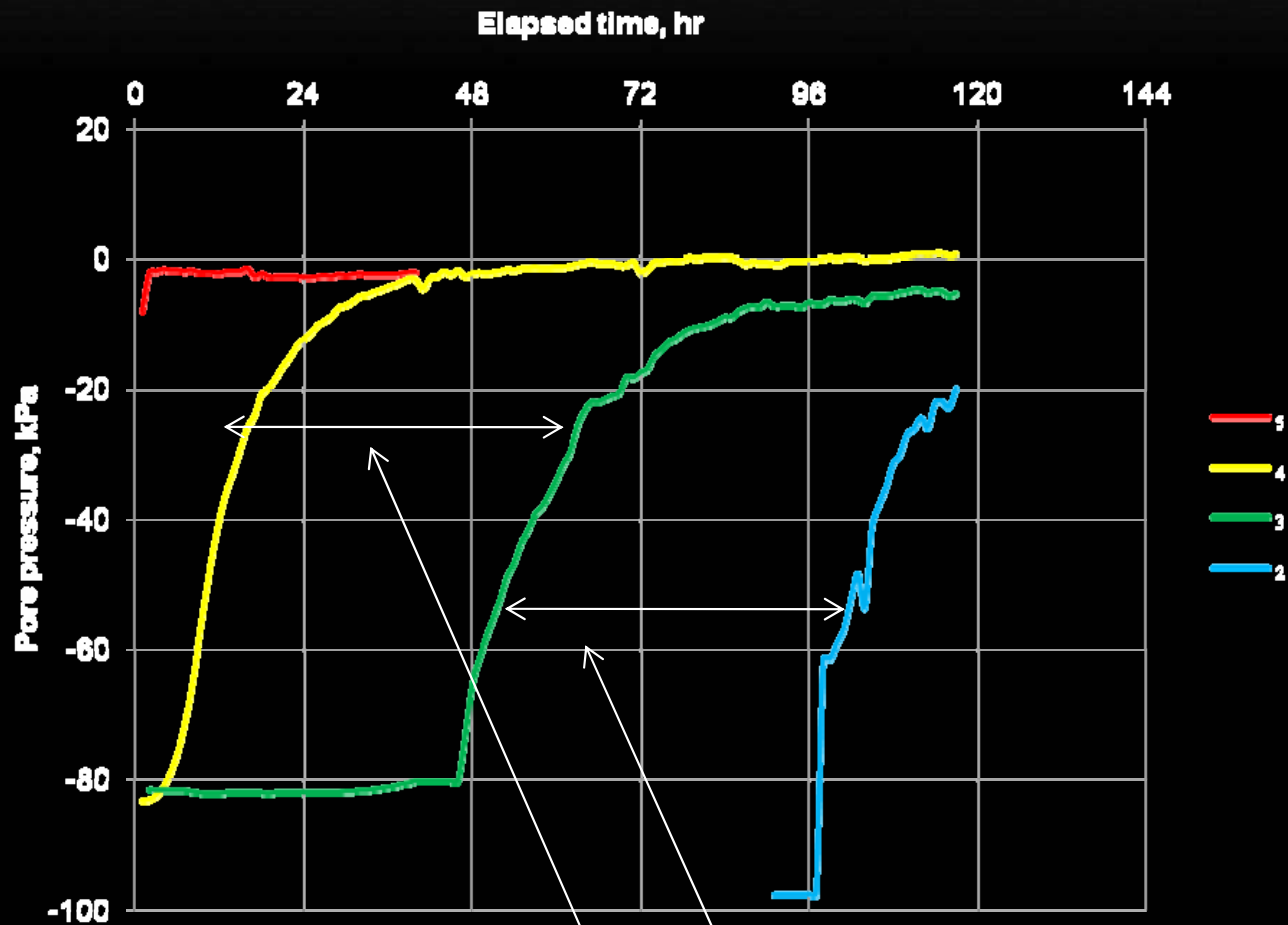


# ข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัด



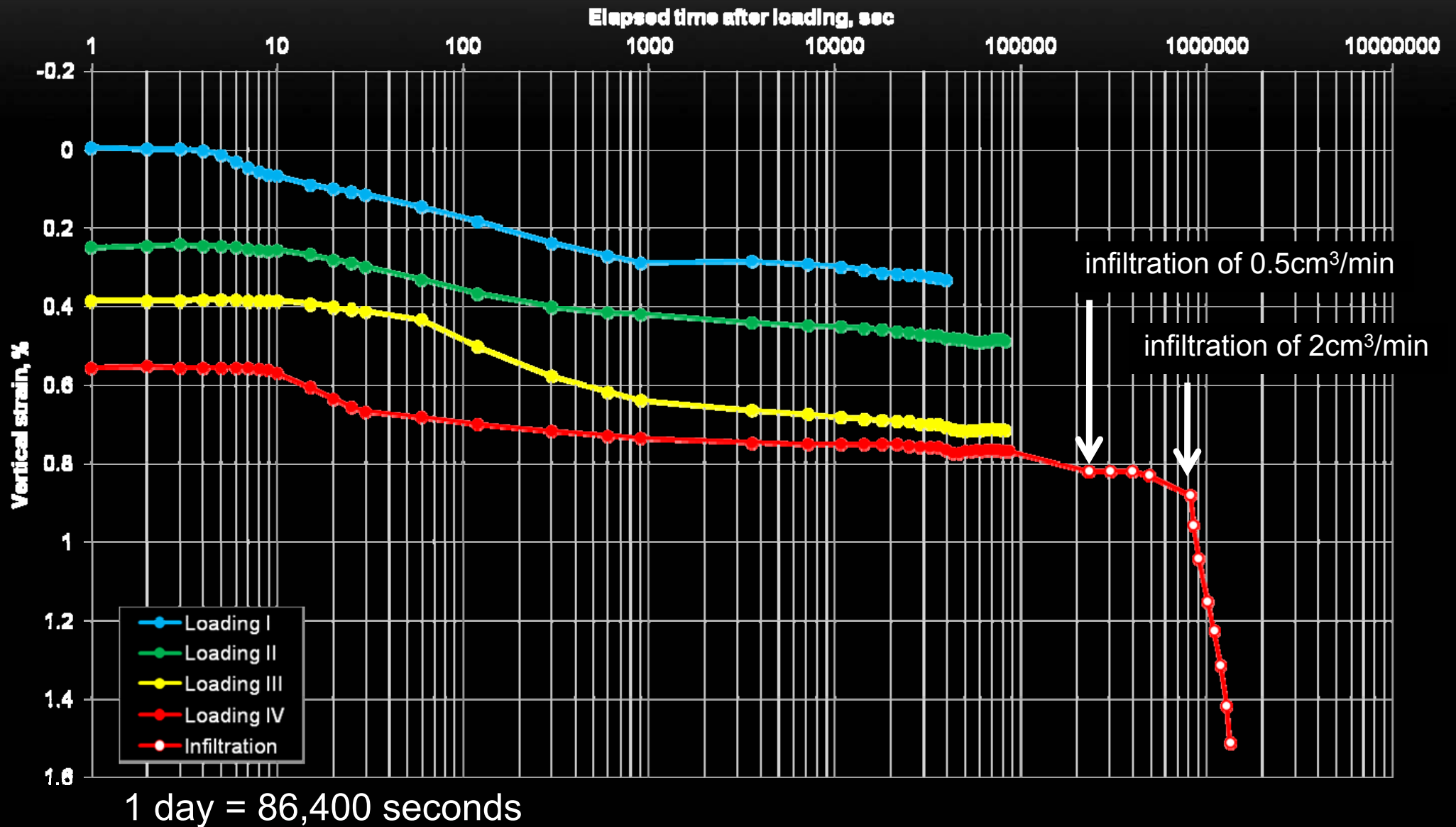
# การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Rate of infiltration  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$  ( $40\text{mm}/\text{day}$ )



Water seeps through the soil mass for 5 cm in 2 days ( $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ )

# การทดสอบในห้องปฏิบัติการ





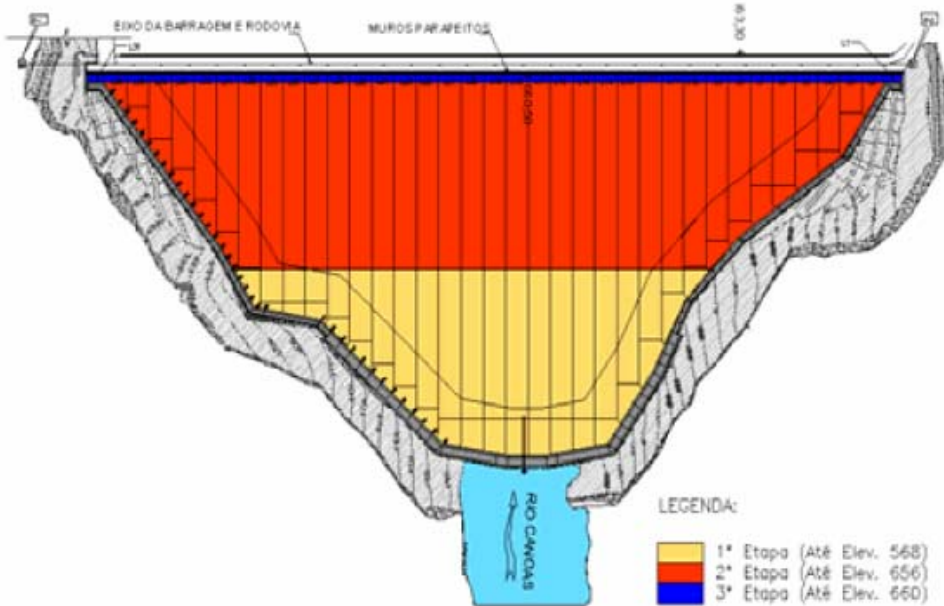


# กรณีศึกษา

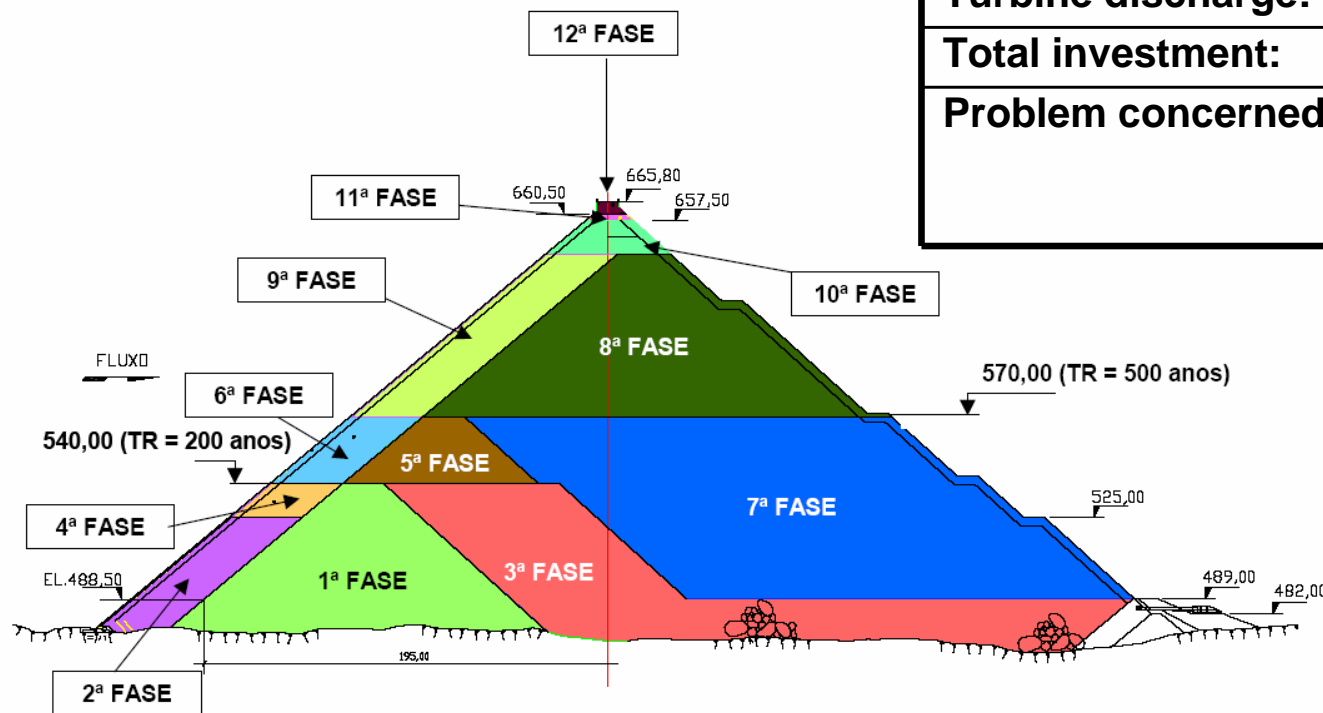
เขื่อนหินถมคอนกรีตคาน้ำ



# Campos Novos dam (Brazil)



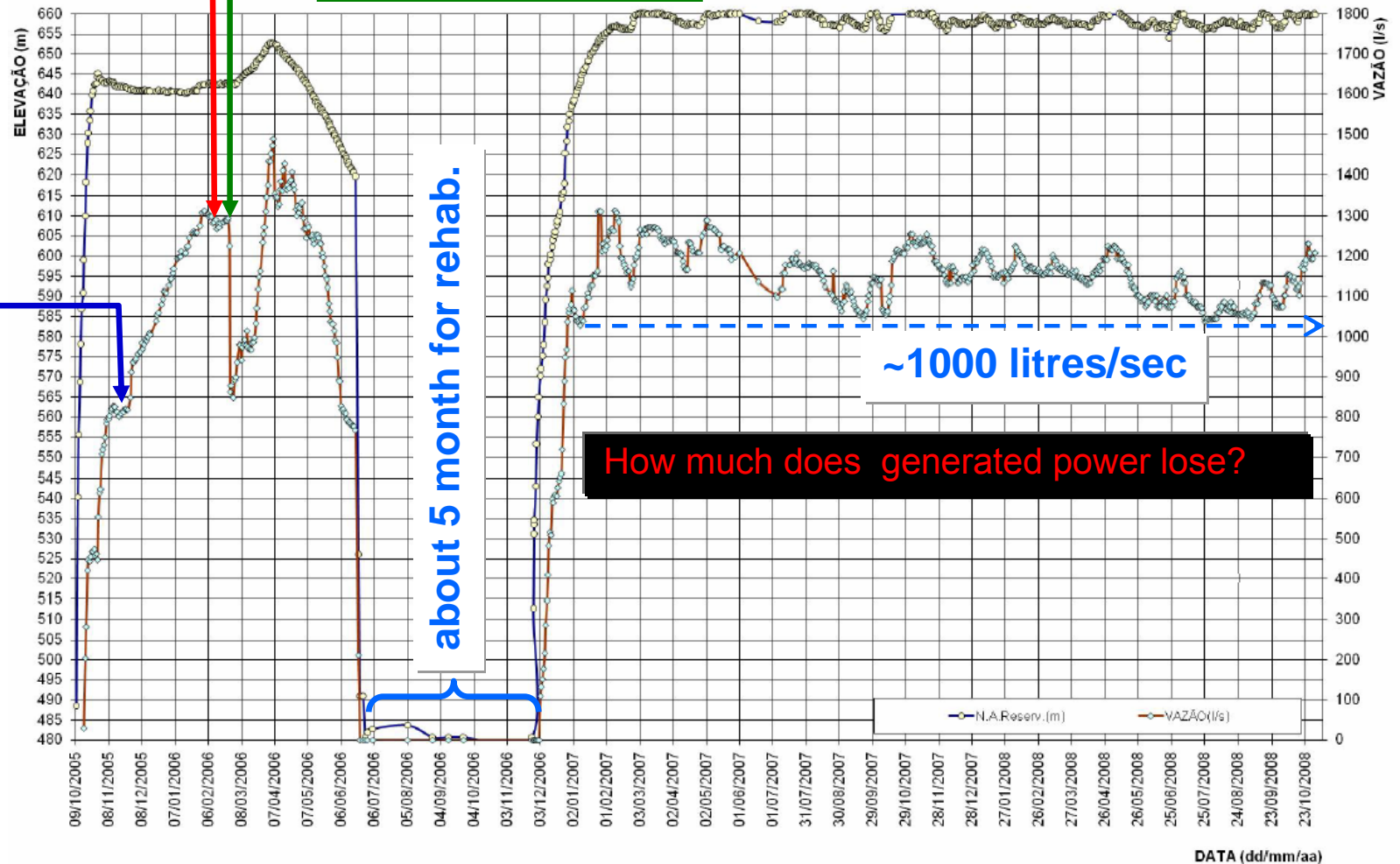
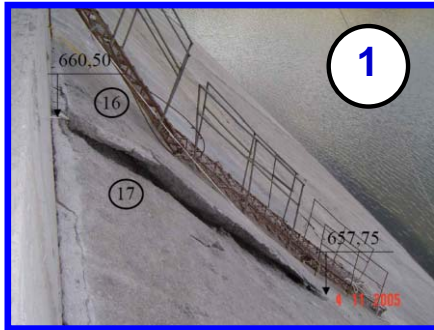
<b>Construction period:</b>	2001 - 2005
<b>Dam Height (m):</b>	202
<b>Crest length (m):</b>	590
<b>Face area (m<sup>2</sup>):</b>	106,000
<b>Volume of rockfill (m<sup>3</sup>)</b>	12,500,000
<b>Reservoir capacity (Mm<sup>3</sup>):</b>	1480
<b>Rock Type:</b>	Basalt
<b>%Reinforcement:</b>	0.4 - 0.5
<b>Rated power per turbine:</b>	300 MW
<b>Turbine discharge:</b>	3 x 186 m <sup>3</sup> /s
<b>Total investment:</b>	\$ 671 Million
<b>Problem concerned:</b>	Spalling (horizontal compression in the central part of face slab)



# Flow through the dam



1. First vertical crack detected
2. Shear crack detected
3. Filling material into the crack





**It took more than 8 months for reoperation.  
Repair costs and penalties are about \$110.9 million  
(~20% of the price tag)**

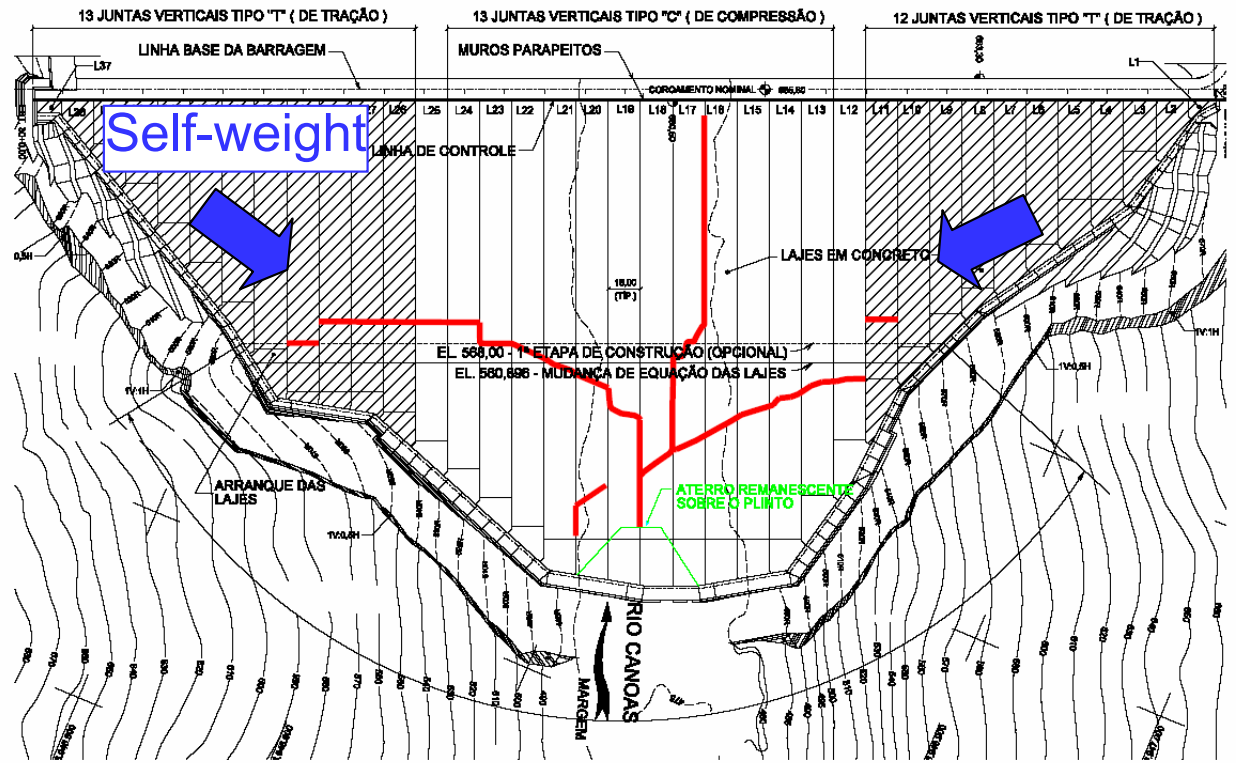




# Cracking of face slab

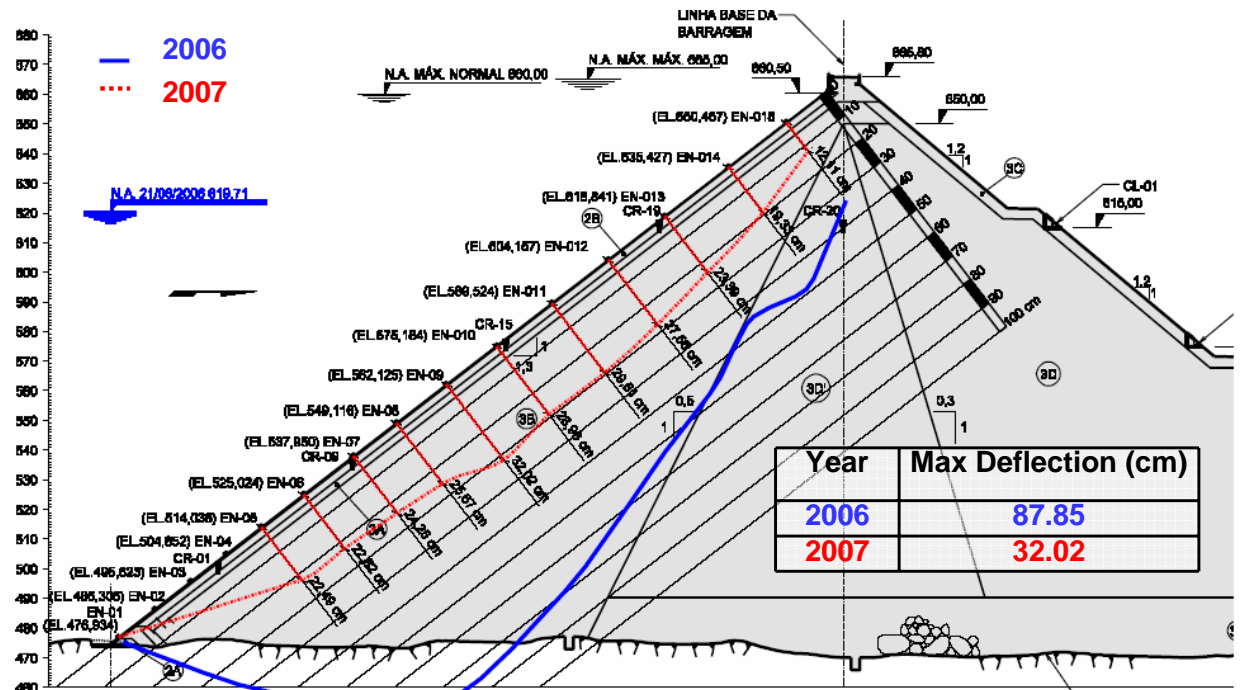
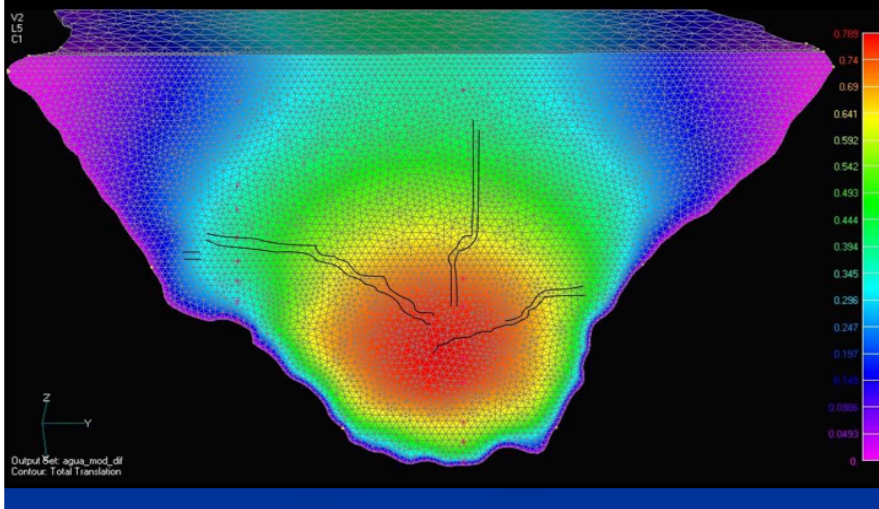


It was reported that the water lowering was caused by the failure of a diversion tunnel. (ENR, 2006)

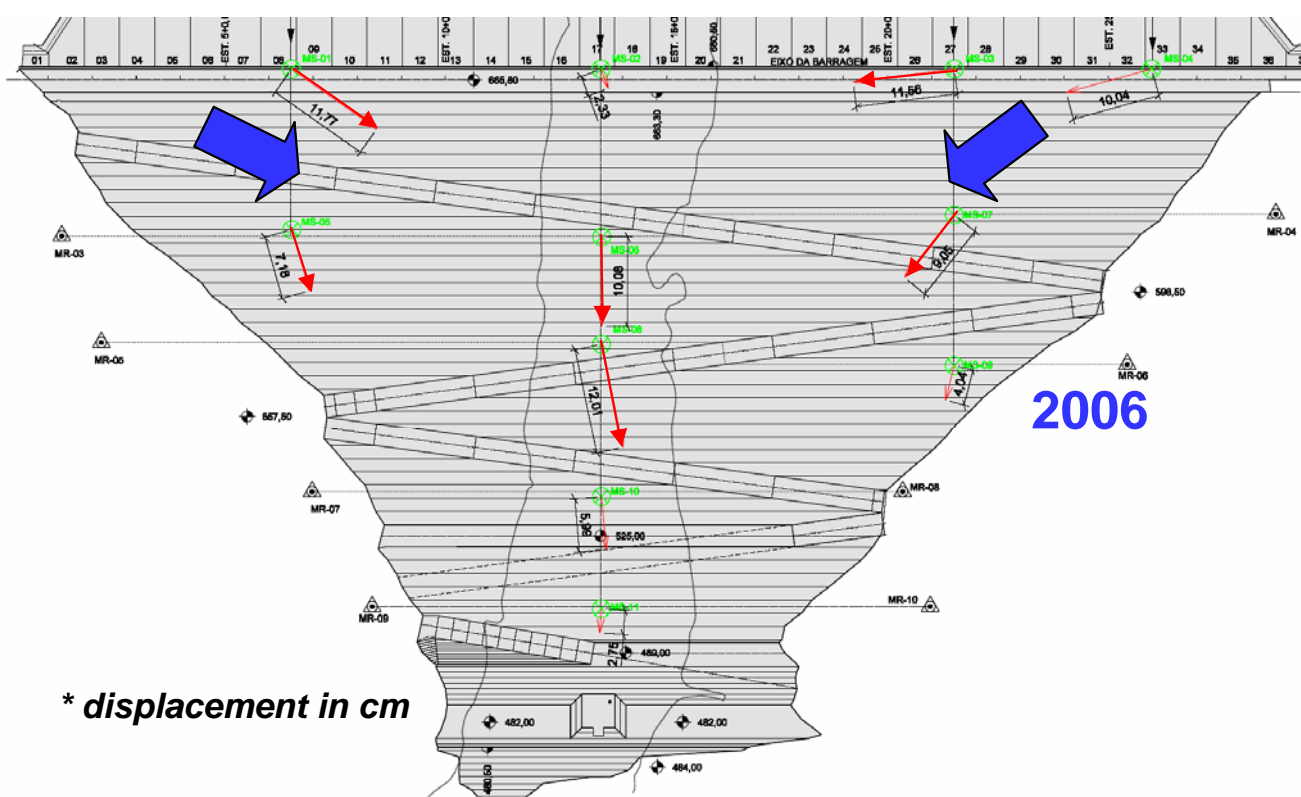


Mapeamento das Lajes Trincadas

# FEM analysis for stresses

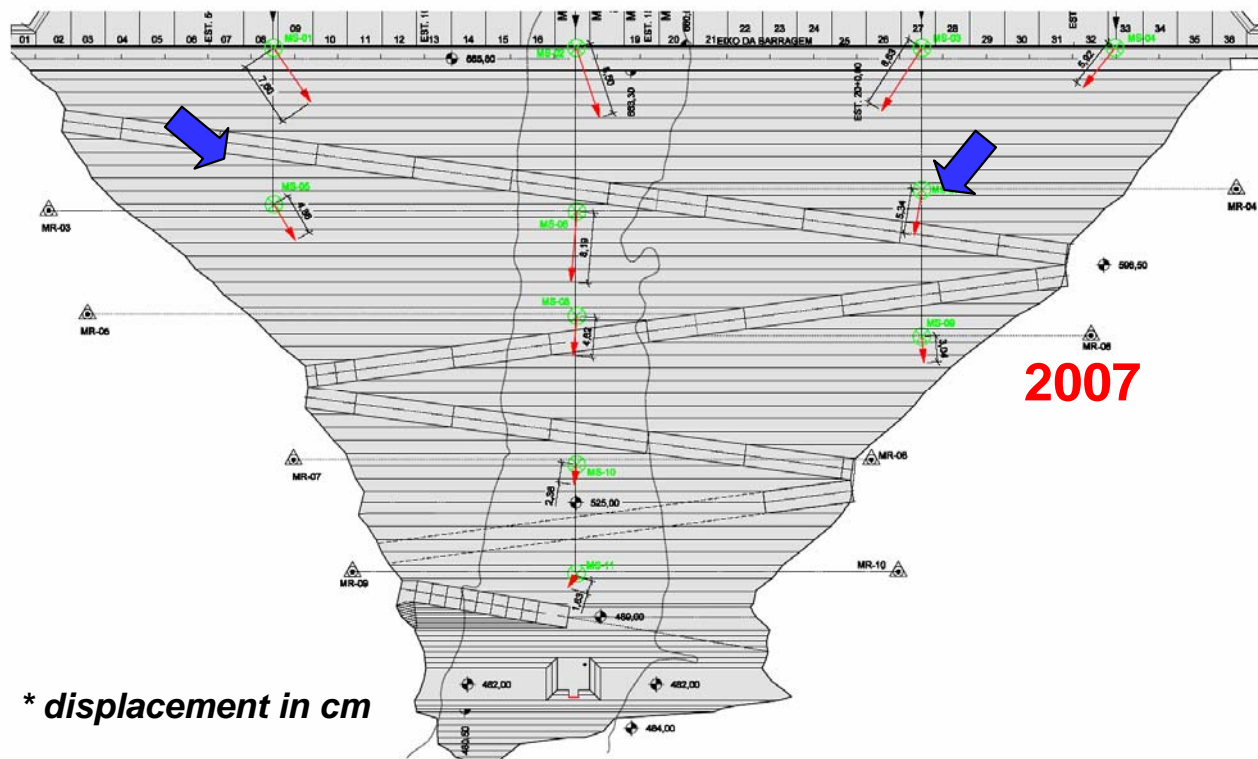


(Xavier et al, 2008)



\* displacement in cm

2006



\* displacement in cm

2007

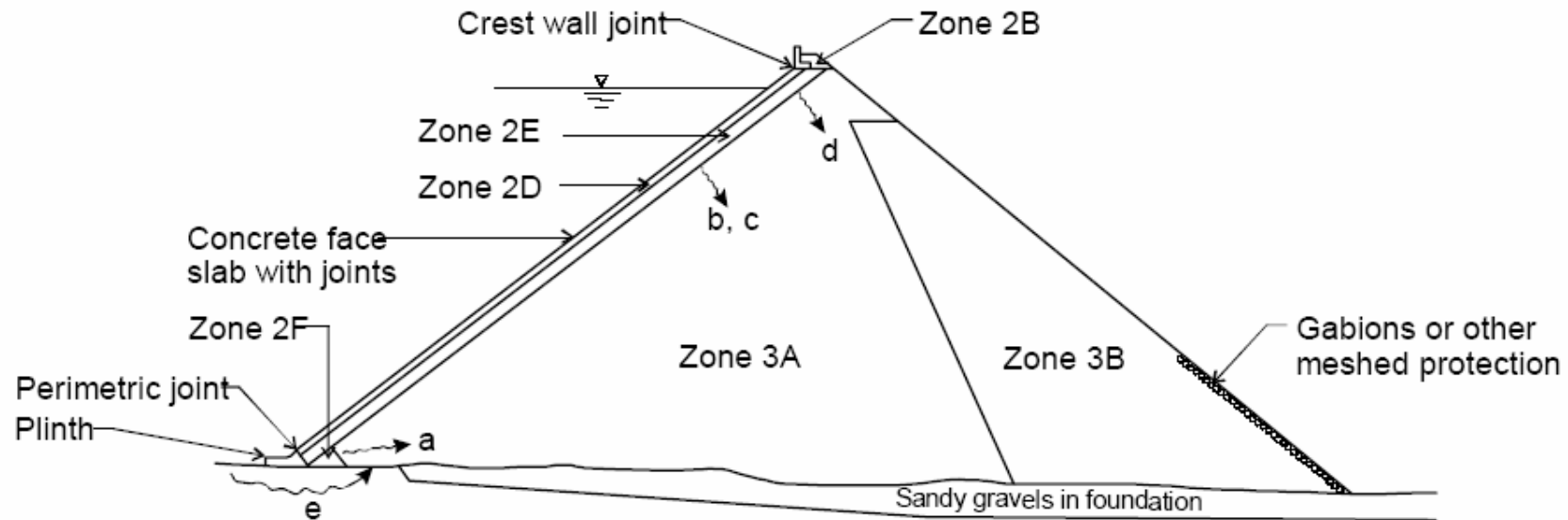
Longitudinal movements were measured from the downstream surface monuments.

Xavier et al (2008) concluded that

1. Longitudinal movement induced over compressive stress during first impounding.
2. 2D FE studies have not represented the movement at the central portion.



# System Responses of CFRDs



Initiation of a concentrated leak → Continuation → Progression → Breach

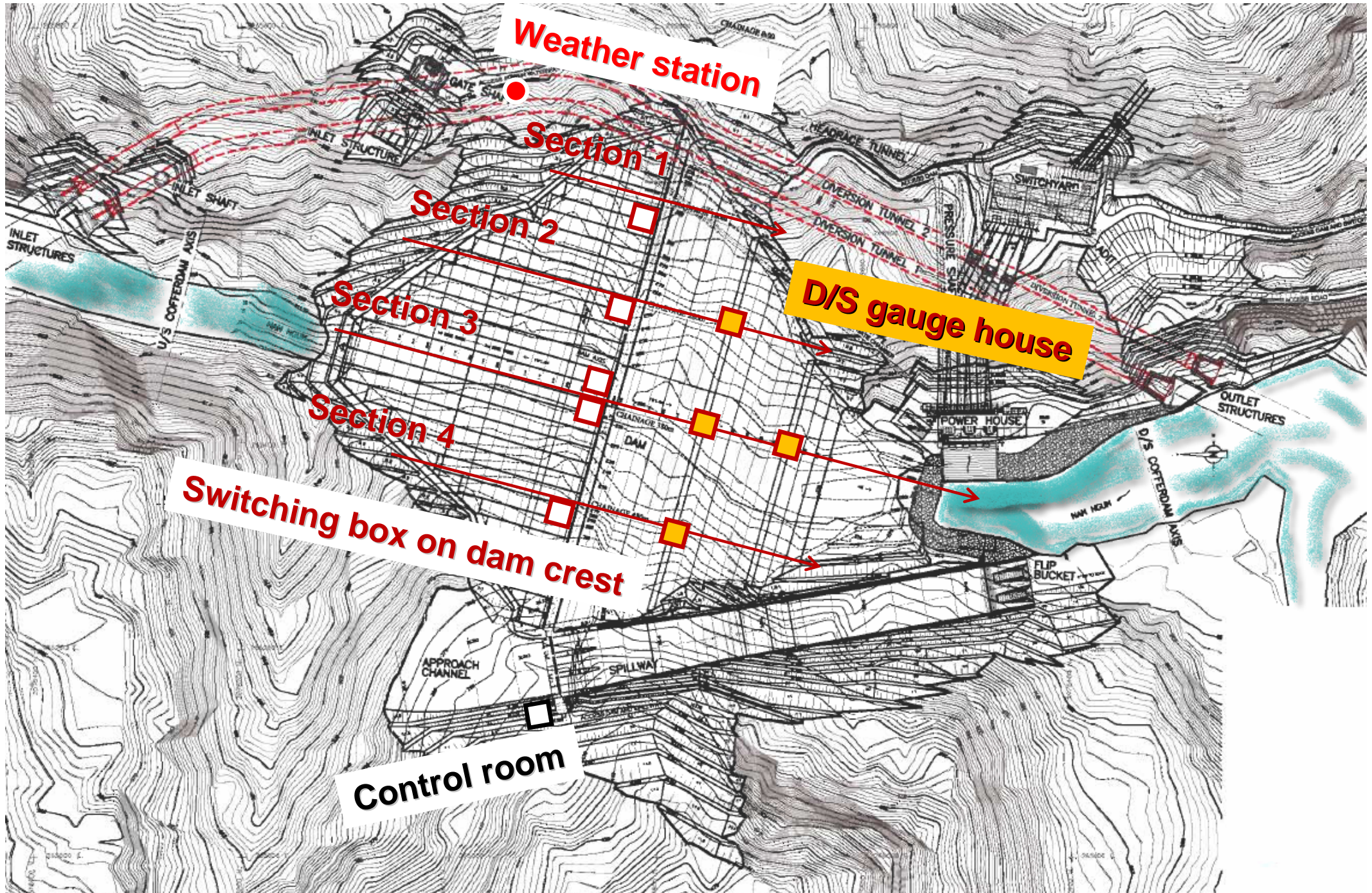
Opening of perimetric joint	(a)	Will zones 2D, 2E	Will the leak progressively	Will overall instability of the
Opening of vertical joints	(b)	2F and 3A act as a	erode fines (or form a pipe),	downstream slope, or
Cracking of the face slab	(c)	filter system according	leading to progressively	unravelling occur, leading to
Opening of the crest wall joints	(d)	to filter design criteria?	larger leakage?	loss of freeboard?
Internal erosion and piping of the foundation under the plinth	(e)			

# Features of NN2 HP Project

<b>Dam Type :</b>	<b>Concrete Faced Rockfill (CFRD)</b>
<b>Dam Height:</b>	<b>182 m</b>
<b>Area of Faced slab:</b>	<b>88,000 m<sup>2</sup></b>
<b>Crest Length:</b>	<b>485 m</b>
<b>Crest Elevation:</b>	<b>+381 m ASL</b>
<b>Dam Slopes (V:H):</b>	<b>1 : 1.4</b>
<b>Full Supply Level (FSL):</b>	<b>+375 m ASL</b>
<b>Minimum Operation Level (MOL):</b>	<b>+345 m ASL</b>
<b>Catchment Area:</b>	<b>5640 sq km</b>
<b>Average Annual Inflow:</b>	<b>6,270 MCM</b>
<b>Storage @ FSL:</b>	<b>6,774 MCM</b>
<b>Active storage:</b>	<b>2,994 MCM</b>

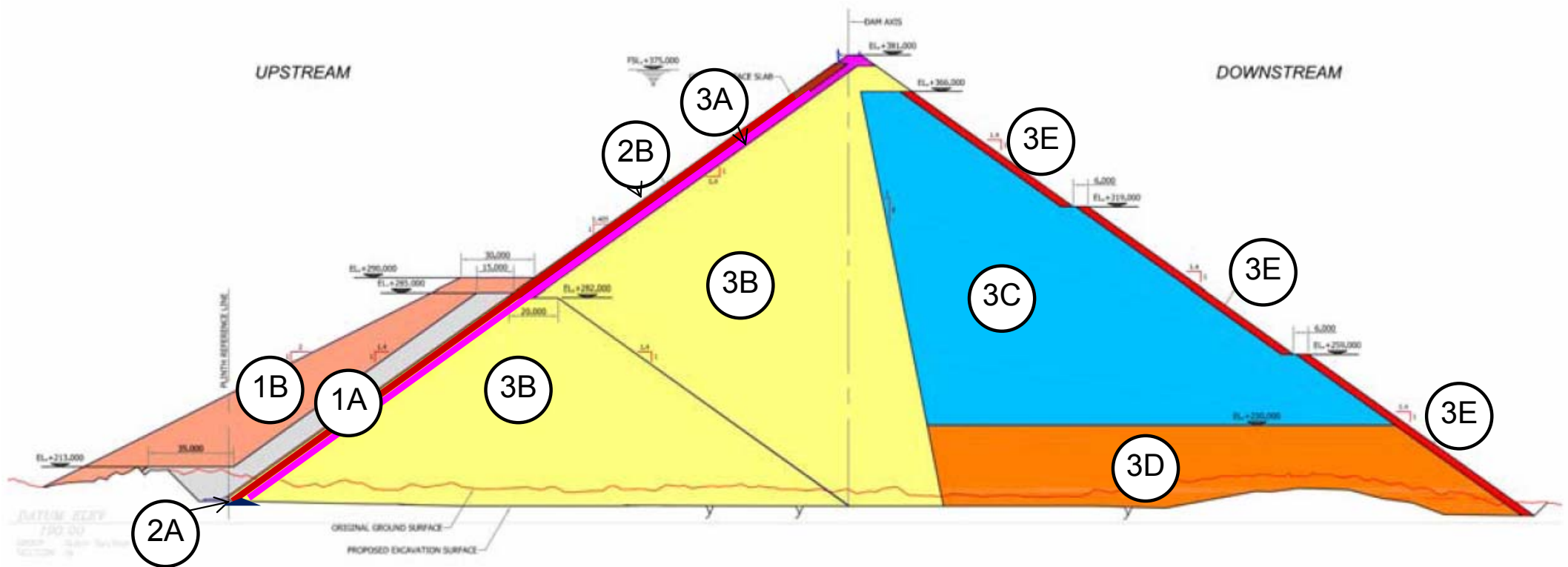


# Layout of NN2 dam





# Typical Dam Section



- 1A Selected fined grained soil
- 1AA Non cohesion silt (cover joint only)
- 1B Random fill
- 2A Perimeter zone filter - Sandy gravel (Max 19mm)
- 2B Dam face bedding layer - Sandy gravel (Max 76mm)

- 3A Transition zone - Selected small quarry run rockfill
- 3B Rockfill – Sound sandstone
- 3C Rockfill – Sandstone
- 3D Rockfill (Drainage zone) – Selected sandstone
- 3E Oversized rockfill

# Dam Instruments in NN2 HP

There are totally **475** sensors and many kinds of instrument and they can be grouped by dam behaviour as follows:

**1. Seepage and water pressure in foundation:** Piezometers and Seepage flowmeter (V-Notch wier)

**2. Displacement of dam body:** Monuments, Hydrostatic settlement cells, Fixed embankment extensometers, Inclinometers with magnetic settlement gages

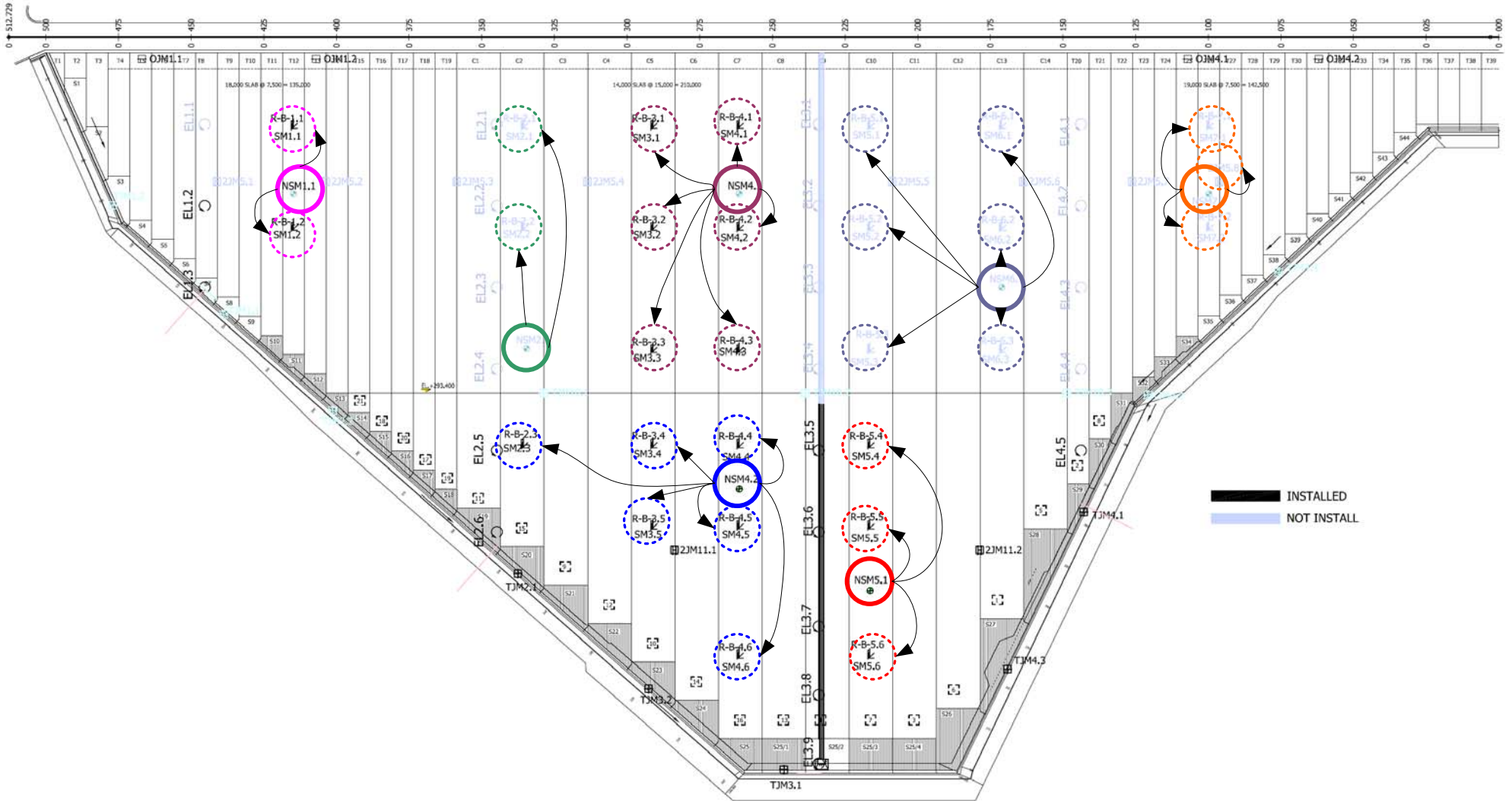
**3. Displacement of face slab:** Monuments, Inclined inclinometer, Electro-level (Tiltmeters), Jointmeters (1D, 2D and 3D)

**4. Stress and strain:** Embedded strainmeters, Non stress strainmeters and Rebar strainmeters

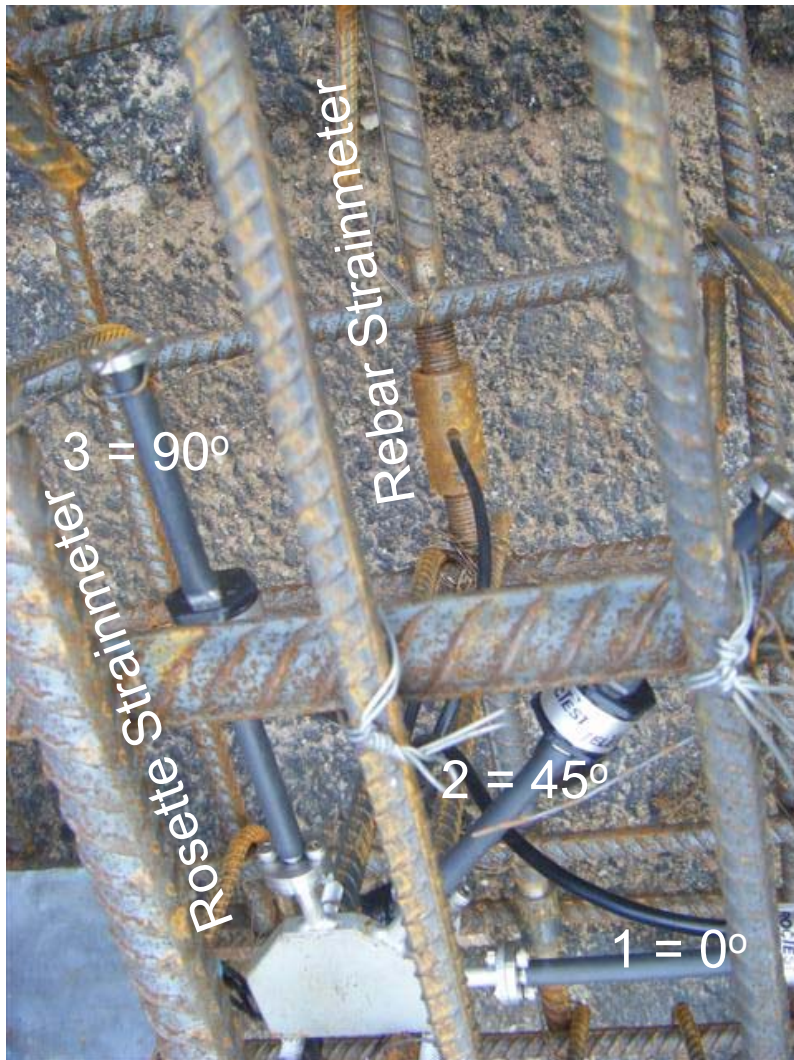
**5. Environmental condition:** Reservoir level, Rain gauge, Anemometer, Accelerometer



# Referenced NSM for Strainmeters



# Major and Minor Principle Strain



$\varepsilon_m$  = major principal strain

$\varepsilon_n$  = minor principal strain

$\phi$  = direction of major principal strain

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1))^2}{2}}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1))^2}{2}}$$

$x, y$  = coordination

$\varepsilon_{\theta}$  = normal strain along angle  $\theta$  with  $x$ -axis

$\varepsilon_x$  = normal strain in  $x$  direction

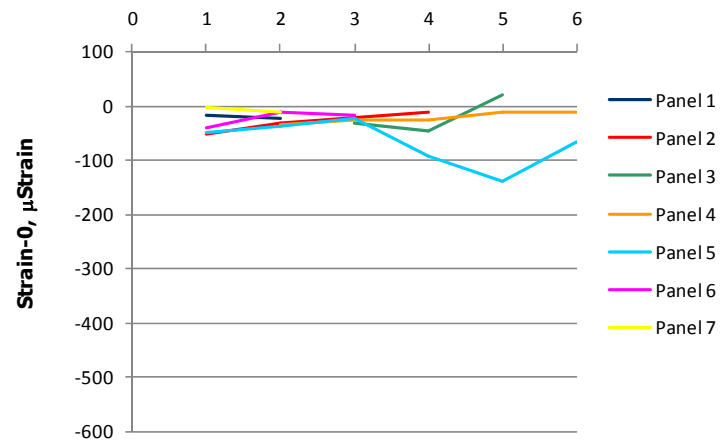
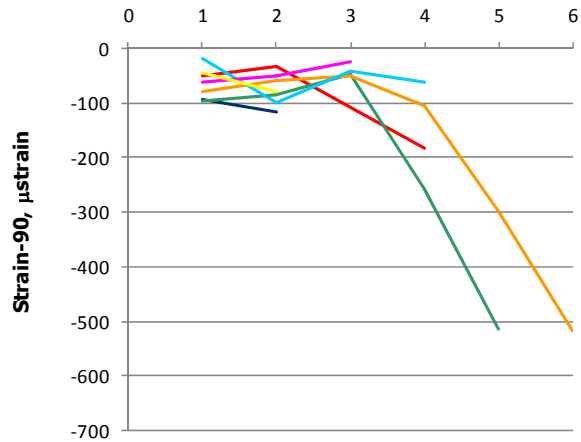
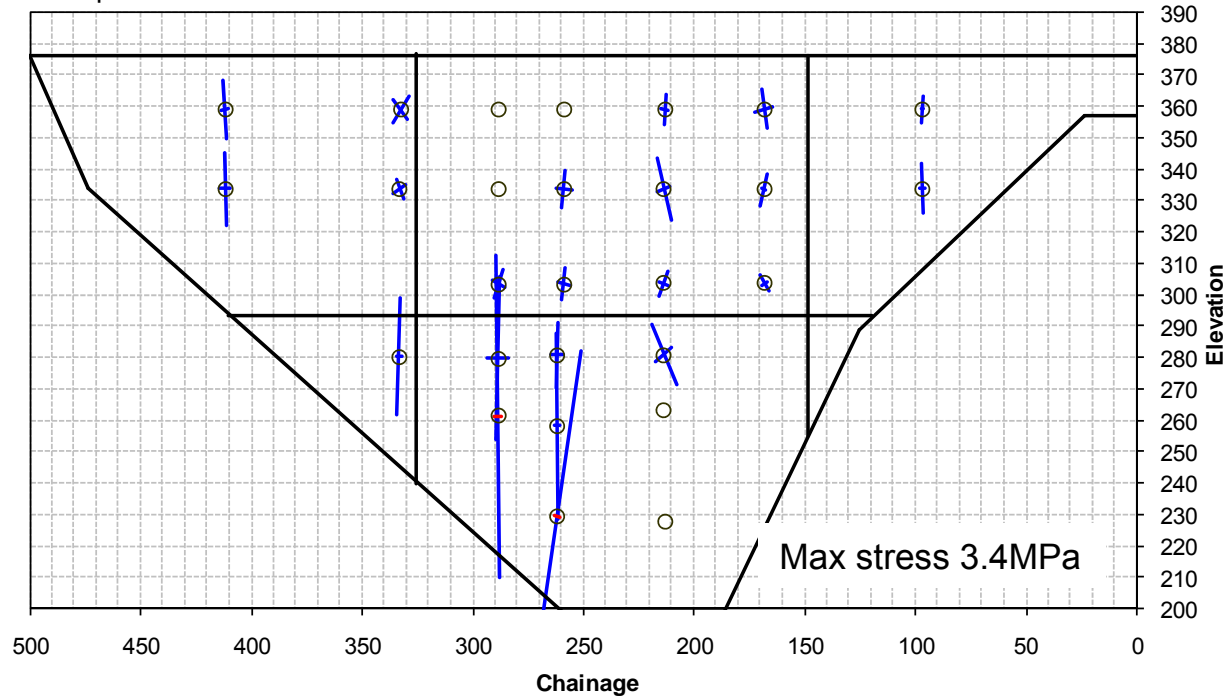
$\varepsilon_y$  = normal strain in  $y$  direction

$\gamma_{xy}$  = shear strain on  $xy$  plane

$$\tan 2\phi = \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}$$

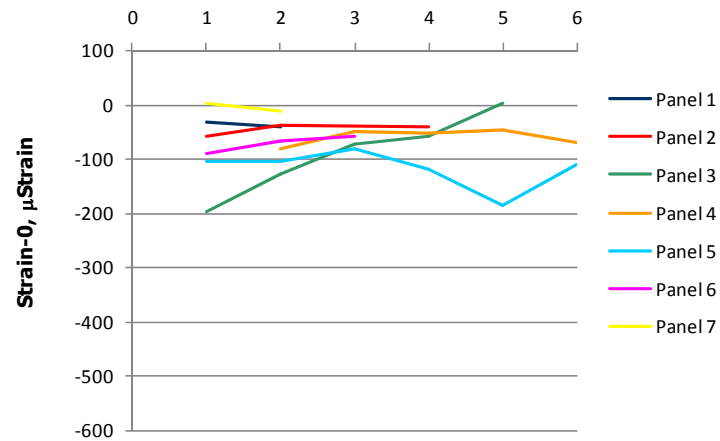
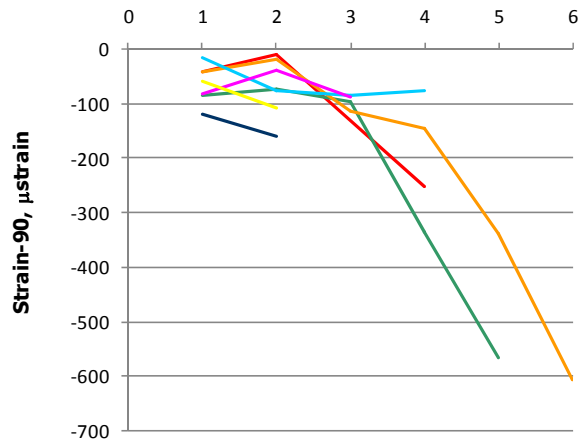
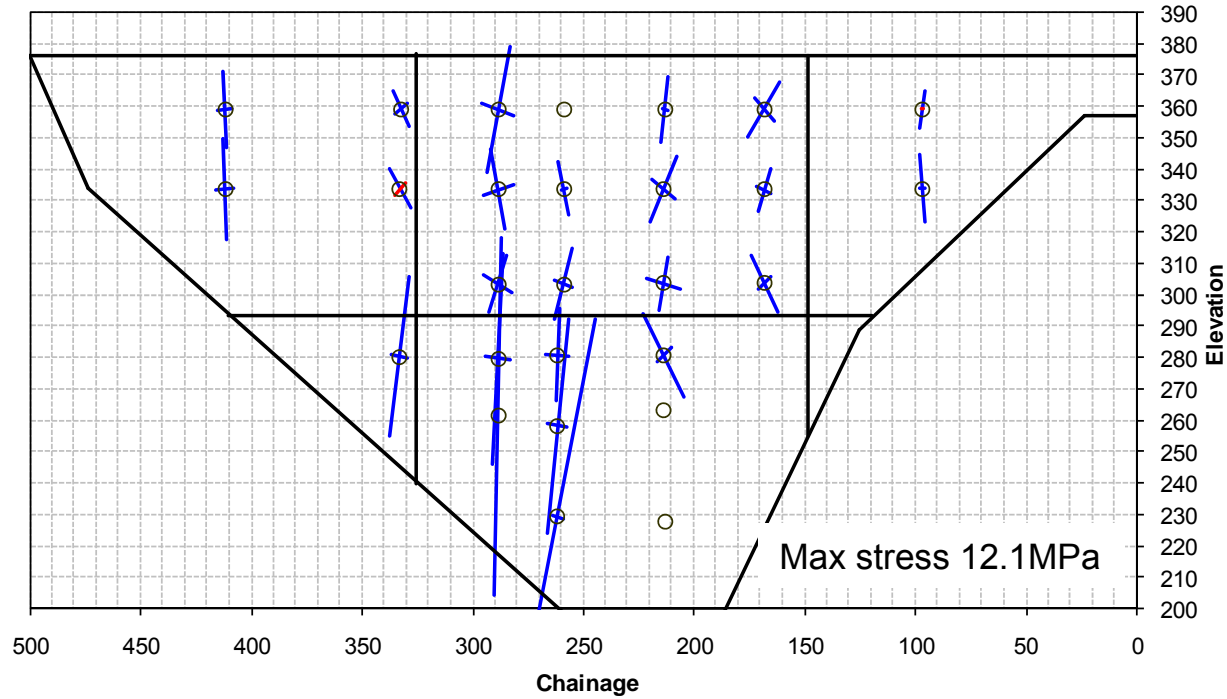
# Strains within Face Slab

30-Apr-10



# Strains within Face Slab

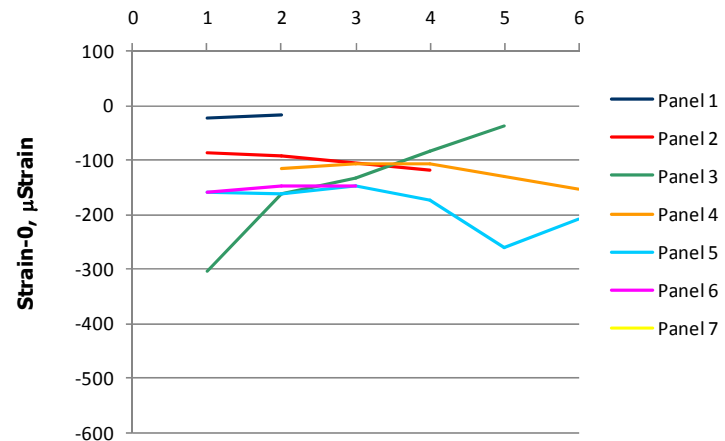
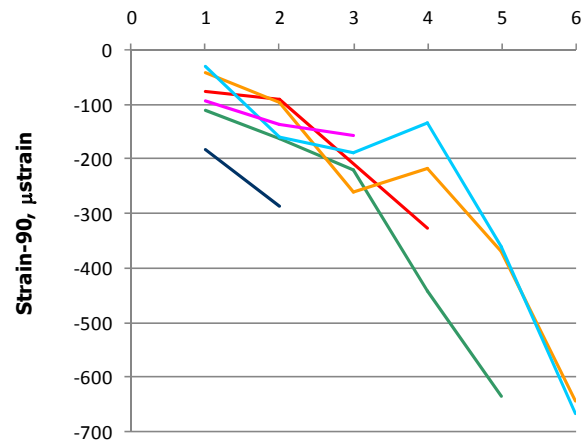
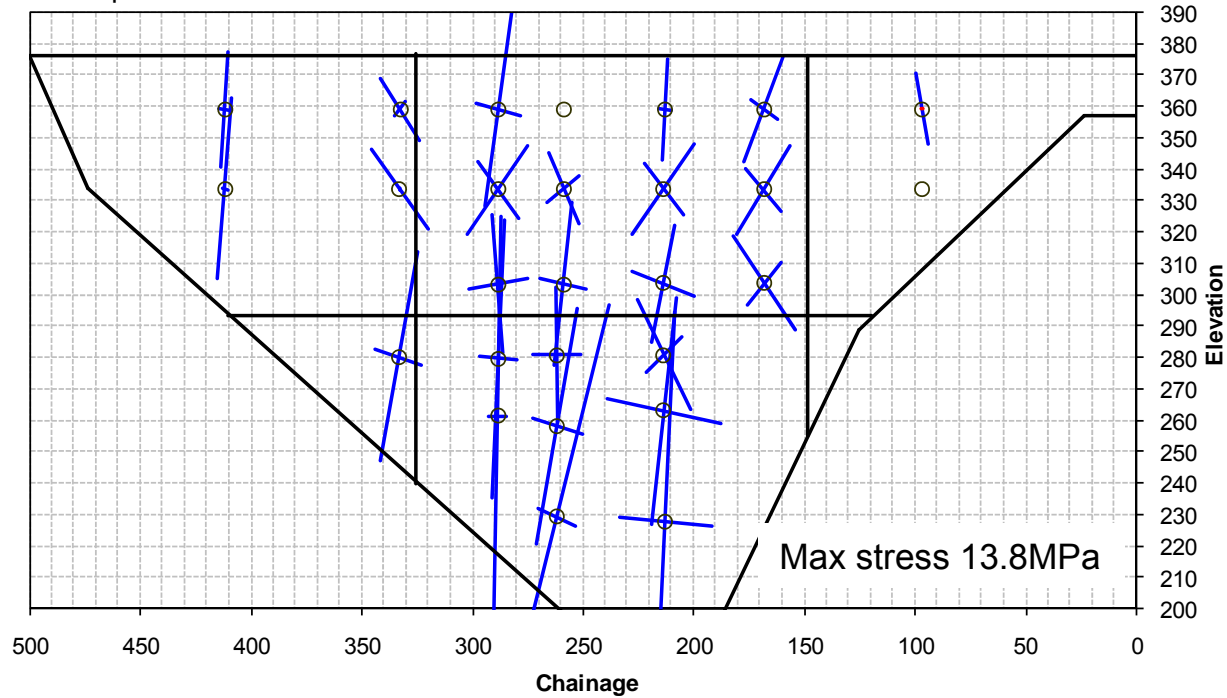
30-Jul-10





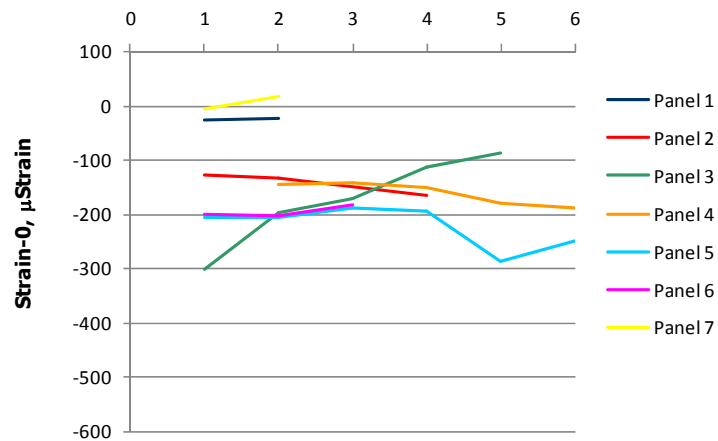
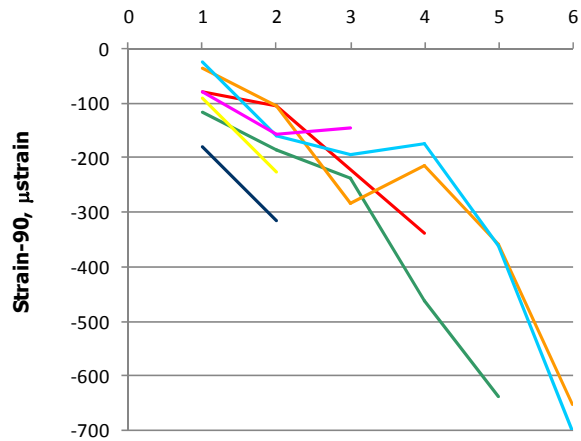
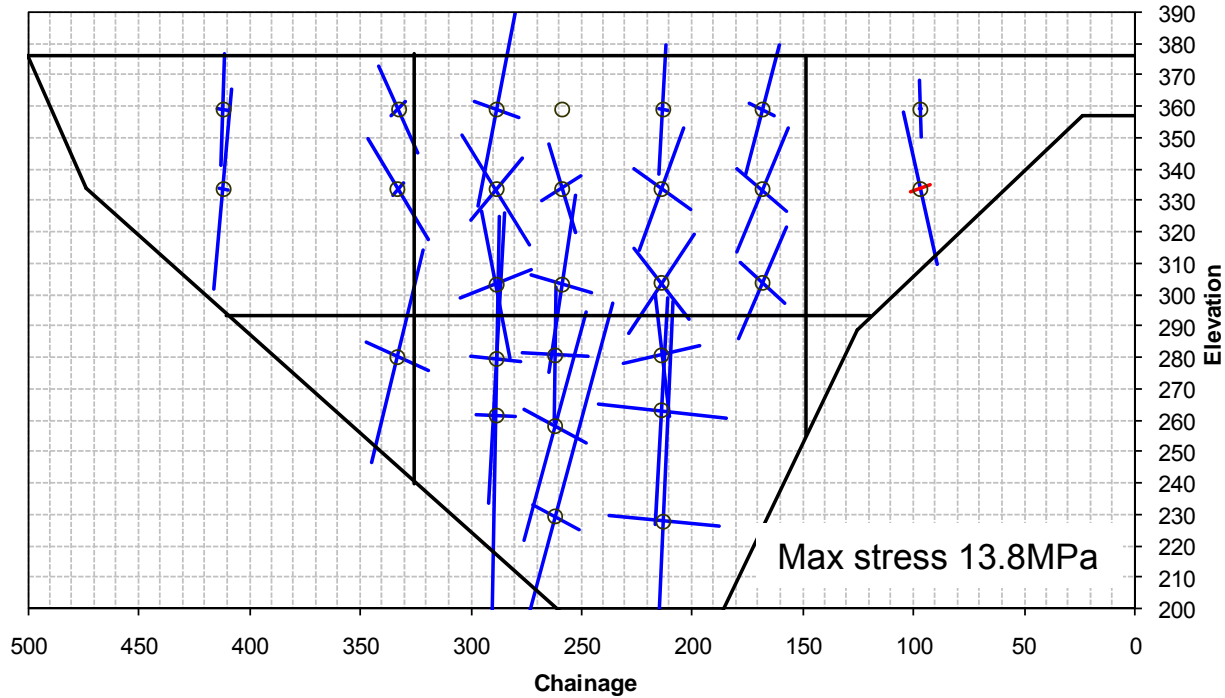
# Strains within Face Slab

30-Sep-10

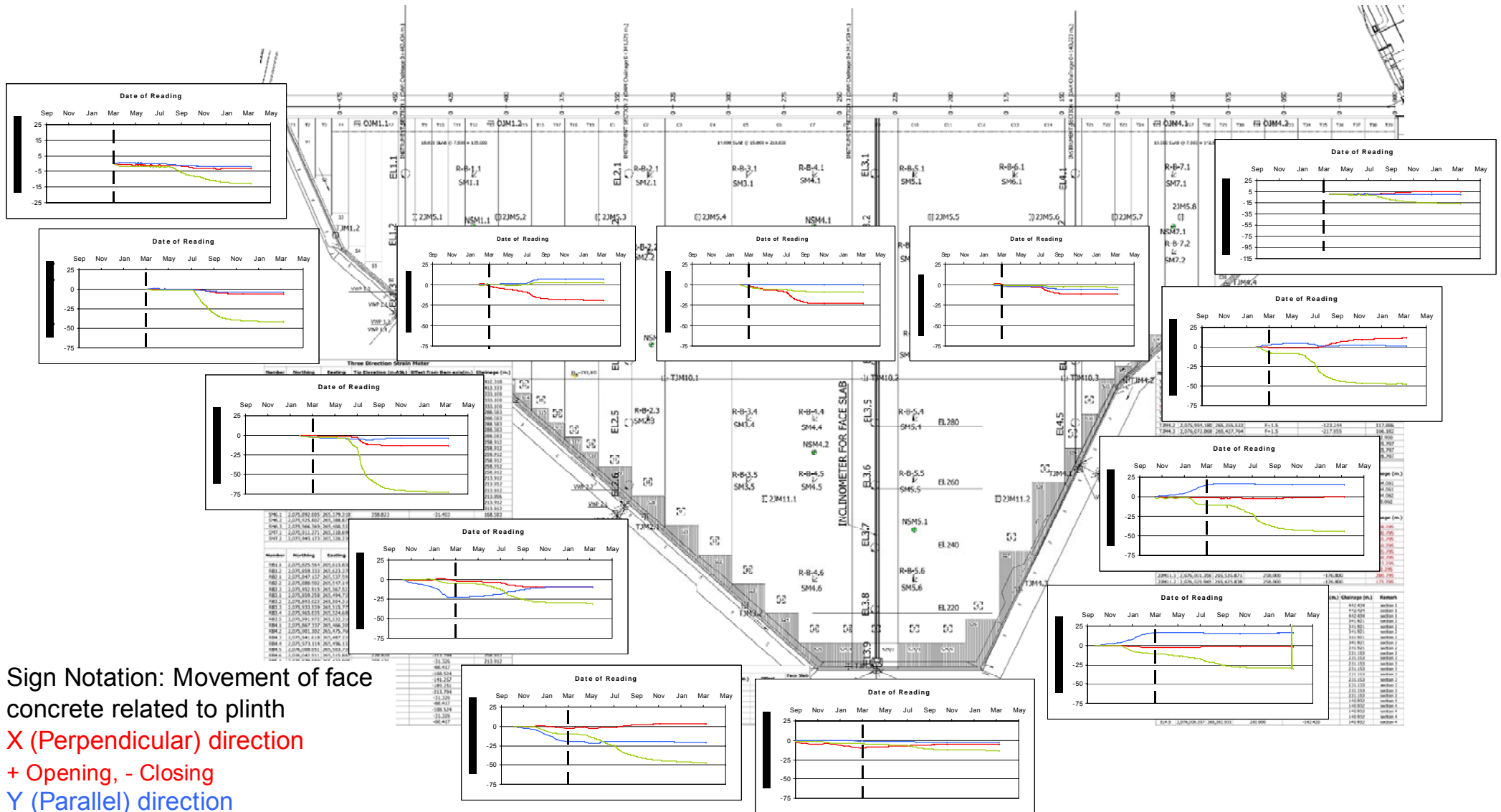


# Strains within Face Slab

30-Dec-10



# Perimetric Joint Movement

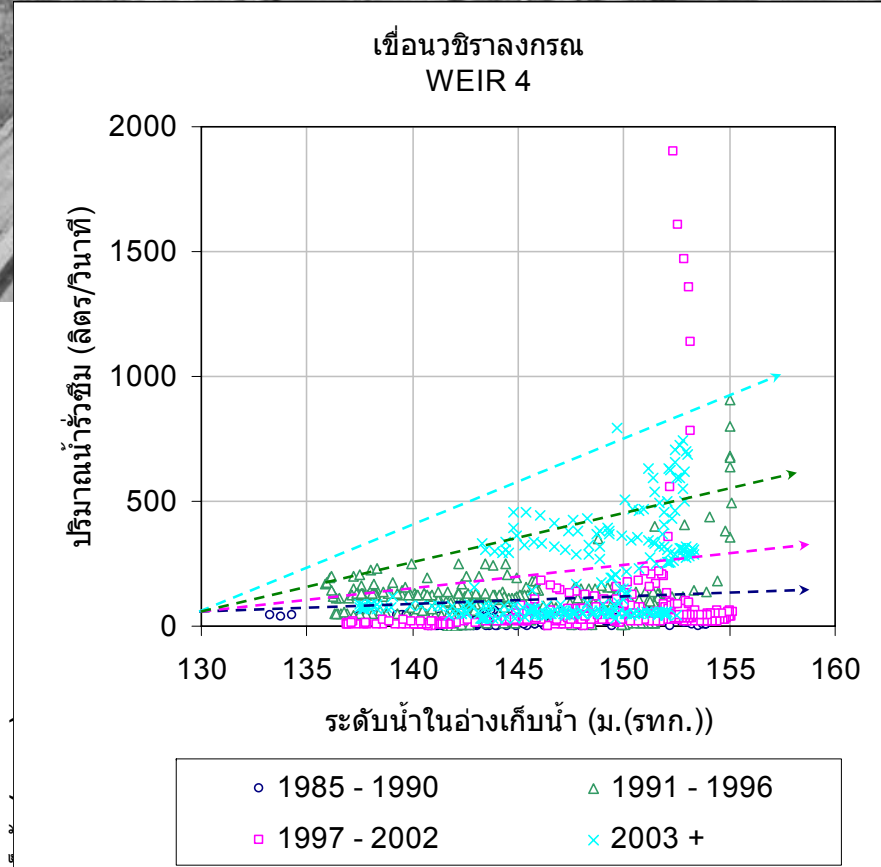
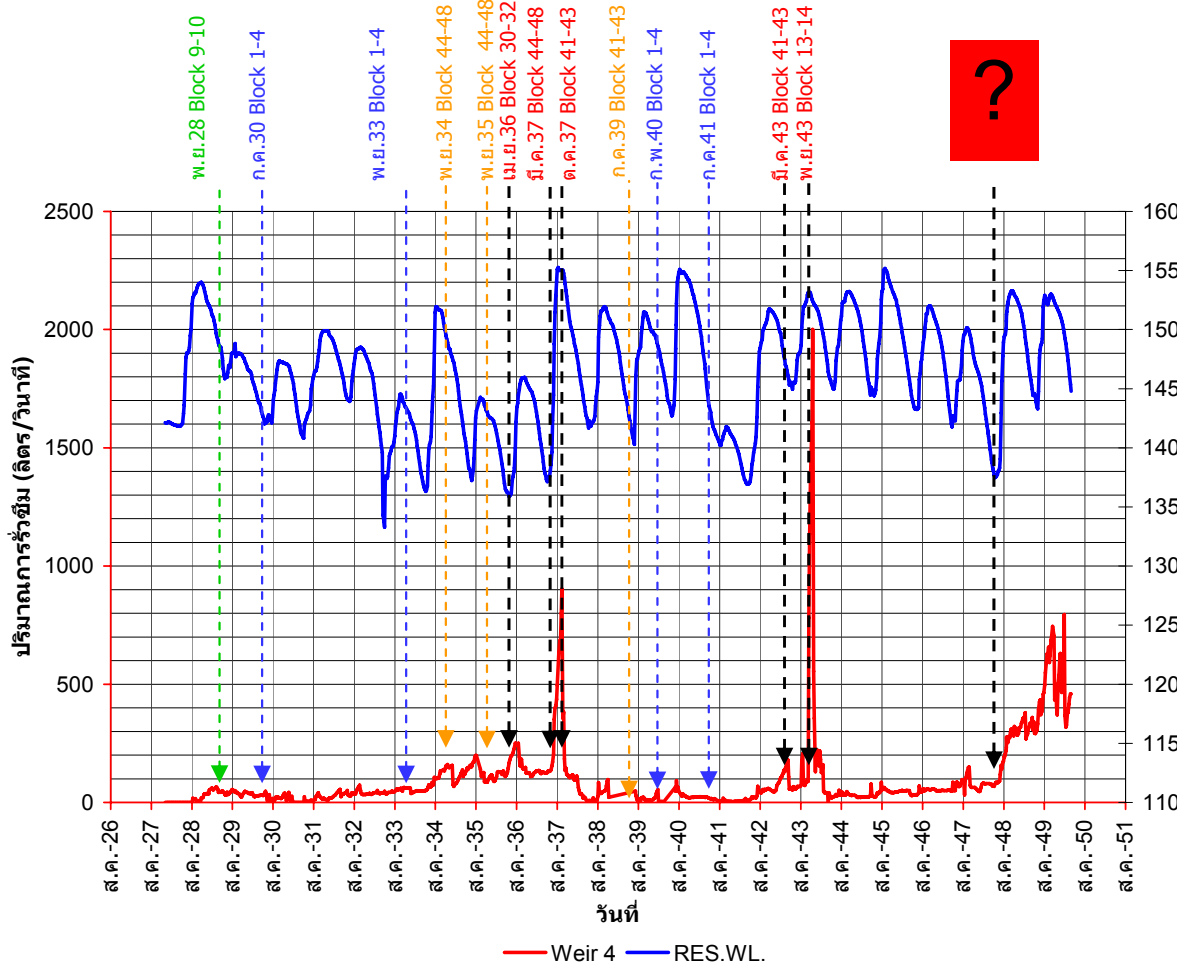


Sign Notation: Movement of face concrete related to plinth

- X (Perpendicular) direction
- + Opening, - Closing
- Y (Parallel) direction
- + Toward to LT, - Toward to RT
- Z (Settlement) direction
- + Upward, - Downward

# อัตราการไหลเร็วผ่านตัวเขื่อน

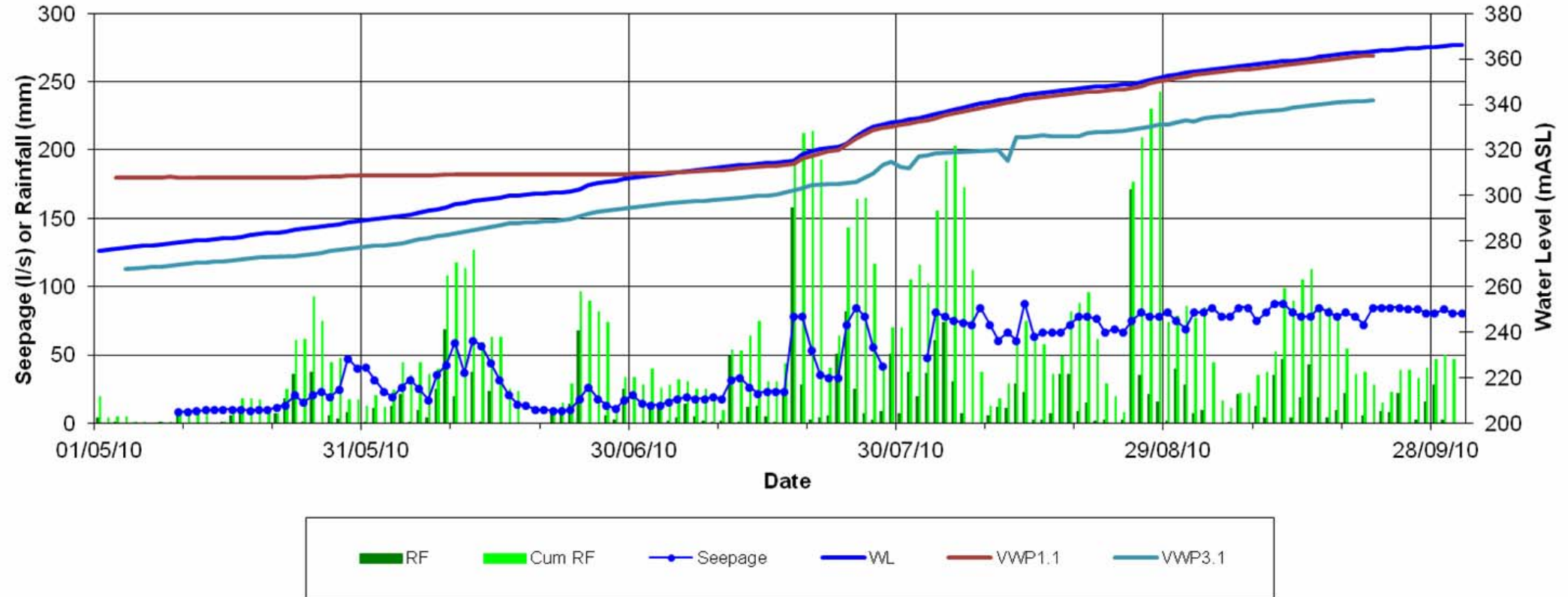
ปริมาณการรั่วซึมจาก Weir ซึ่งรับน้ำจากตัวเขื่อนด้านซ้ายของคลองผันน้ำ การรั่วซึมเกิดขึ้นไม่มากใน 5 ปีแรก แต่เมื่อตรวจพบรอยรั่วที่ปีกด้านซ้ายในปี 2534 ปริมาณน้ำรั่วได้เพิ่มขึ้นจากการแตกของคอนกรีตาดหน้าและต่อเนื่องถึงปัจจุบัน



แม้ว่าจะได้ซ่อมแซมคอนกรีตาดหน้าแล้วหลายครั้ง อย่างไรก็ตามปริมาณการรั่วซึมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกๆ 5 ปี



# Seepage through dam foundation

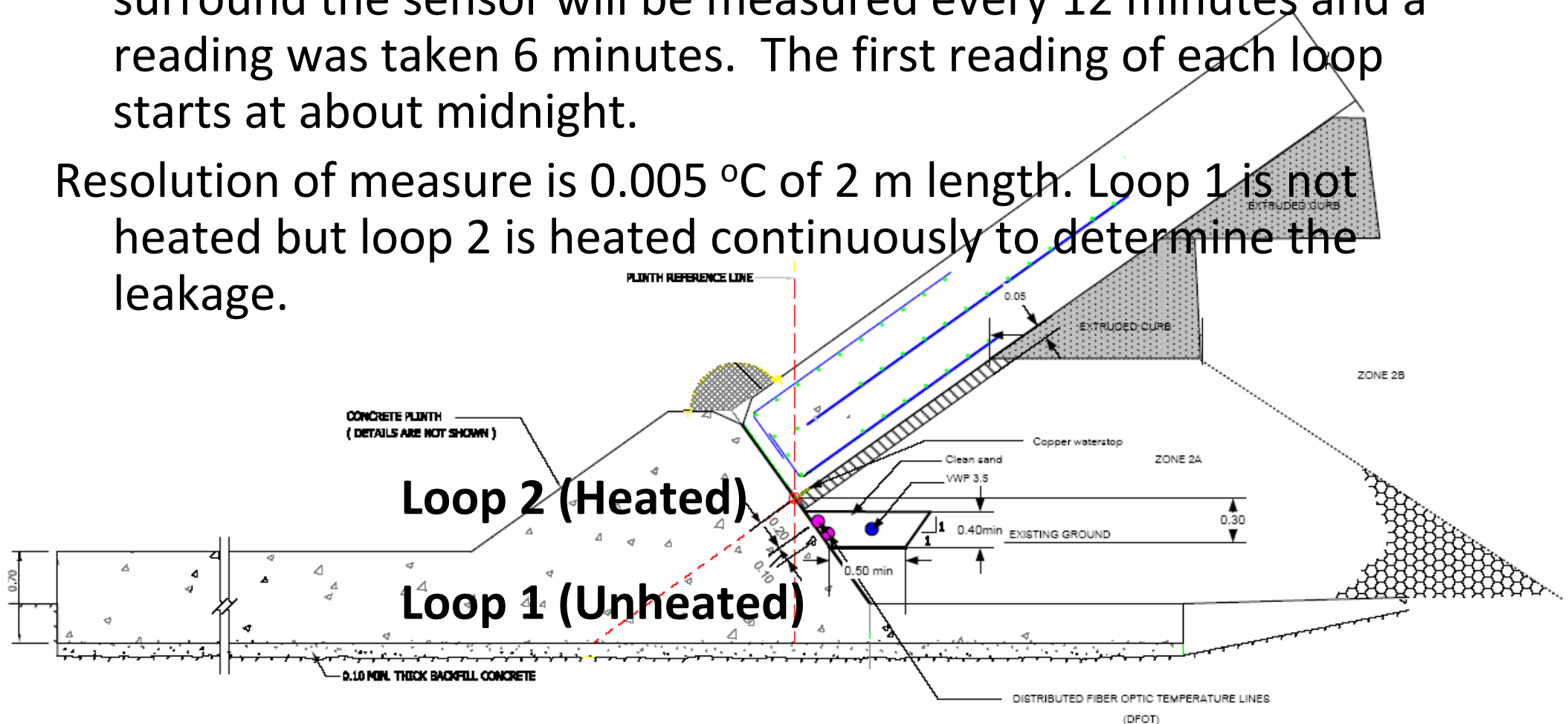


# Basis Configuration of DFOT

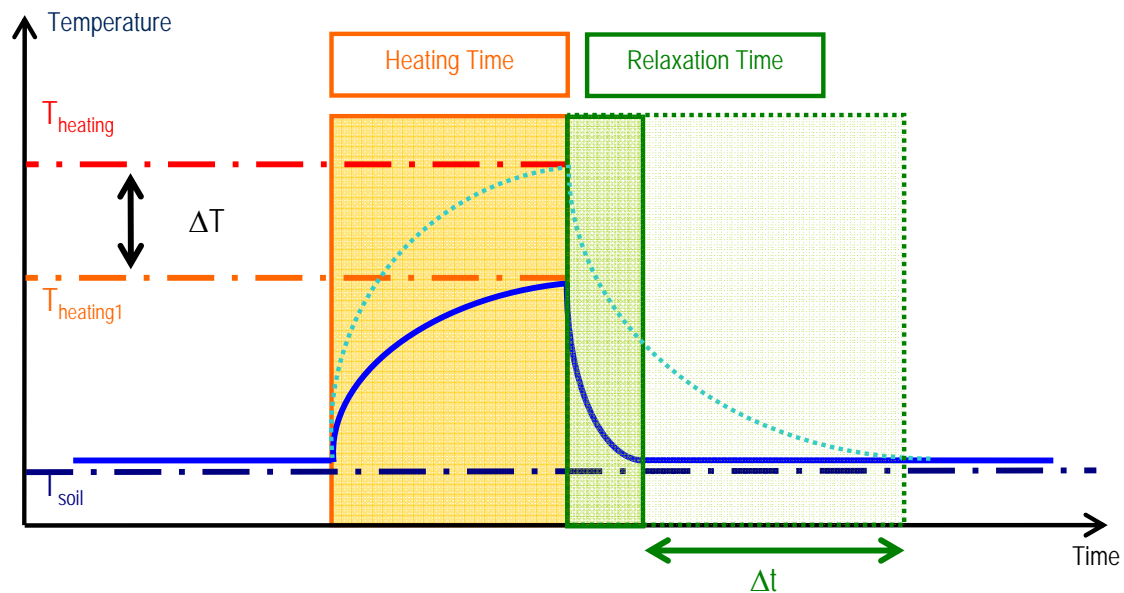
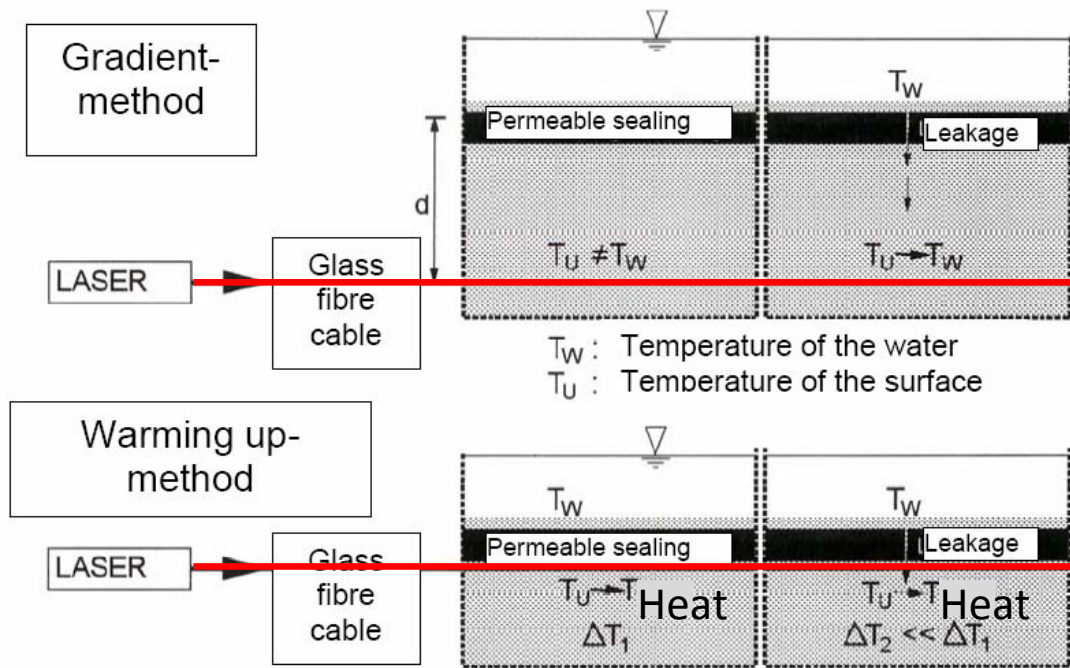
Two loops of DFOT were installed along the plinth beneath the perimeter joint.

Loop 2 is located above Loop 1 about 10 cm. The temperature surround the sensor will be measured every 12 minutes and a reading was taken 6 minutes. The first reading of each loop starts at about midnight.

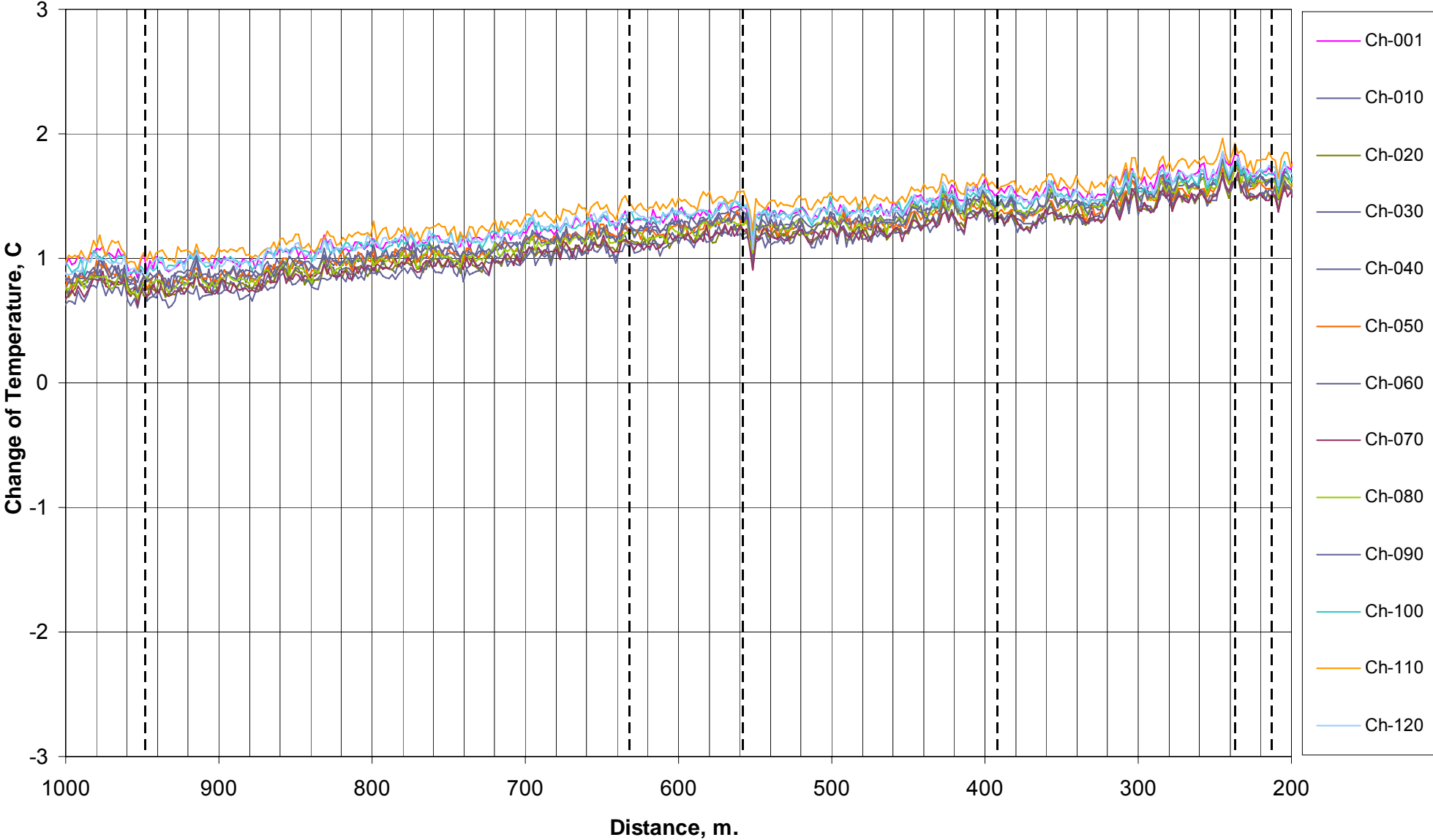
Resolution of measure is  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$  of 2 m length. Loop 1 is not heated but loop 2 is heated continuously to determine the leakage.



# Distributed Fiber Optic for Temperature (DFOT)

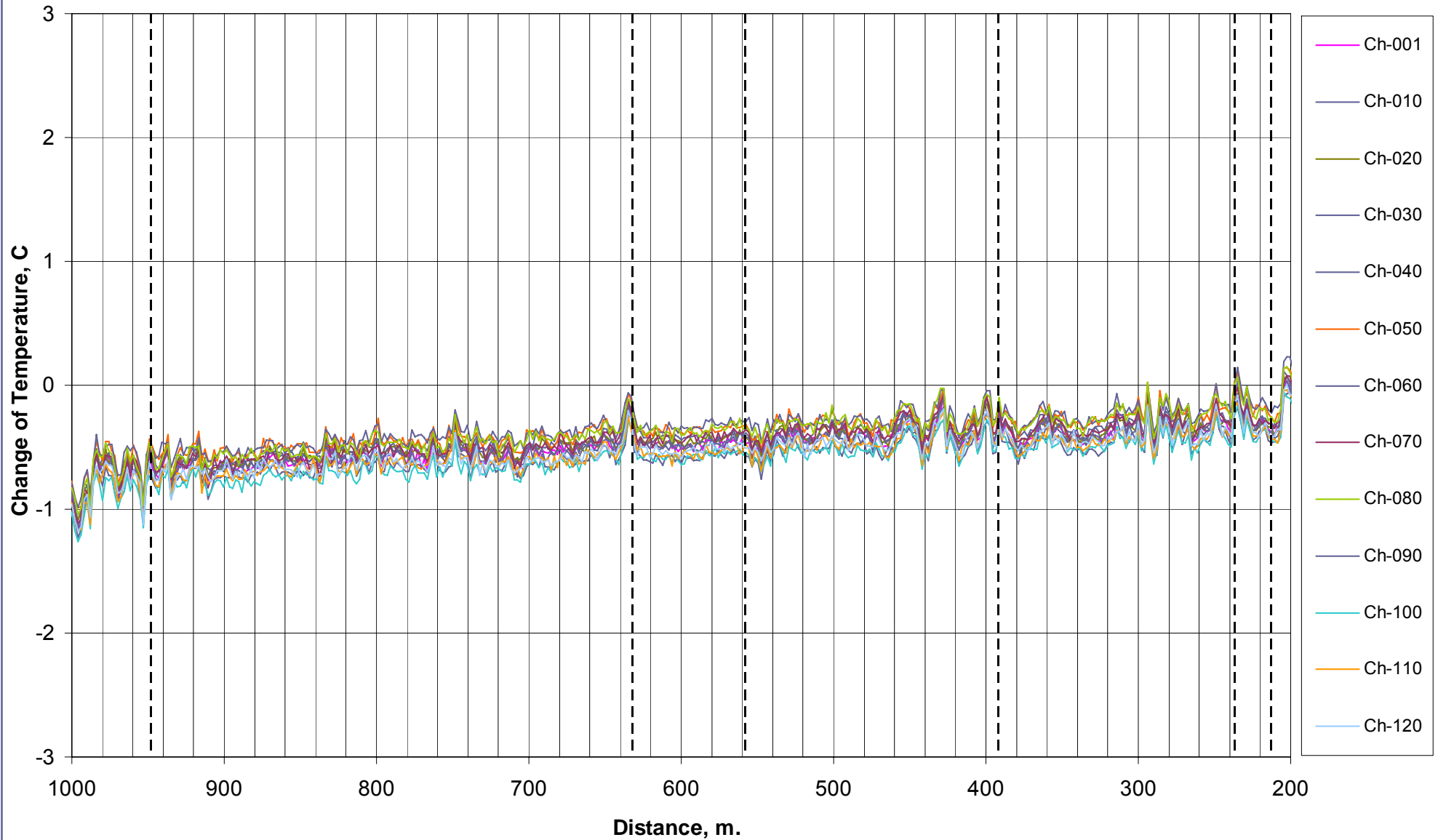


### Temperature Variation on Date 17 Sep 2010 (Loop 1-2)

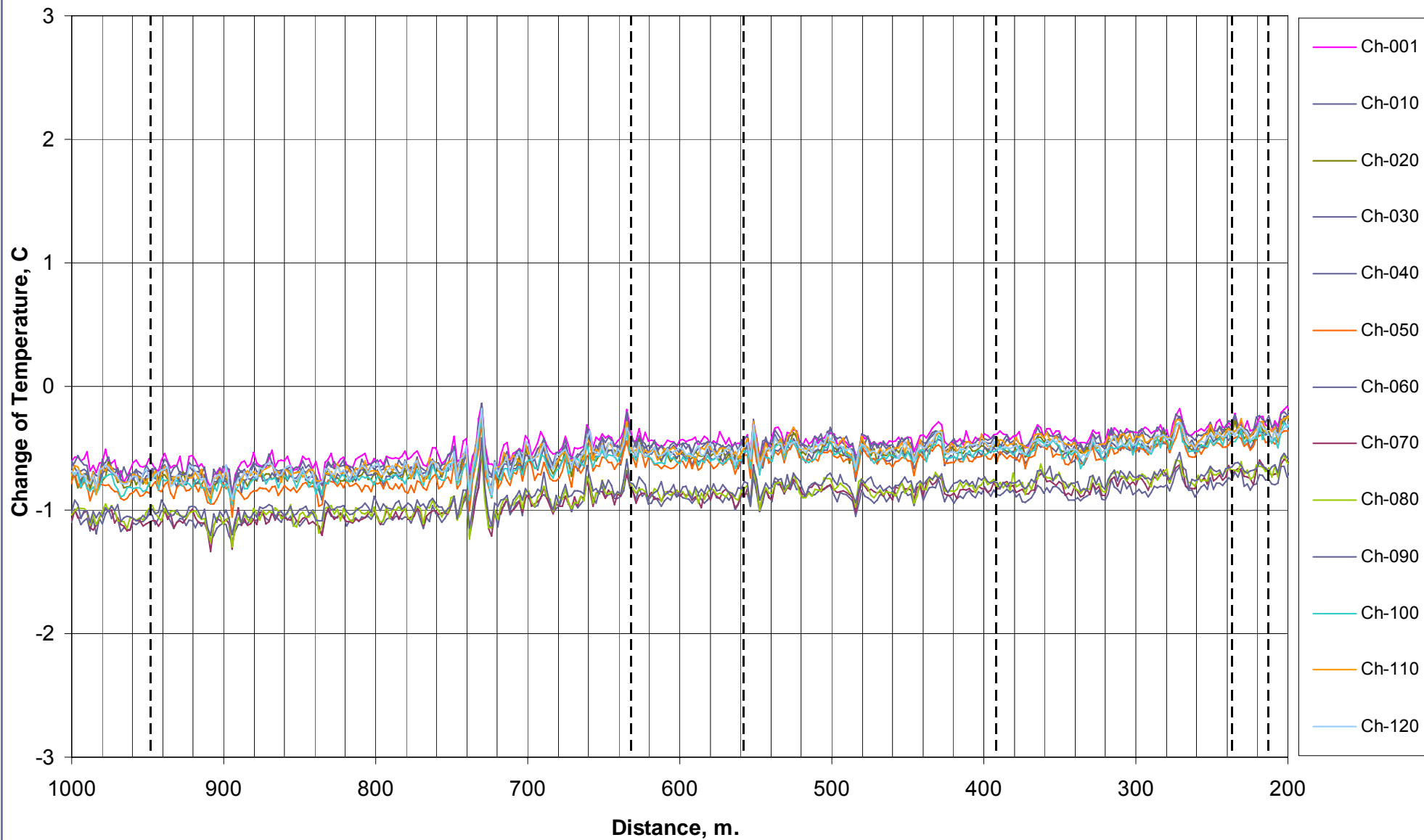




### Temperature Variation on Date 14 Oct 2010 (Loop 1-2)



### Temperature Variation on Date 17 Feb 2011 (Loop 1-2)



# สิ่งที่ทำให้เกิดความสำเร็จของการวิเคราะห์

- มีความเข้าใจทั้งพฤติกรรมเขื่อน และพฤติกรรมของวัสดุถมเขื่อน
- ข้อมูลพื้นฐานของเขื่อน องค์ประกอบของเขื่อน หน้าที่ของระบบควบคุมการไหลซึม ข้อมูลกิจกรรมระหว่างการก่อสร้าง ผลทดสอบจากการควบคุมการก่อสร้าง
- ข้อมูลของเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน ตำแหน่งของเครื่องมือวัด ข้อกำหนดของเครื่องมือวัด
- เกณฑ์เพื่อระบุความปลอดภัยในพฤติกรรมต่างๆ ที่ได้จากข้อมูลสถิติ หรือผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์





ม.การช่าง

# ถาม-ตอบ