



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

Ing. Salvatore Liccardo

*CASI STUDIO DI DIGHE
ALL'ESTERO*

10 APRILE 2024

OPEN DAY ON DAMS **AULA MAGNA LEOPOLDO MASSIMILLA**

SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE



Verifiche, Controlli, Adeguamenti



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN - HPP ROGHUN



ZAMBIA – KARIBA DAM





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN

La "Svizzera" del centro Asia

- Potenziale idroelettrico significativo: il 93% del paese è montuoso.
- Vaste riserve idriche naturali
- Potenza installata idroelettrica (2019): 6.395 MW
- Produzione per energia idroelettrica (2019): 19 TWh corrispondente a circa il 98% della produzione tagika di elettricità
- Investimenti in infrastrutture energetiche esistenti e nuove = priorità strategica per il governo

Fonte: IHA





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe

TAJIKISTAN ROGHUN HPP

- Situata sul fiume Vakhsh
- **335 m di altezza:** una volta completata sarà la diga più alta al mondo!
- Potenza installata: **3600 MW (6X600 MW)**
- Volume di materiale diga: **75 Mm³**
- Volume del bacino di monte: **11'600 Mm³**
- Indice di sostenibilità: più di **8 milioni di persone** usufruiranno dell'energia prodotta dall'Impianto

KPI di sostenibilità

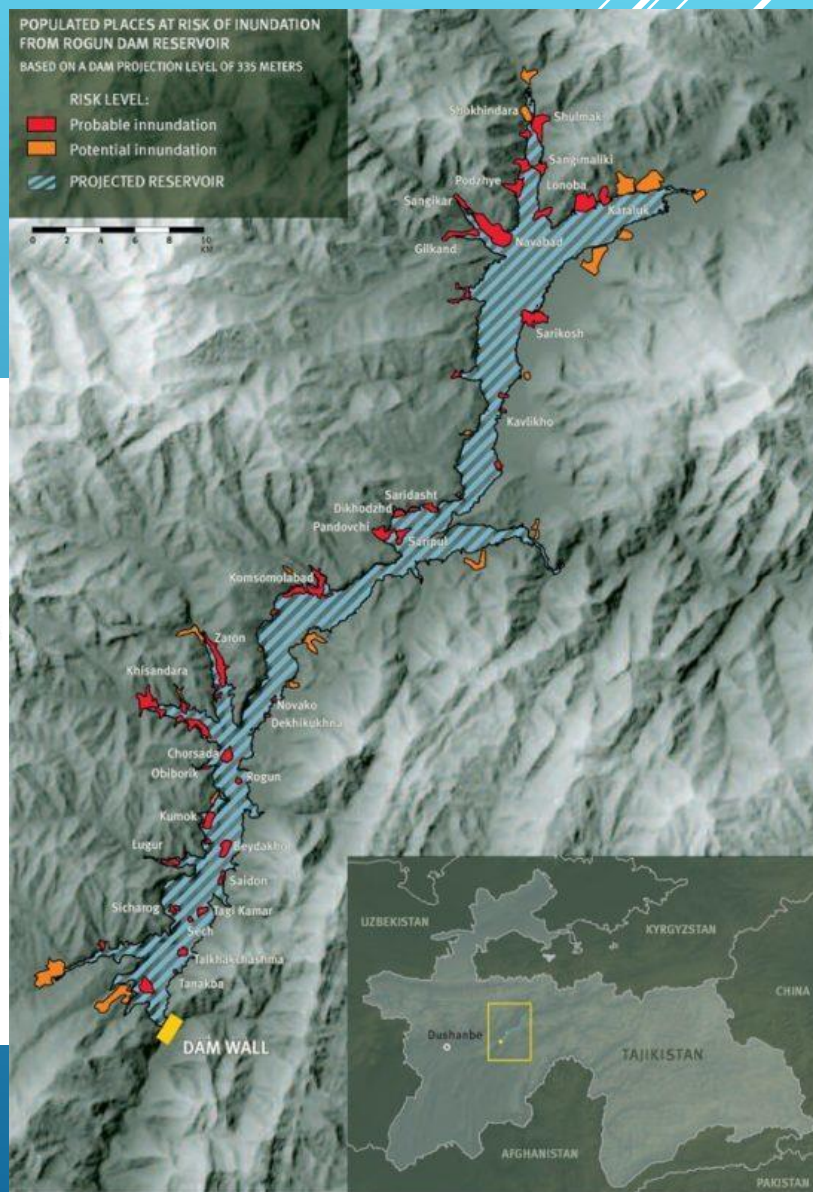
>150.000

tonnellate di CO2 evitabili
ogni anno

>8

milioni di persone il cui fabbisogno
energetico sarà ricoperto dall'impianto

Impatti positivi sui Sustainable Development goals





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



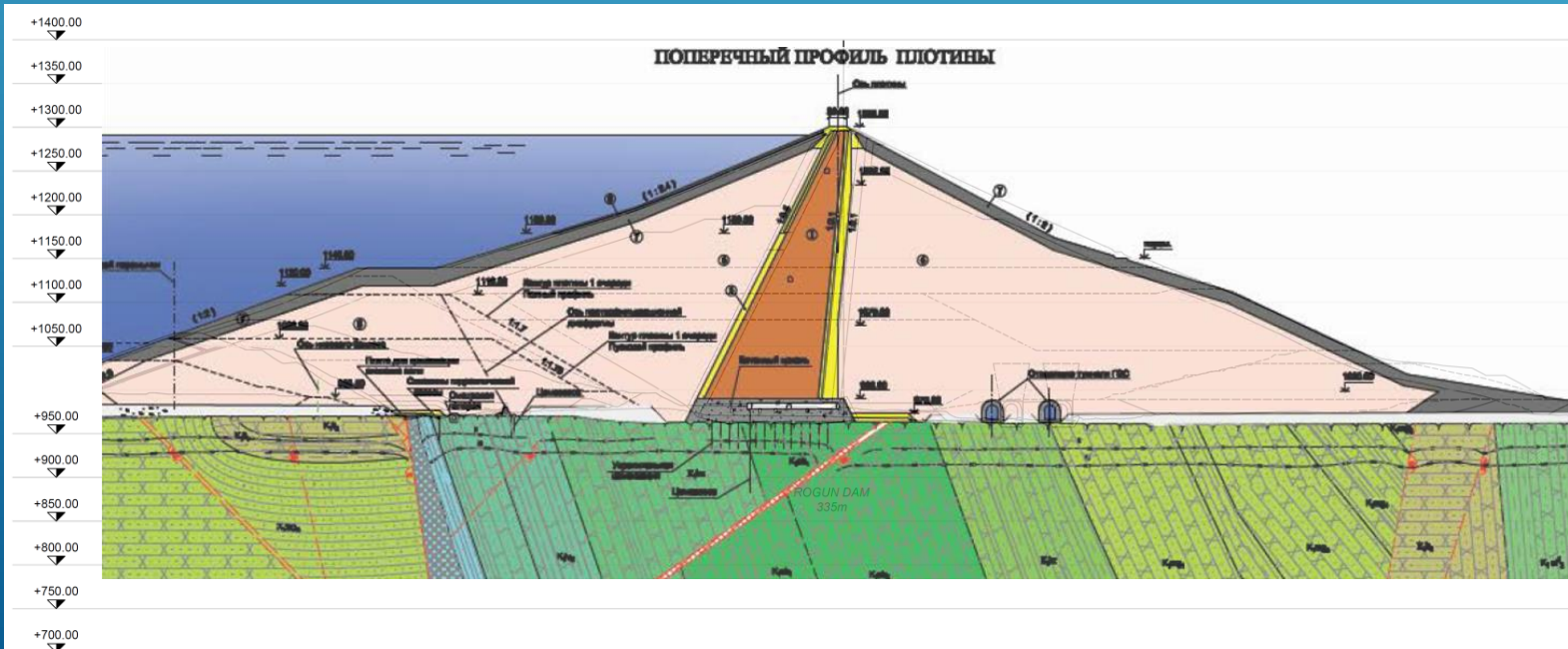
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

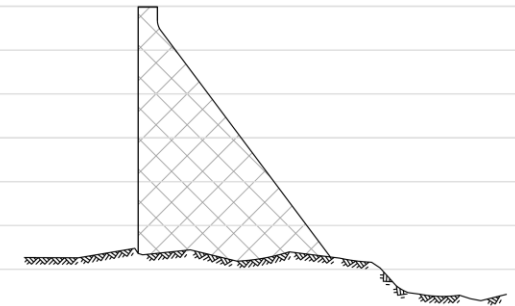
TAJIKISTAN ROGHUN HPP

Marinos-Palmieri – The highest dam of the world in a challenging geological environment - AEG 2015

- Visuale comparativa con:
- Torre Eiffel (325 m) e Grand Dixence Dam (285 m): diga a gravità più alta d'Europa
- Nurek Hpp (Tajikistan) attualmente la diga in materiale sciolta più alta al mondo (300m)
- Curiosità: è cinese, attualmente, la diga più alta al mondo (Jinping 1 – 305 m)



EIFFEL TOWER
325m



GRAND DIXENCE DAM
285m



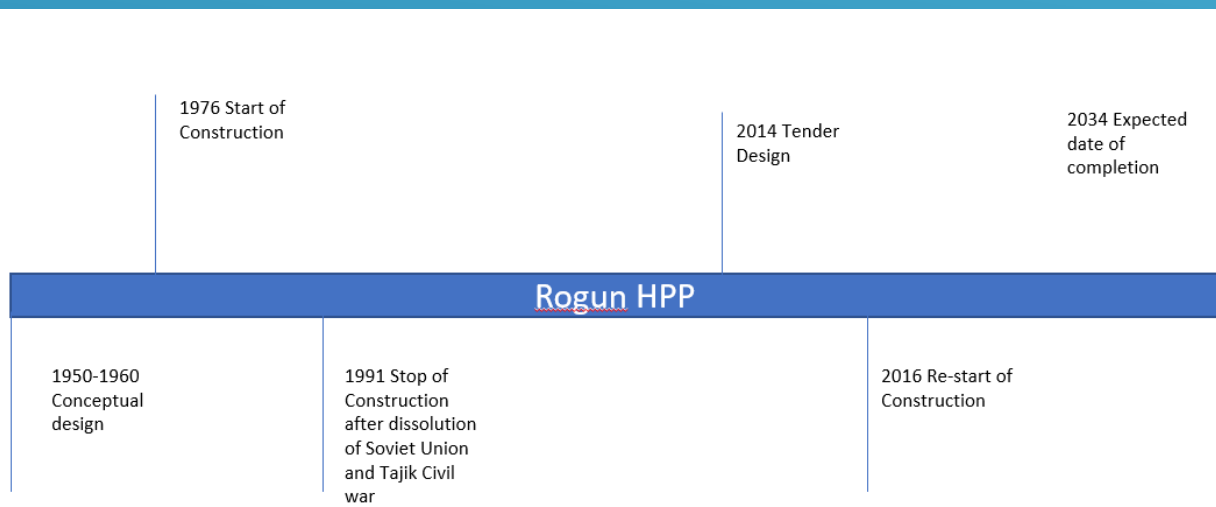
ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN HPP

Cronoprogramma



Webuild – Facebook Website



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN HPP

PROGETTAZIONE ED OPERE DA REALIZZARE:

- Verifica ed adeguamento progettuale di quanto già realizzato dai progettisti sovietici
- Costruzione del avandiga di monte
- Gallerie di deviazione DT1 e DT2 nella zona all'aperto
- Scavo dei versanti in corrispondenza del nucleo e zone limitrofe
- Opere connesse alla protezione della Salt wedge ed in generale, al consolidamento delle fondazioni
- Costruzione del corpo diga e del basamento, in RCC, del nucleo
- Implementazione del corposo sistema di monitoraggio



Webuildgroup.com



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN HPP

PROGETTAZIONE ED OPERE DA REALIZZARE:

- Costruzione delle gallerie di iniezione e dei relativi accessi
- Realizzazione delle cortine di iniezioni nelle spalle diga ed in fondazione, e della retrostante cortina di drenaggio
- Costruzione dei sistemi di scarico delle acque drenate dalle cortine e da quelle provenienti dal nucleo
- Chiusura idraulica delle gallerie di accesso (rete esistente di gallerie pari a circa 50 km).





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

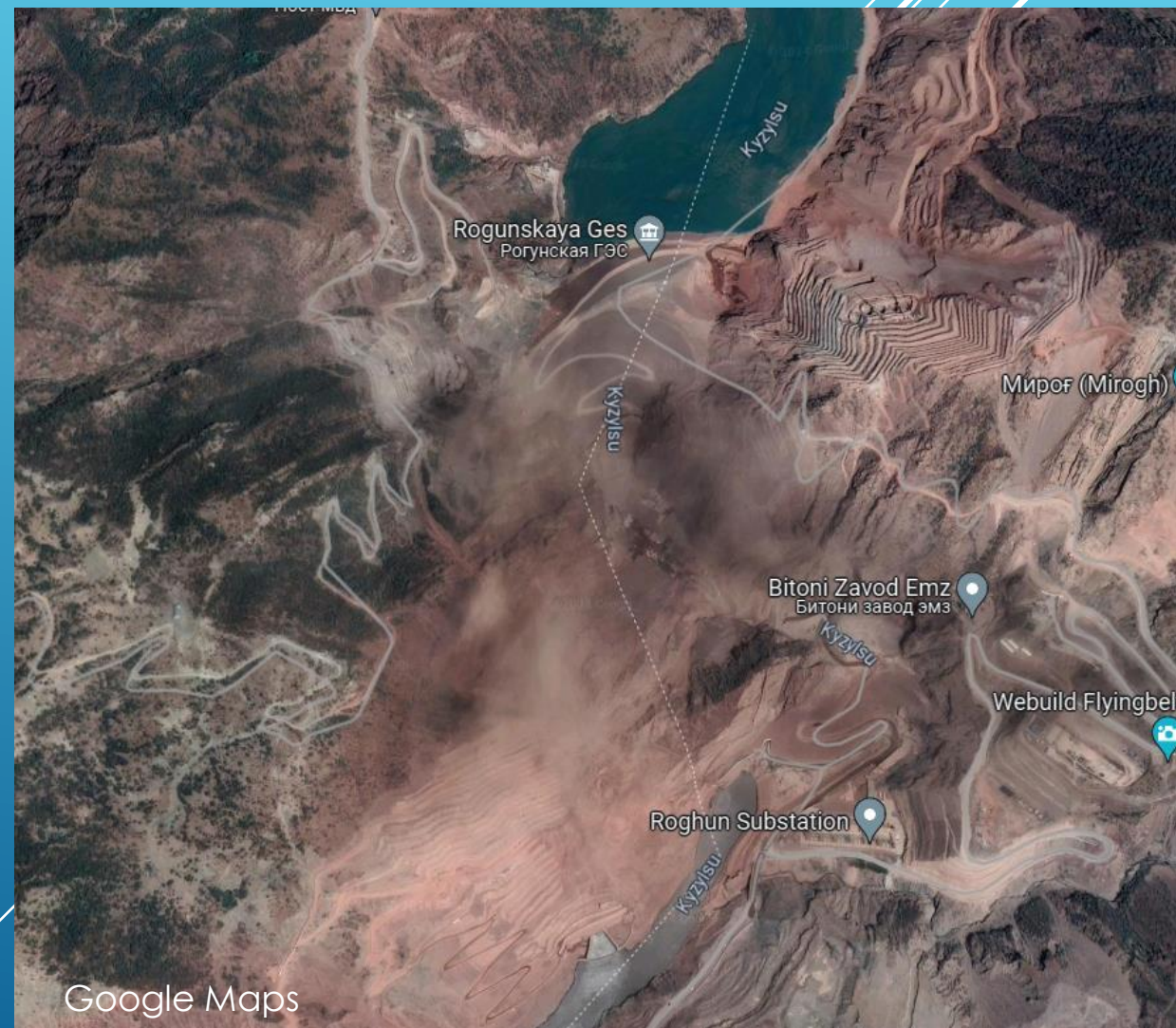
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN

ROGHUN HPP

Per la serie: gli ITALIANI SONO BRAVI !

- WEBUILD ha vinto nel 2016 l'EPC (Engineering, Procurement and Construction) per la costruzione del LOTTO2 della diga di Rogun (area corpo diga ed opere accessorie), per un importo opere di circa 1.95 MLD \$
- 2018 – Completamento avandiga di monte e avvio della prima turbina
- 2019/2021– Avvio della seconda turbina e raggiungimento del livello di invaso a quota 1'065 mslm (avandiga alla 1080 mslm)
- 2022 – completamento della fase 1 della costruzione diga (da quota 980 mslm a 1'140 mslm, liverllo di invaso a 1070 mslm)
- Agosto 2023 – Completamento della fondazione del nucleo in RCC (Pad)





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



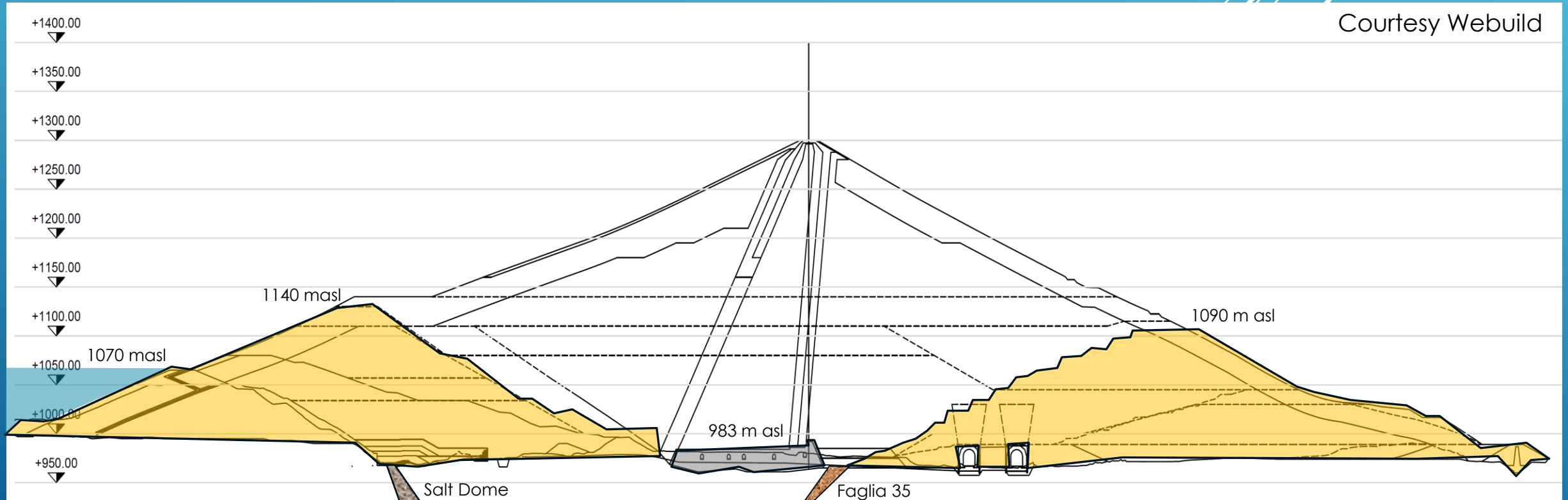
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN Hpp

STATO DI AVANZAMENTO A SETTEMBRE 2023

Courtesy Webuild





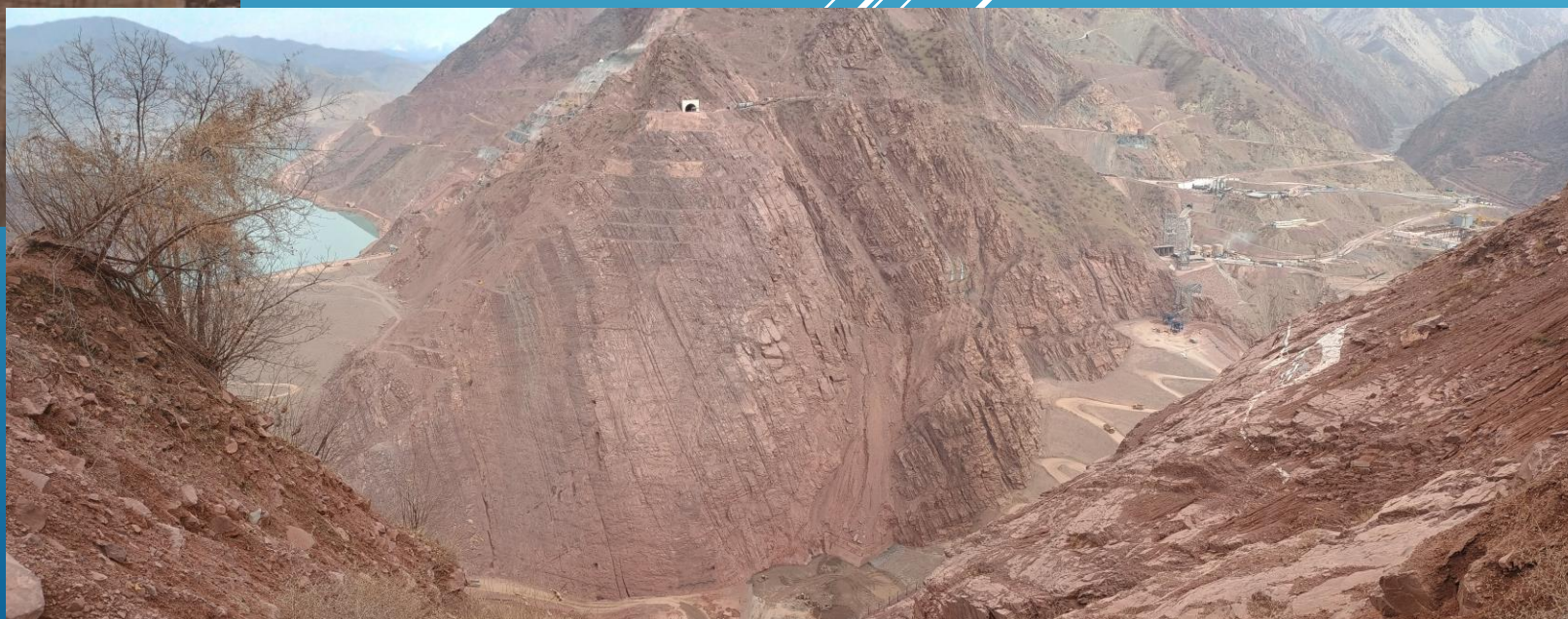
ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN HPP





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

TAJIKISTAN ROGHUN HPP

- COMPLESSITA' ADDIZIONALI:
- Area geologicamente molto complessa (alternanza di arenarie, siltiti, argilliti e rocce solubili: gesso e cloriti)
- Sismicità rilevante:
 - Rogun Design Earthquake Definition:
RDED a 2000 anni – $PGA = 0,69g$)
- Difficoltà di approvvigionamento materiali tecnologicamente evoluti
- Costruzione su una faglia attiva
- Presenza di una salt dome
- Dal 2020 la pandemia ha ulteriormente complicato la progressione dei lavori





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA

- Sbarra il fiume Zambesi, fiume che rappresenta anche il confine tra Zambia e Zimbabwe)
- Attualmente rappresenta il bacino antropico di maggiore estensione e volume invasato al mondo (270 km² e 185 km³, rispettivamente)
- Diga in calcestruzzo ad Arco a doppia curvatura
- Altezza 128m, sviluppo in cresta 620 m (al limite per la realizzazione di dighe ad arco)
- Costruzione iniziata nel 1955 e terminata nel 1959, da quattro imprese italiane: Impresit, Girola, Lodigiani, and Torno
- Dotata di due centrali, una per stato, per una potenza complessiva di 2010 MW (960 MW Zimbabwe, 1050 MW Zambia)





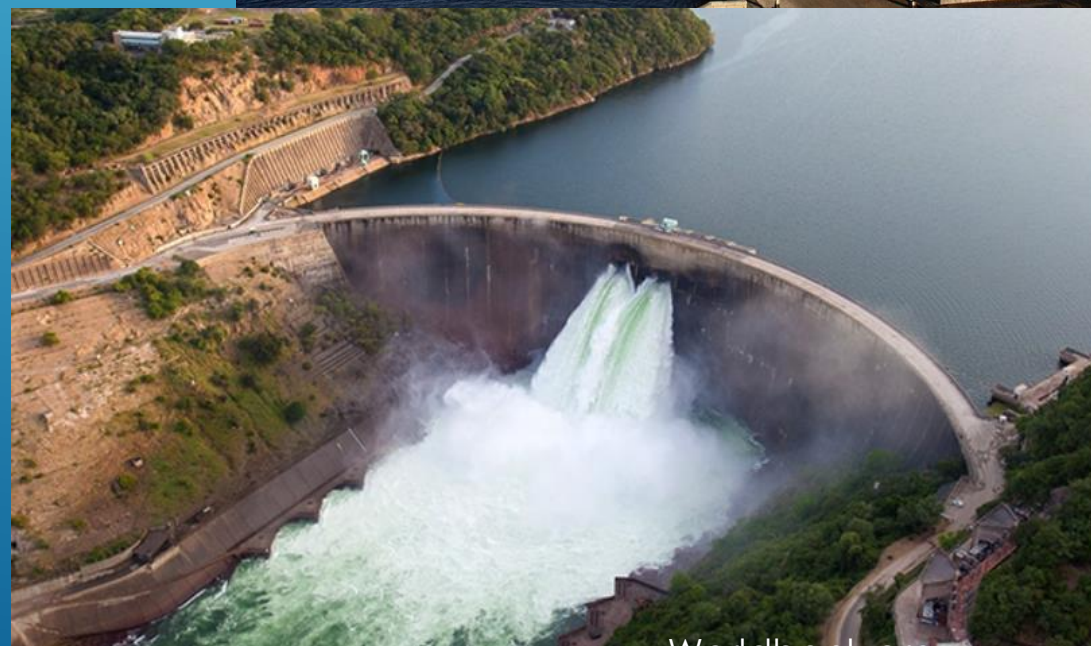
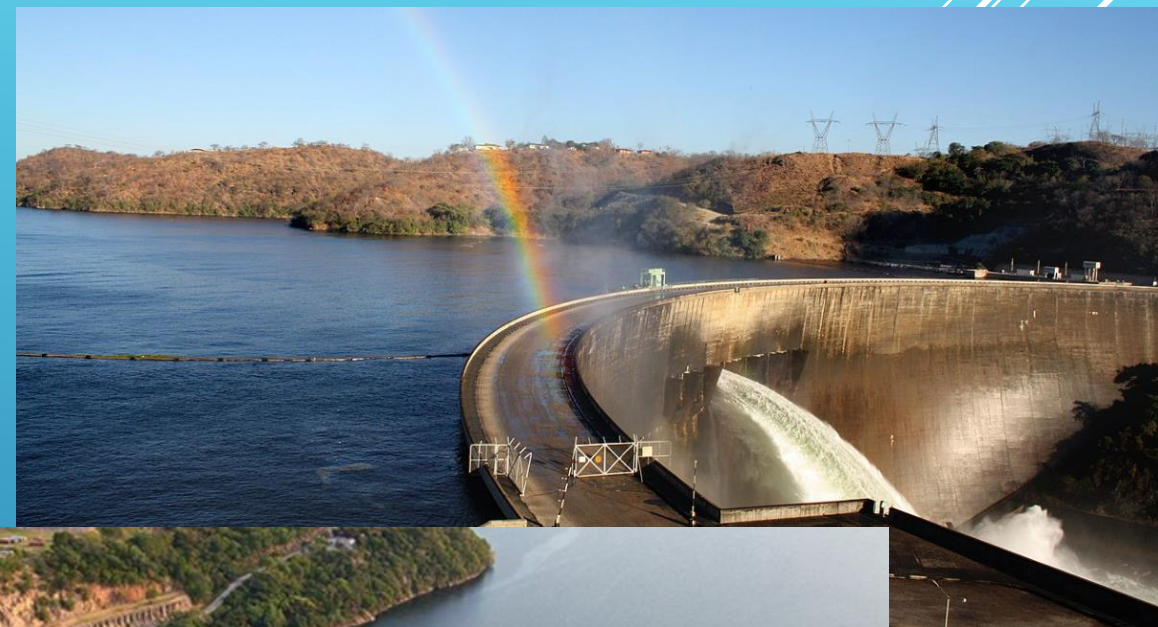
ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA

- Scarichi di superficie formati da 6 paratoie nel corpo diga
- Subito dopo l'inizio dell'operatività, intensi fenomeni di erosione sono stati segnalati nel bacino di dissipazione
- I fenomeni più accentuati di erosione si sono avuti in corrispondenza delle massime piene e apertura contemporanea di tutti le paratoie
- I calcoli teorici del tempo non erano in grado di fornire la previsione dell'erosione
- Alla fine del 1981 l'erosione aveva raggiunto gli 85 m di profondità, con effetti retrogressivi verso il piede diga
- Inoltre, fenomeni di reazione Alkali Aggregati si sono verificati al contorno delle paratoie, producendo rilevanti fenomeni di filtrazione



Worldbank.org



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA

Nel 2017 sono cominciati i lavori di riabilitazione della diga, consistenti nella sostituzione delle sei paratoie e nell'allargamento della bacino di dissipazione per una valore complessivo di 295 M\$, finanziati da:

- Unione Europea
- World Bank
- African Development Bank
- Governo Svedese
- Zambesi River Authority

Worldbank.org





ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



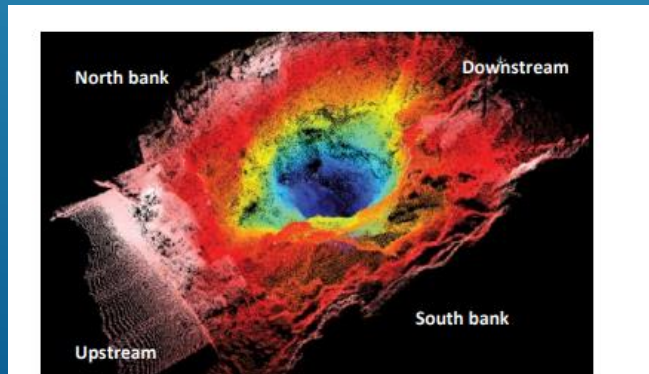
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA

Erosione del Bacino di dissipazione:

- Le formulazioni teoriche non erano in grado di predire l'erosione manifestatasi effettivamente
- A partire dal 1981 gli eventi di piena sono stati governati evitando l'apertura di più di tre paratoie per volta
- Ciò ha fornito una sostanziale stabilità del fondo del bacino di dissipazione, valutato nel 2011 attraverso rilievo batimetrico



Christine Noret, Jean-Christophe Girard,
M.C. Munodawafa & D.Z. Mazvidza (2013)
Kariba dam on Zambezi river: stabilizing the
natural plunge pool, La Houille Blanche

Table 1: Estimation of maximum scour hole depth.

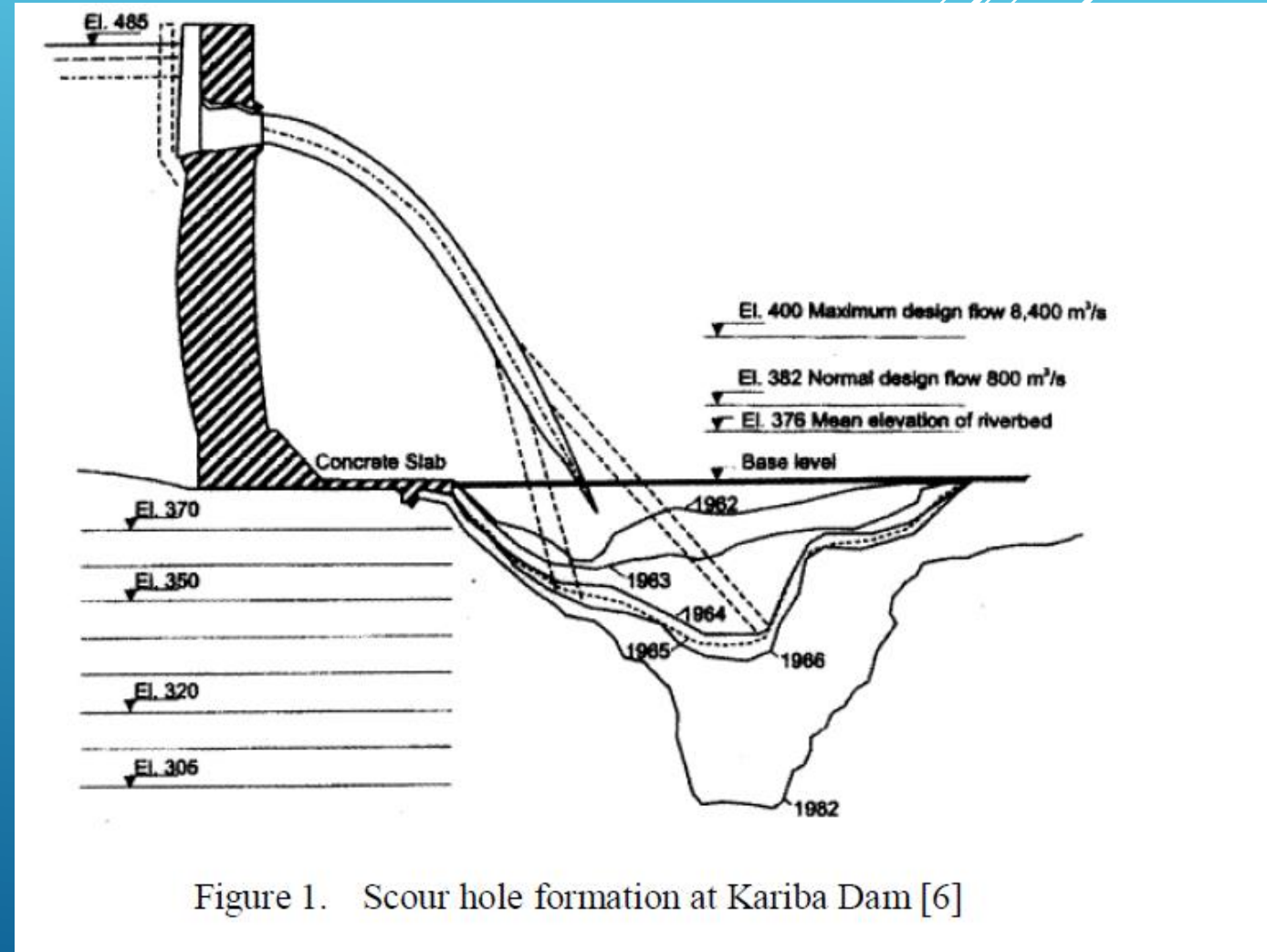
| Name | Formula | Comments | Appl. To Kariba |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Mason (1985) | $D = \frac{K q^x H^y h^{0.15}}{g^{0.15} d^{0.10}} \quad (1)$ | $K = 6.42 - 3.10H^{0.10}$; $x = 0.60 - \frac{H}{300}$; $y = 0.15 - \frac{H}{200}$; Validated with 26 sets of scour data from prototypes and 47 from models [Mason; 1985] | 401 m asl |
| Damle (1966) | $D = 0.362q^{0.50} H^{0.50} \quad (2)$ | Mostly suited for prototype [Mason, 1985] | 359 m asl |
| Martins (1975) | $D = 1.5q^{0.60} H^{0.10} \quad (3)$ | Mostly suited for prototype [Mason, 1985] | 351 m asl |
| Chee and Kung (1974) | $D = 1.663q^{0.60} H^{0.20} \quad (4)$ | Mostly suited for prototype [Mason, 1985] | 336 m asl |
| SOFRELEC (1980) | $D = 2.3q^{0.60} H^{0.10} \quad (5)$ | Mostly suited for prototype [Mason, 1985] | 323 m asl |
| Veronese (1937) | $D = 1.9q^{0.54} H^{0.225} \quad (6)$ | | 318 m asl |
| Mason (1985) | $D = \frac{3.27q^{0.60} H^{0.05} h^{0.15}}{g^{0.30} d_m^{0.10}} \quad (7)$ | Upper bound for prototype [Mason, 1985] | 313 m asl |

KARIBA DAM - ZAMBIA

M.F. Georg – G.W. Annandale
Kariba Dam Plunge Pool Scour

Erosione del bacino di dissipazione (qualche dato):

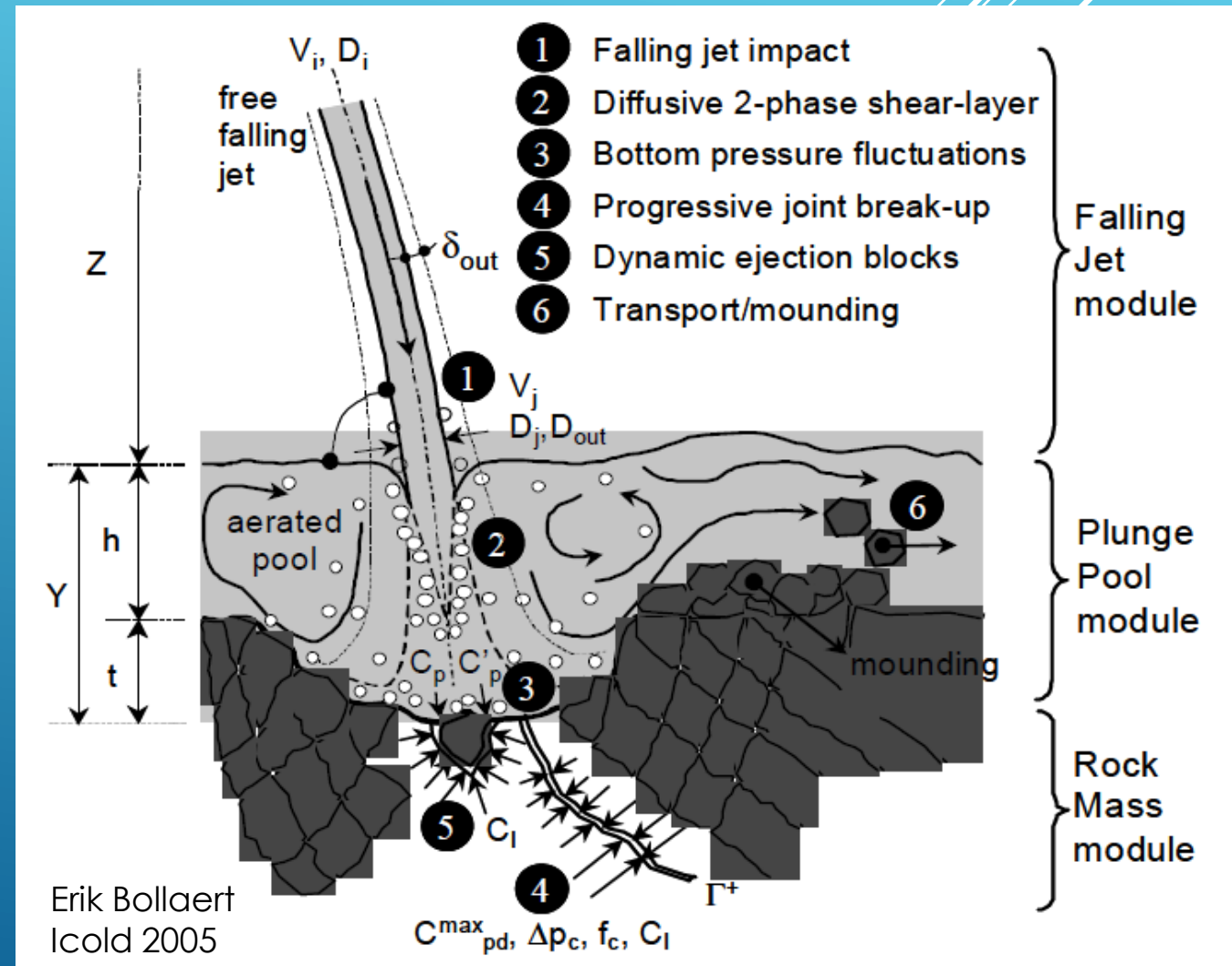
- Roccia costituita da gneiss biotitico e filoni di pegmatiti UCS medio di 120 Mpa
- GSI intorno a 70
- Faglia in direzione SW-NE (in direzione monte valle)
- Un modello «ibrido» è stato sviluppato per:
 - Descrivere correttamente il fenomeno di erosione nel bacino e valutarne l'evoluzione nel tempo
 - Definire la forma e l'allargamento del bacino, ampliamento necessario a stabilizzare i fenomeni di erosione



KARIBA DAM - ZAMBIA

Erosione del bacino di dissipazione (qualche dato):

- Il modello è composto da due submoduli:
- Un Modello numerico, denominato CSM «Comprehensive Scour Model», in grado di incorporare tutti i maggiori fenomeni fisici atti a descrivere l'erosione del bacino
- Impulso dinamico, rottura fragile e rottura per fatica sono i tre elementi di collasso strutturale e conseguente erosione della roccia
- Un modello in scala ridotta, implementato all' EPFL, per determinare la distribuzione delle pressioni lungo le pareti ed al fondo, utilizzate come dati di input nel CSM





KARIBA DAM - ZAMBIA

Erosione del bacino di dissipazione (qualche dato):

- Una volta calibrato, è stato, in primo luogo simulato il fenomeno di erosione, che ha fornito, come si diceva, risultati soddisfacenti e poi determinato l'allargamento necessario a garantire la stabilità del bacino

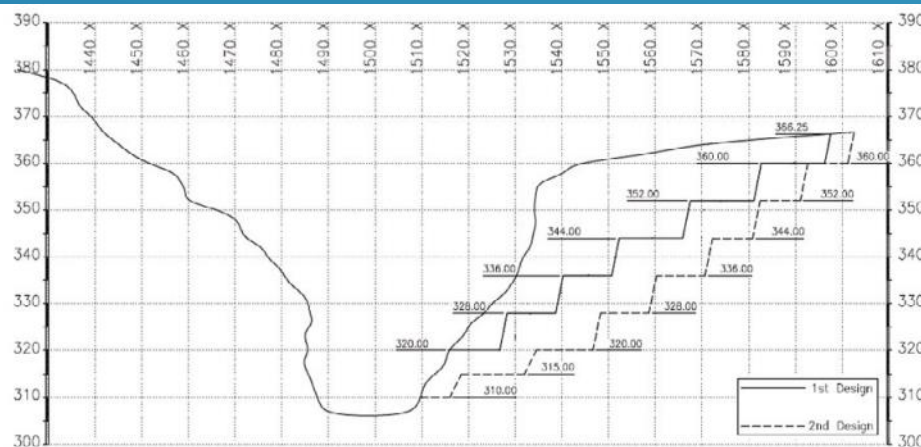
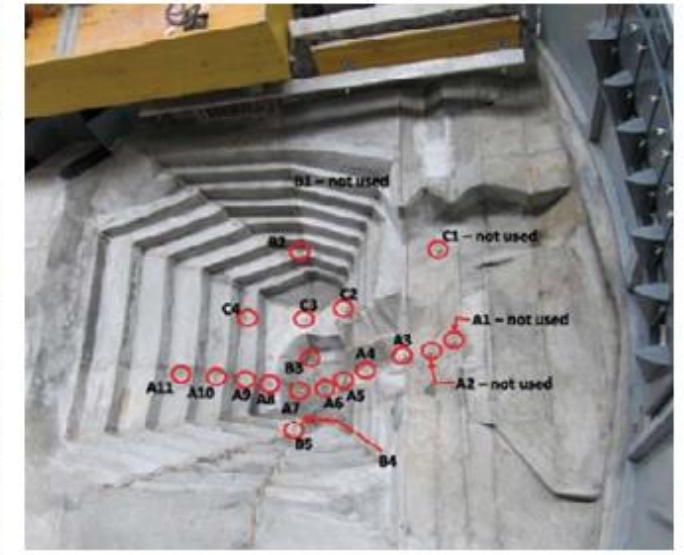


Figure 8: Difference between the 1st and the 2nd reshaped geometries along the dam axis.

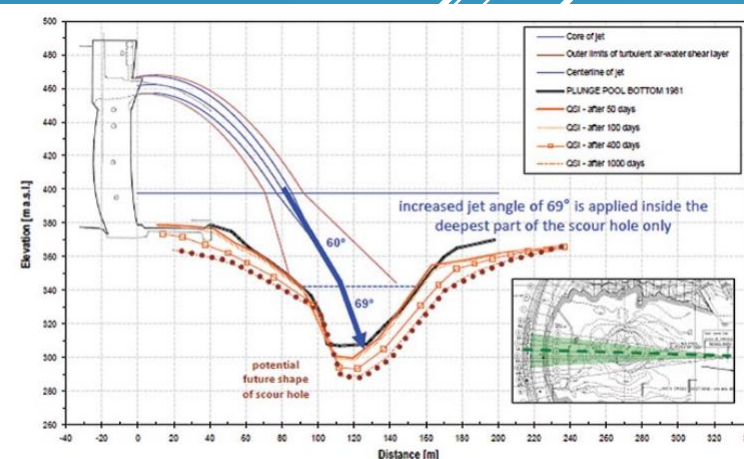


Figure 6: Potential future scour hole evolution along the dam axis (courtesy Aquavision Engineering).

Christine Noret, Jean-Christophe Girard, M.C. Munodawafa & D.Z. Mazvidza (2013) Kariba dam on Zambezi river: stabilizing the natural plunge pool, La Houille Blanche



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA

- I risultati finali sono stati impiegati per definire il progetto di allargamento del bacino e le relative opere di sostegno, oltre che della protezione della faglia collocata sotto la diga.
- L'allargamento ha la forma di un anfiteatro
- Lo scavo è stato evitato nella zona più prossima al piede diga
- È prevista la copertura con una struttura in c.a. della faglia

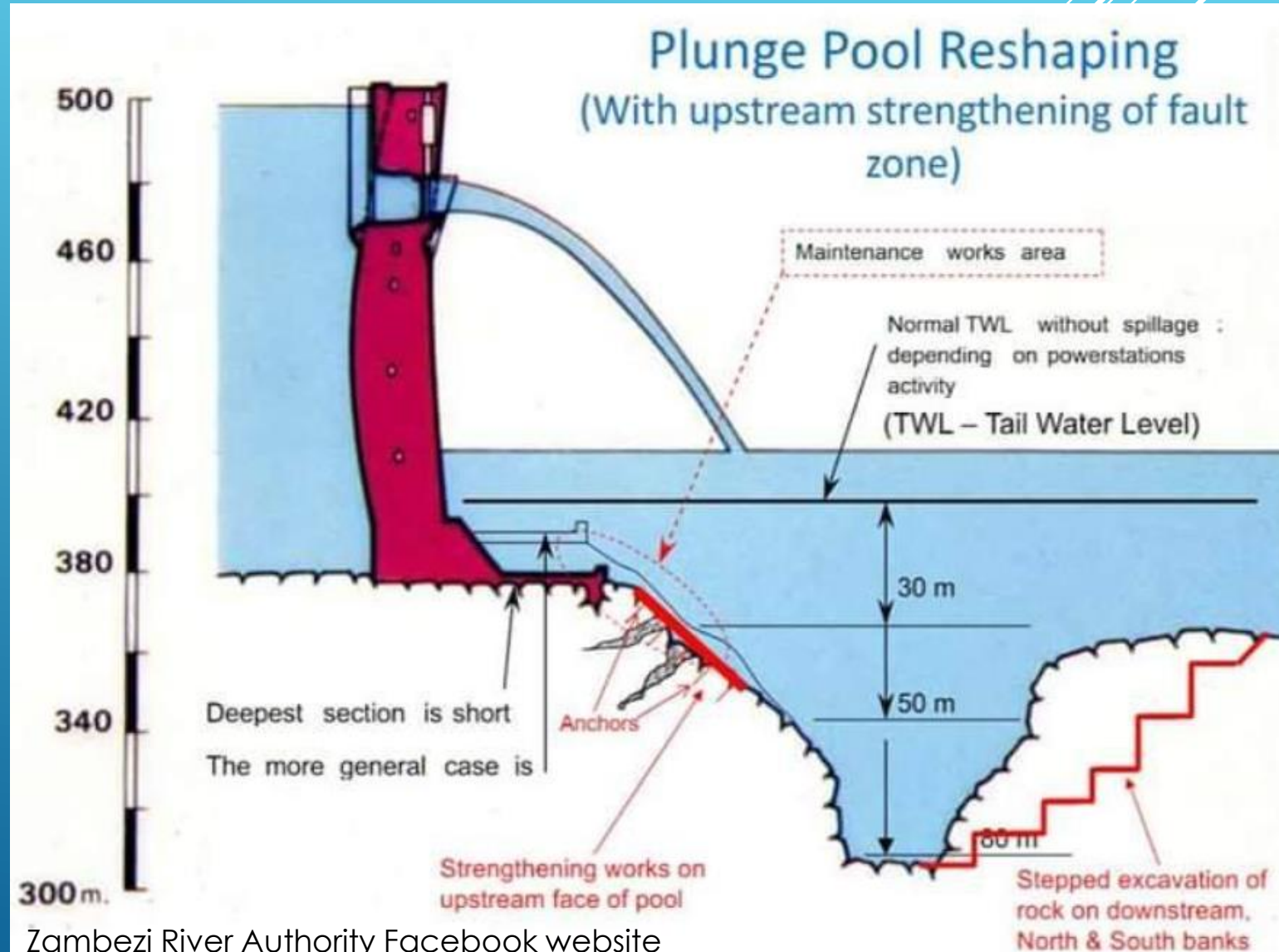




KARIBA DAM - ZAMBIA

COMPLICAZIONI:

- L'allargamento del bacino non è stato esente da problemi: si è reso necessario costruire un'avandiga a valle per «svuotare» il bacino e procedere allo scavo dello stesso.
- I parametri geomeccanici d'ammasso sono stati assunti e rideterminati durante le fasi di svuotamento del bacino





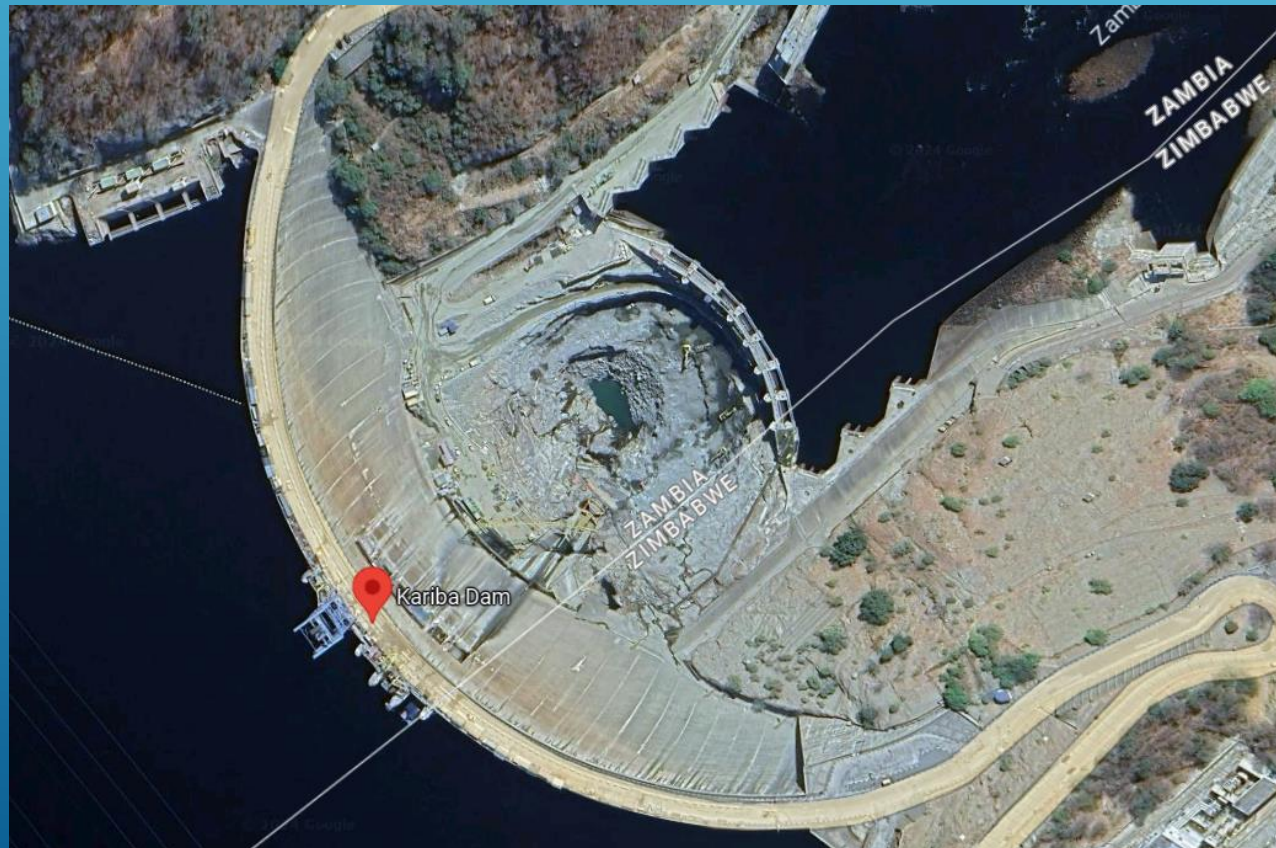
ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

KARIBA DAM - ZAMBIA



Google Maps



Zambezi River Authority Facebook website



ITCOLD -Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA

Zambezi River Authority Facebook website

KDRP Aerial View

A Closer look @ February and August 2023



Grazie per l'attenzione

