

Υδροηλεκτρικά έργα

Στερεομεταφορά



Νίκος Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα 2016

Στερεομεταφορά

Εισαγωγή

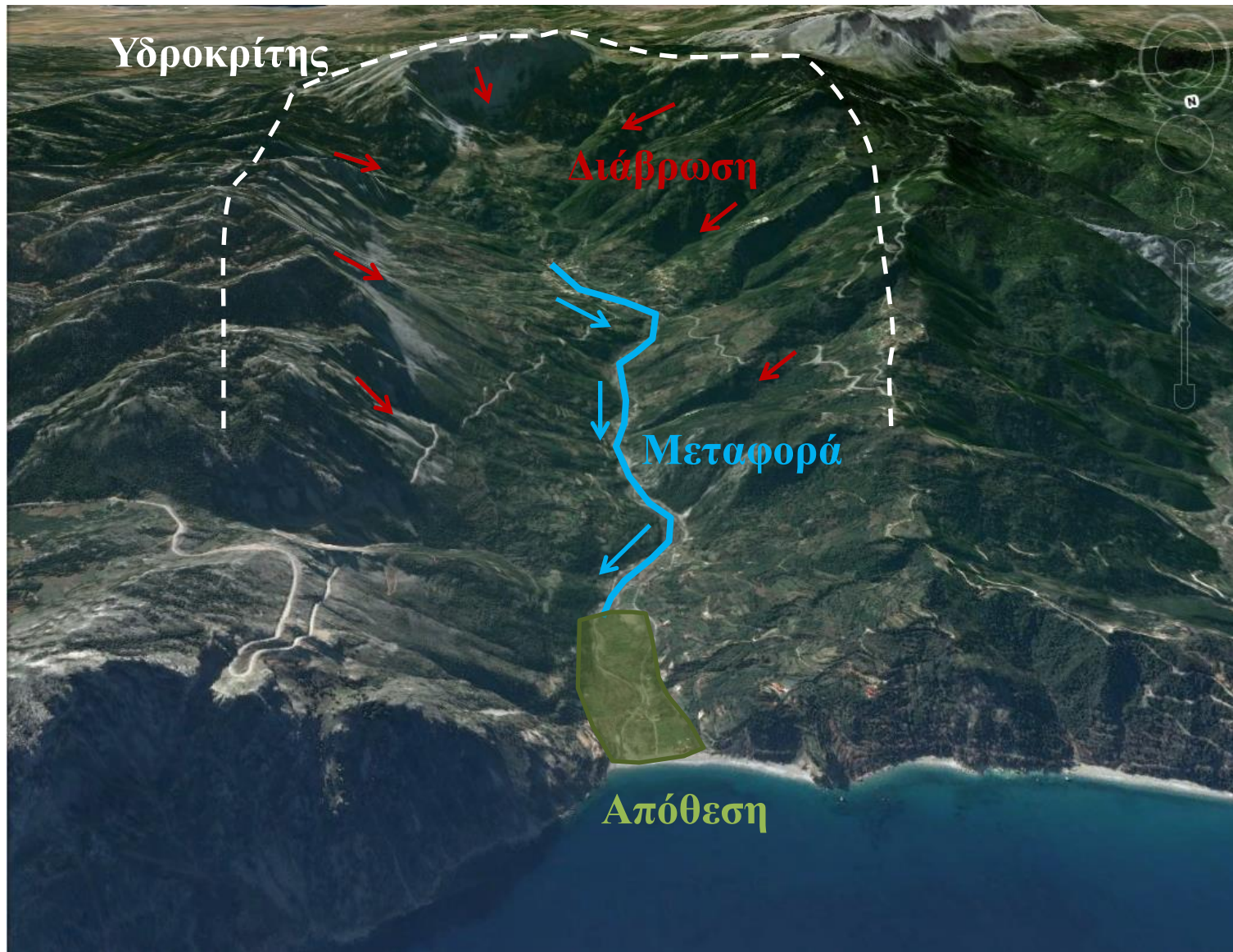
Μεθοδολογίες εκτίμησης στερεομεταφοράς

Παγκόσμια αναθεωρημένη Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE)

Εμπειρικές μέθοδοι

Διαχείριση φερτών

Εισαγωγή



Εισαγωγή

Εδαφική διάβρωση ή εδαφική απώλεια (Soil Erosion or Soil Loss) είναι η ποσότητα του εδαφικού ή βραχώδους υλικού που αποκολλάται κάτω από την επίδραση της βροχής και της επιφανειακής απορροής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως είναι ανηγμένη ως προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής και τελικά εκτιμάται σε $t\ ha^{-1}\ year^{-1}$ ή $t\ km^{-2}\ year^{-1}$. Εξαρτάται από παράγοντες όπως:

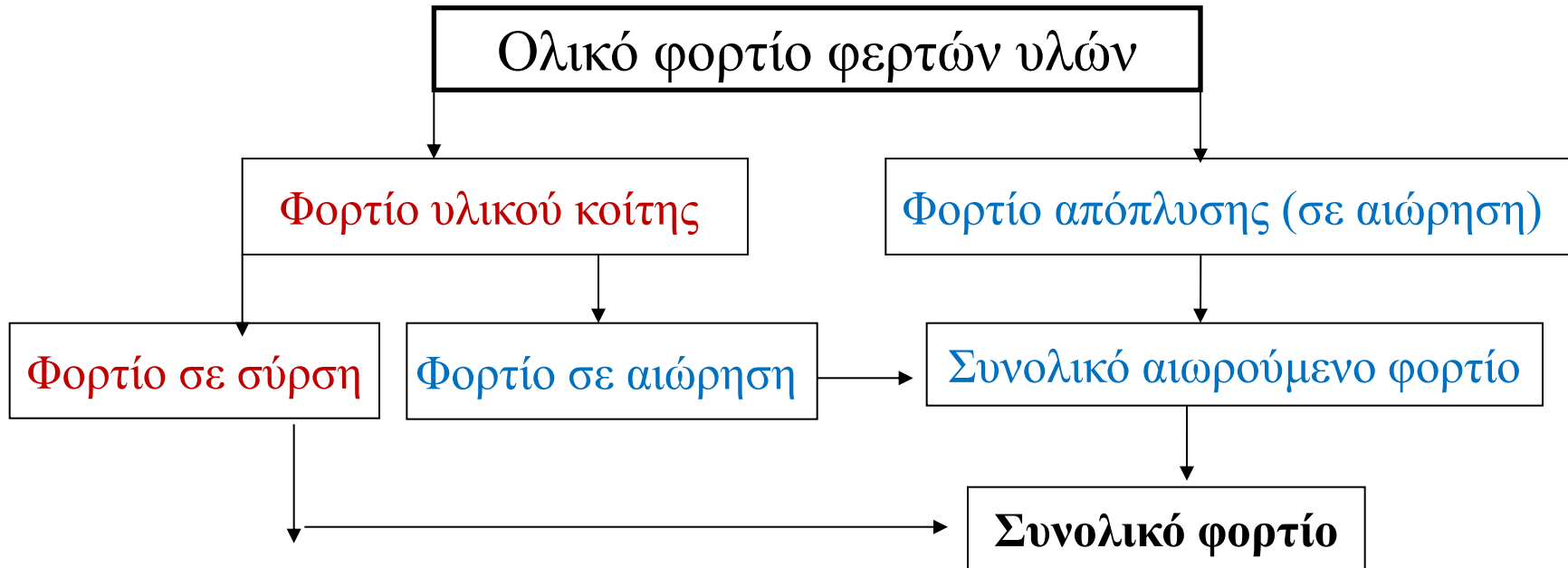
- η γεωλογία
- η εδαφολογία
- η φυτοκάλυψη
- το υδρολογικό καθεστώς
- η γεωμορφολογία
- το κλίμα
- οι ανθρώπινες παρεμβάσεις

Η διάβρωση που οφείλεται στην επίδραση της επιφανειακής απορροής διακρίνεται ανάλογα με τη χωρική της κατανομή σε:

- Επιφανειακή (Sheet Erosion): χωρικά και χρονικά ομοιόμορφη αποκόλληση εδαφικών υλικών
- Αυλακωτή (Rill Erosion): η δημιουργία μικρών (βάθους μέχρι 1 m) αυλακιών στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης
- Χαραδρωτική (Gully Erosion): η δημιουργία μεγάλων χαραδρών (βάθους >1 m) κατά τη βασική διεύθυνση υδατικής ροής.

Εισαγωγή

Στερεομεταφορά



Η διάκριση των φερτών υλικών μπορεί να γίνει ως προς δύο παράγοντες

Προέλευση

Τρόπος μεταφοράς

- Φορτίο κοίτης (bed material load) το οποίο μπορεί να είναι είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση, είναι φερτά υλικά τα οποία ήδη βρίσκονται στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου και αποτελεί τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους
- Φορτίο απόπλυσης (wash load) που παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων και προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής

- Φορτίο σε αιώρηση (suspended load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα,
- Φορτίο σε σύρση (bed load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη.

Εισαγωγή

Στερεομεταφορά-Ορισμοί

Στερεοαπορροή (*sediment yield*). Η ποσότητα των φερτών υλών που διέρχονται από μία διατομή ποταμού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως είναι ανηγμένη ως προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής και τελικά εκτιμάται σε t/ha/y ή t/km²/y.

Στερεοπαροχή (*sediment discharge*). Ο ρυθμός μεταφοράς των φερτών που υλών που διέρχονται από μία διατομή ποταμού και εκτιμάται σε kg/s

Συντελεστής στερεοαπορροής (*sediment delivery ratio*). Ο λόγος των φερτών υλών που μεταφέρθηκαν μέσω της επιφανειακής απορροής μέχρι την διατομή του ποταμού προς αυτές που αποκολλήθηκαν από το έδαφος (στερεοαπορροή προς εδαφική απώλεια).

Συνολικός όγκος αποθέσεων σε ταμιευτήρα. Ο όγκος που καταλαμβάνουν οι φερτές ύλες μετά από συγκεκριμένη περίοδο λειτουργίας του έργου (π.χ. 50 έτη)

Επίδραση φερτών υλών στα έργα μηχανικού

- Πρόσχωση ταμιευτήρων και έργων υδροληψίας
- Μεταβολή της κοίτης των ποταμών (εκσκαφή, απόθεση, διάβρωση οχθών)
- Αύξηση πλημμυρικού κινδύνου σε συμβολές παραποτάμων και δέλτα
- Περιβαλλοντική υποβάθμιση από ρυπαντές που μεταφέρονται στα φερτά υλικά

Μεθοδολογίες εκτίμησης στερεομεταφοράς

Μετρήσεις

στερεοπαροχής (παγίδες, μέτρηση αιωρούμενων και θολότητας)
όγκου φερτών υλικών που έχουν αποτεθεί σε ταμιευτήρες (τα φράγματα ως σταθμοί μέτρησης)

Εμπειρικές-επαγωγικές μέθοδοι

Καμπύλες παροχής-στερεοπαροχής στη συγκεκριμένη θέση
Σχέσεις που συνδέουν την εδαφική διάβρωση και στερεοαπορροή με υδρολογικά, γεωλογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής

Κατανεμημένα εννοιολογικά μοντέλα

Προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες της απορροής, διάβρωσης και στερεοαπορροής λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των φυσικών διεργασιών στη λεκάνη (LISEM, WEPP, SHETRAN, SWAT)

Μεθοδολογίες εκτίμησης στερεομεταφοράς

Διαστασιολόγηση νεκρού όγκου ταμιευτήρα

Μετρήσεις

Εμπειρικές μέθοδοι

Εννοιολογικά μοντέλα

**Εδαφική διάβρωση
σε λεκάνη**

*Εκτίμηση συντελεστή
στερεοαπορροής*



**Στερεοαπορροή σε
διατομή ποταμού**

Καμπύλες παροχής-
στερεοπαροχής

Εμπειρικές μέθοδοι

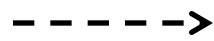
Εννοιολογικά μοντέλα

*Εκτίμηση πυκνότητας
φερτών υλών*



**Όγκος αποθέσεων
σε ταμιευτήρα**

Μέτρηση



Μεθοδολογίες εκτίμησης στερεομεταφοράς

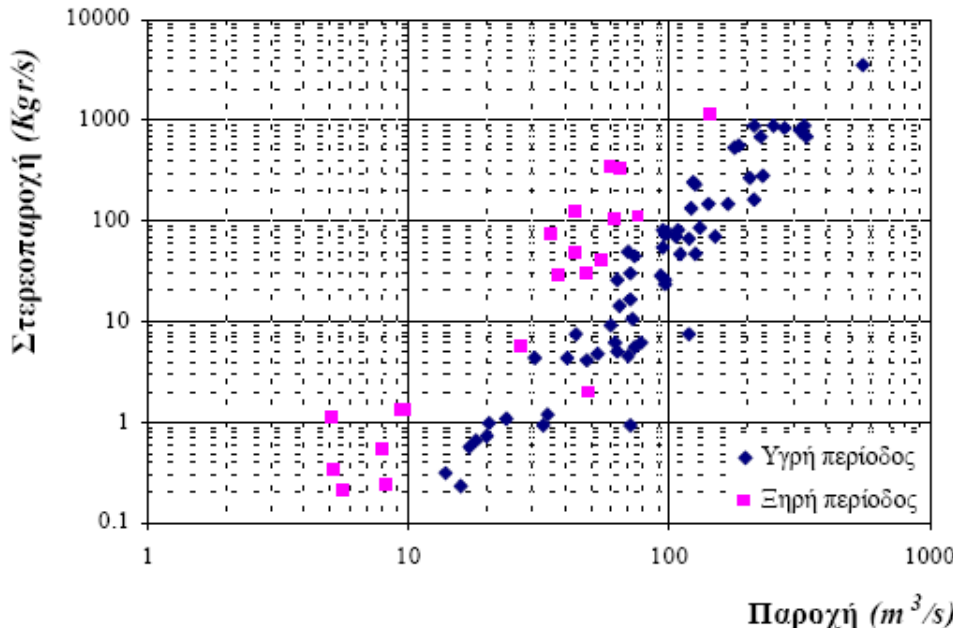
Καμπύλες Παροχής-Στερεοπαροχής

Οι τιμές της παροχής (Q) ενός υδατορεύματος έχουν συνήθως αρκετά καλή συσχέτιση με της τιμές της στερεοπαροχής (Q_s) σε μία διατομή υδατορεύματος. Έτσι για την εκτίμηση της στερεοπαροχής καταρτίζονται καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής

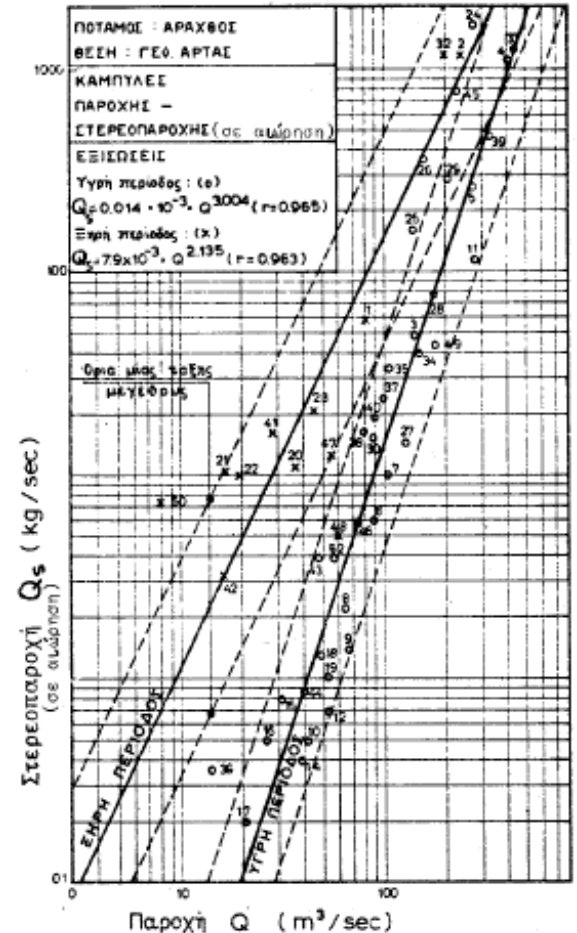
Οι καμπύλες $Q-Q_s$ καταρτίζονται με ταυτόχρονες μετρήσεις των δύο μεγεθών και συνήθως έχουν τη μορφή $Q_s = aQ^b$, όπου a , b σταθερές.

Τα σημεία συνήθως παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά η οποία μειώνεται με την κατάρτιση εποχιακών καμπυλών $Q-Q_s$ (για υγρή και ξηρή περίοδο), εφόσον διατίθεται επαρκής αριθμός δεδομένων για κάθε εποχή

Καμπύλες παροχής-στερεοπαροχής (σε αιώρηση)



Πηγή: Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Τελική Έκθεση, Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, 2001



Πηγή: Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Τάρλα, 1987, Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα, Τεχνικά Χρονικά, 7 (3).

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Μέγιστες παρατηρημένες τιμές αιωρούμενου φορτίου στον κόσμο (t/km²/y)

Χώρα	Ποταμός	Λεκάνη απορροής km ²	Μέση ετήσια στερεοαπορροή t km ⁻² year ⁻¹	Πηγή
Κίνα	Huangfuchuan	3199	53500	Yellow River Conservancy Commission
	Dali	187	21700	Mou and Meng, 1980
Taiwan	Erjenhsi	350	28911	Hwang, 1980
	Tsengwen	1000	28000	Milliman and Meade, 1983
Kenya	Perkerra	1310	19520	Dune, 1975
Ιάβα	Cilutung	600	12000	Hardjowitjistro, 1981
	Cikeruh	250	11200	
Νέα Γουϊνέα	Aure	4360	11126	Picup et al., 1981
Νέα Ζηλανδία Βόρειο νησί	Waiapu	1378	19970	Griffiths, 1982
	Waingaromia	175	17340	
	Hikuwai	307	13890	
Νέα Ζηλανδία Νότιο νησί	Hokitika	352	17070	
	Cleddau	155	13300	
	Haast	1020	12736	

Πηγή: Walling D. E and B. W. Webb, Erosion and sediment yield: a global overview, Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS Publ.no. 236, 1996)

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Εκτιμήσεις αιωρούμενου φορτίου στον κόσμο ($t\ km^{-2}\ year^{-1}$)

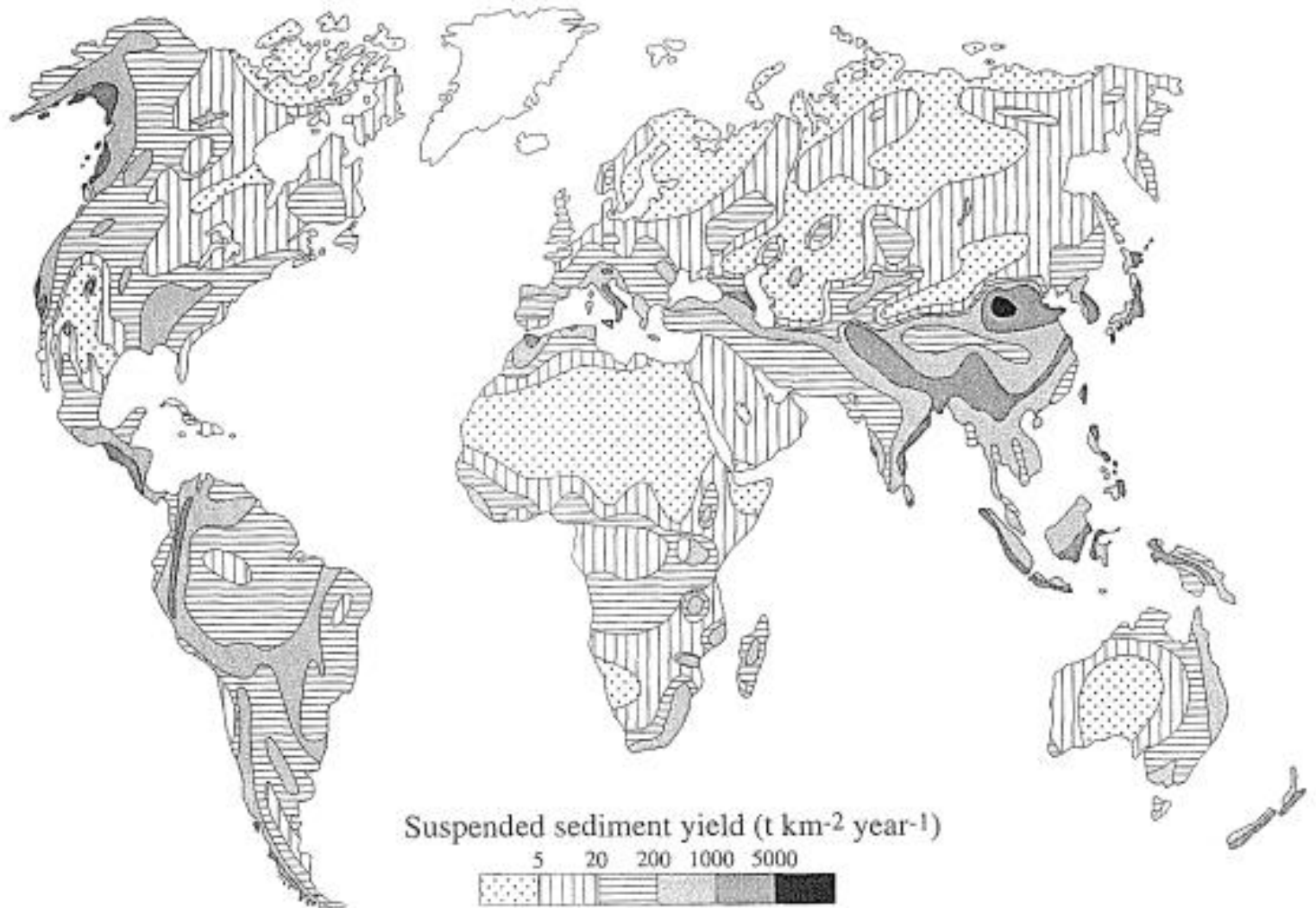


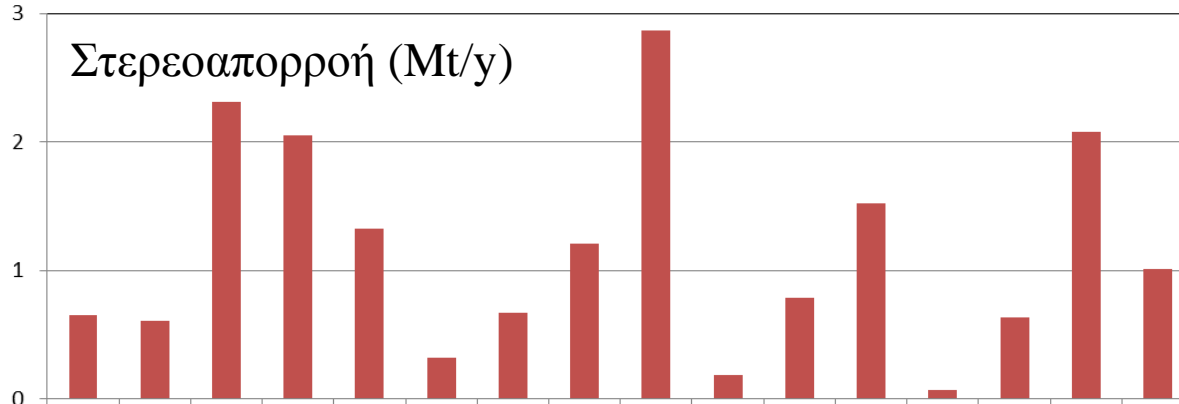
Fig. 2 The global pattern of suspended sediment yield according to Lvovich *et al.* (1991).

Πηγή: Walling D. E and B. W. Webb, Erosion and sediment yield: a global overview, Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS Publ.no. 236, 1996)

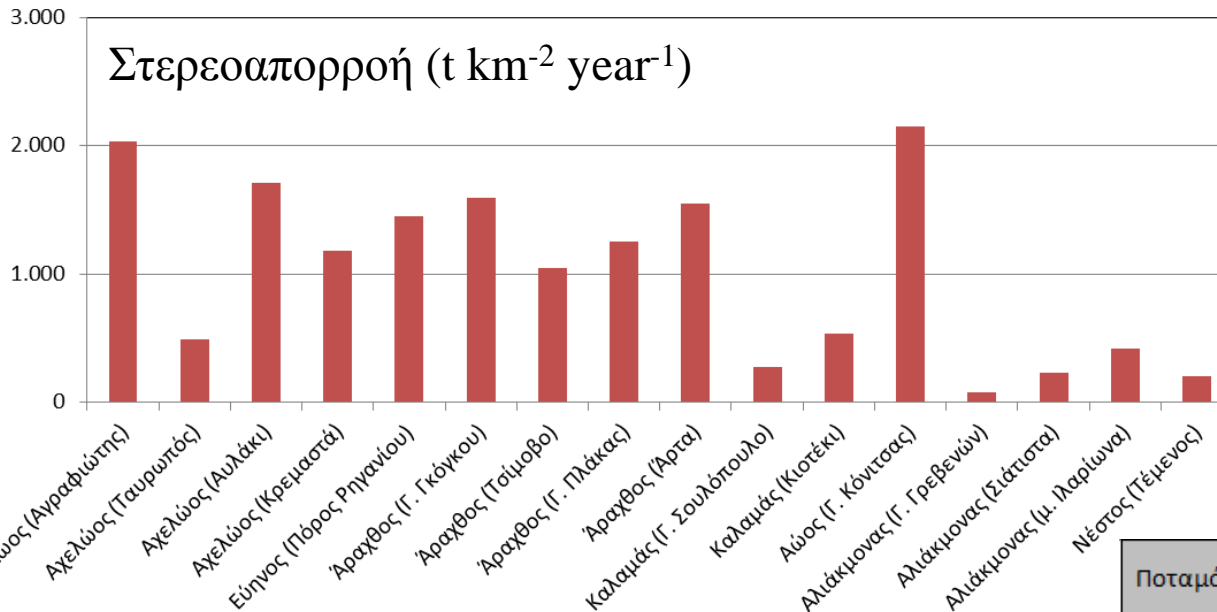
Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Ελλάδα

Στερεοαπορροή (Mt/y)

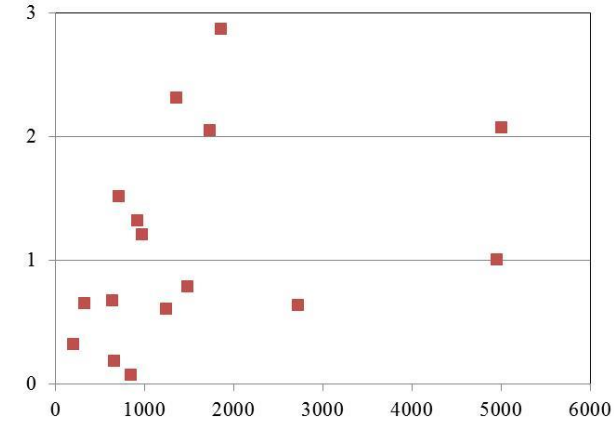


Στερεοαπορροή (t km⁻² year⁻¹)



Πηγή: Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Τάρλα, 1987, Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα, Τεχνικά Χρονικά, 7 (3).

Στερεοαπορροή (t km⁻² year⁻¹)



Έκταση λεκάνης απορροής (km²)

Πηγή: Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Τελική Έκθεση, Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, 2001

Ποταμός	Θέση	A(km ²)	Περίοδος μετρήσεων	Sy(t/km ²)
Άραχθος	γ.Τσίμοβου	640	1965-78	891
Άραχθος	γ.Γκόγκου	203	1966-72	1.176
Άραχθος	γ.Πλάκας	970	1965-76	1.570
Άραχθος	Άρτα	1.855	1965-76	1.546
Καλαμάς	γ.Σουλόπουλο	660	1969-78	203
Καλαμάς	Κιοτέκι	1.481	1966-78	386
Αλιάκμονας	Σιάτιστα	2.724	1965-79	84

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Μετρήσεις στερεοαπορροής σε ελληνικούς ταμιευτήρες

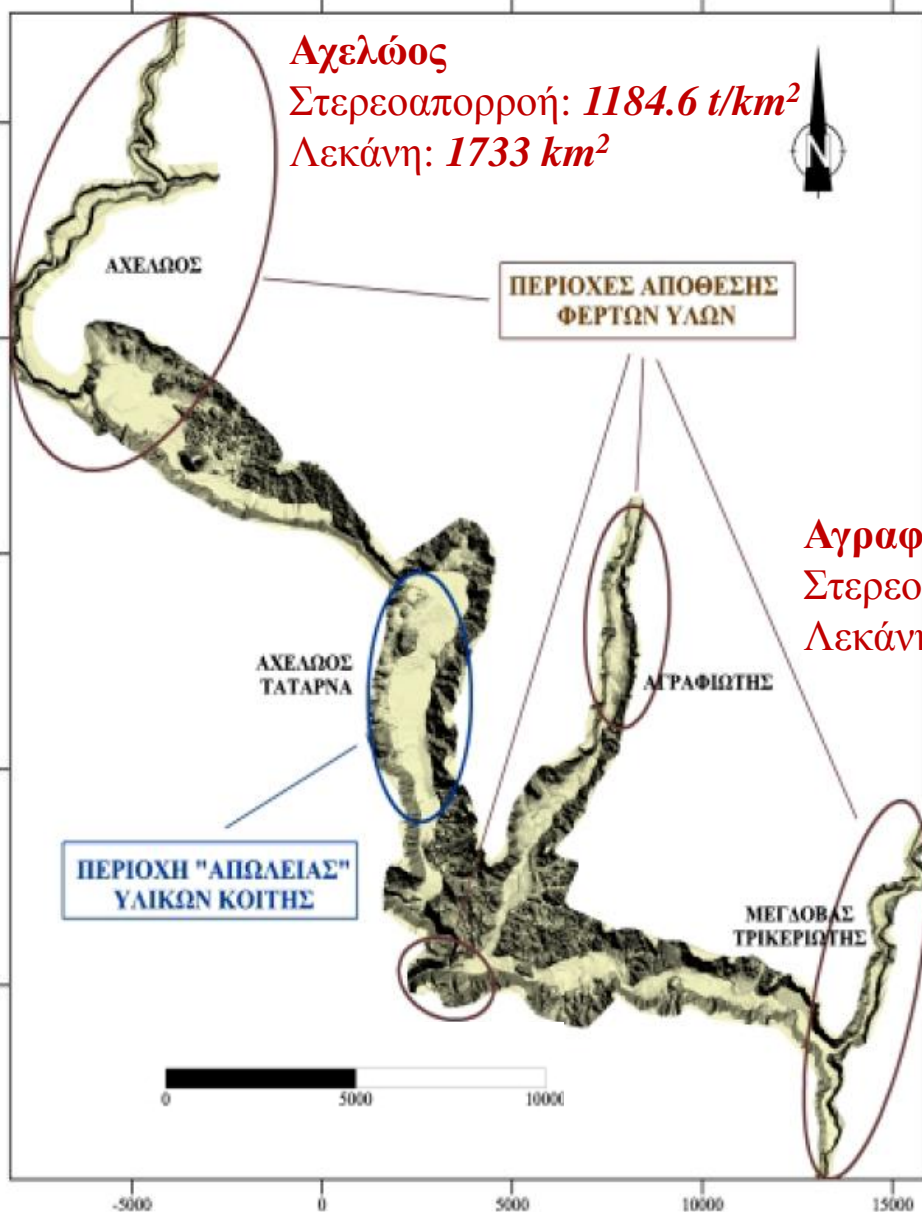
	Ταμιευτήρας Κρεμαστών ⁽¹⁾	Ταμιευτήρας Μαραθώνα ⁽²⁾
Έτη λειτουργίας	34	80
Αποθέσεις-hm ³	66.6	4.68
Μέση ετήσια απόθεση φερτών υλών-m ³	2 081 250	58 640
Επιφάνεια λεκάνης απορροής-km ²	3292	117.8
Μέση ετήσια στερεοαπορροή-t/km ²	1005	508

⁽¹⁾Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη και Δ. Κουτσογιάννης, 2002, Η εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες ως δυναμικό φαινόμενο - Εφαρμογή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών, *Πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας*, Θεσσαλονίκη, 2, 363–370, ΑΠΘ, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία.

⁽²⁾Ξανθάκης, Μ., 2011, *Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία*, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, σσ 288.

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Αποθέσεις στον ταμιευτήρα Κρεμαστών σε 34 έτη



Σε **34 έτη** ο όγκος των φερτών εκτιμήθηκε σε **66 hm³**.

Η μελέτη προέβλεπε όγκο φερτών **394 hm³** σε **50** έτη η οποία αντιστοιχούσε στο **8.8%** της ολικής χωρητικότητας του ταμιευτήρα

Μέγδοβας-Τρικεριώτης
Στερεοαπορροή: 489.4 t/km²
Λεκάνη: 1239 km²

Σύνολο
Στερεοαπορροή: 1005.6 t/km²
Λεκάνη: 3292 km²

Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - ΠΕΕΑ

Universal Soil Loss Equation - USLE

i_{30} : max τιμή έντασης βροχόπτωσης ανά μονάδα επιφάνειας
 i_j : ένταση βροχόπτωσης στο χρόνο Δt_j

x : κεκλιμένο μήκος κλιτύς [m]
 (απόσταση από το σημείο που αρχίζει η επιφανειακή ροή μέχρι το σημείο που η απορροή απάγεται από φυσικό ή τεχνητό αγωγό)

θ : γωνία κλίσης [$^\circ$]

R
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΡΟΧΗΣ

$$R = \frac{Ei_{30}}{1700}$$

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ L

$$L = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m$$

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ S

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065$$

P
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ
 Οι τιμές του προκύπτουν από Πίνακα

$$A = 0.244 * R * K * L * S * C * P \quad \text{kg/m}^2$$

C
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ
 Οι τιμές του προκύπτουν από Πίνακα

K
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ

$$100K = 2.110^{-4} M^{1.14} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

E: συνολική κινητική ενέργεια βροχής ανά μονάδα επιφάνειας

$$E = \sum_j \varepsilon_j * i_j * \Delta t_j \quad \text{J/m}^2$$

ε_j : ειδική κινητική ενέργεια βροχόπτωσης

$$\varepsilon_j = 3.79 \ln(23i_j) \quad \text{Jm}^{-2} \text{mm}^{-1}$$

M: παράμετρος μεγέθους κόκκων

$$M = P_s (100 - P_c)$$

P_s: ποσοστό ιλύος και πολύ λεπτής άμμου στο έδαφος ($d=0.002-0.1\text{mm}$) [%]
P_c: ποσοστό αργίλου στο έδαφος ($d<0.002\text{mm}$) [%]

a: ποσοστό οργανικού εδαφικού υλικού [%]
b: κωδικός εδαφικής δομής (1 για λεπτοκοκκώδη δομή έως 4 για τεμαχισμένη ή πλακώδη δομή)
c: κωδικός διαπερατότητας εδάφους (1 για πολύ γρήγορη διαπερατότητα έως 6 για πολύ αργή)

Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al.,1997)

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A: ετήσια εδαφική απώλεια ($t \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)

Συντελεστές (factors)

- R: διαβρωτικότητα βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity) ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
- K: διαβρωσιμότητας εδάφους (Soil Erodibility) ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- L: μήκους κλίσης (Slope Length), αδιάστατος
- S: βαθμού κλίσης (Slope Steepness), αδιάστατος
- C: διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management), αδιάστατος (από 0 έως 1)
- P: ελέγχου της διάβρωσης (Support Practice), αδιάστατος (από 0 έως 1)

Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας

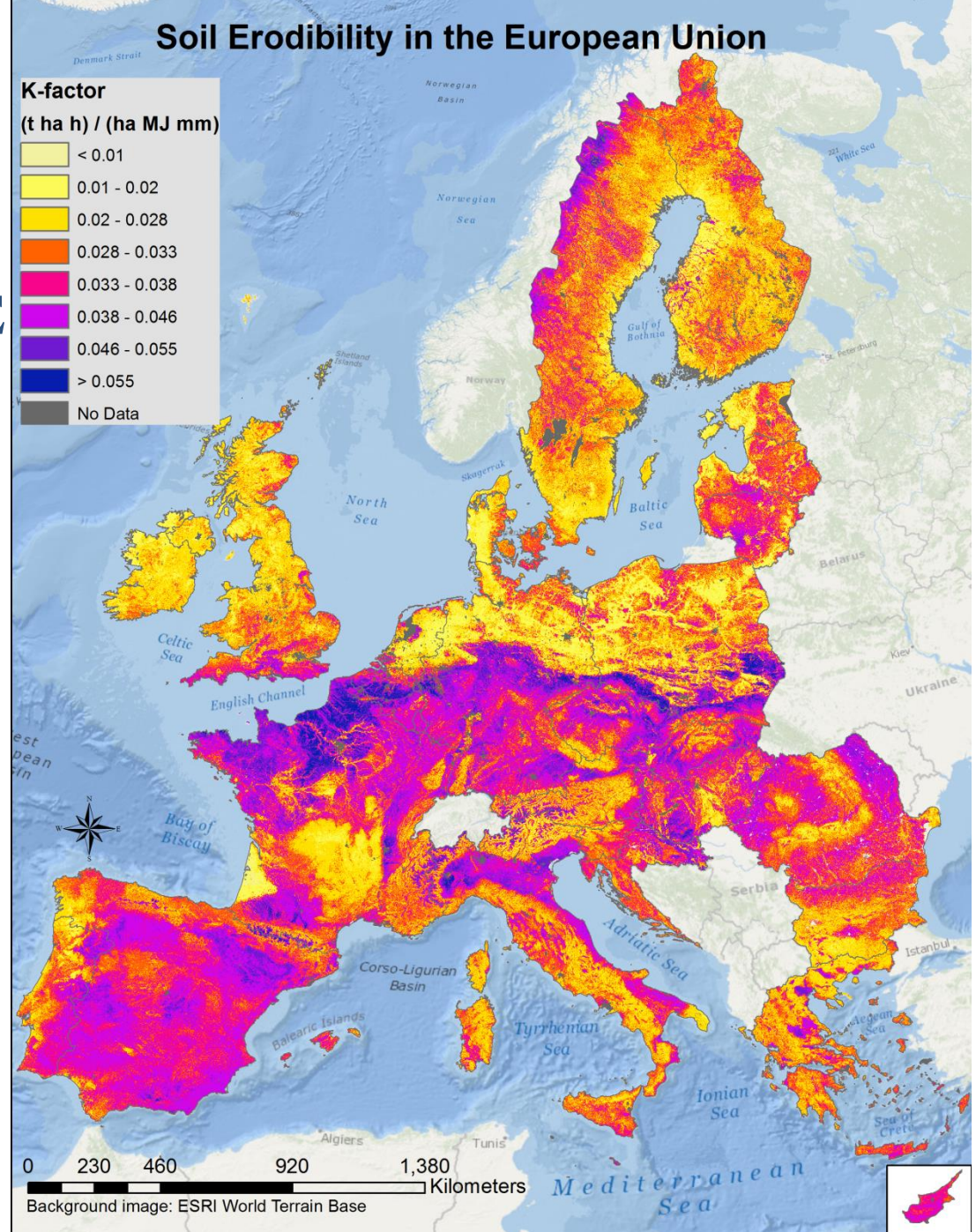
Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al.,1997)

- Ο συντελεστής **διαβρωτικότητας βροχόπτωσης** εξαρτάται από την ένταση και χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων. Αρχικά εκτιμάται για κάθε επεισόδιο βροχής (απαιτούνται βροχογραφικά δεδομένα μεγάλου μήκους) και ο ετήσιος συντελεστής προκύπτει ως το άθροισμα των συντελεστών των επιμέρους επεισοδίων βροχής κατά τη διάρκεια του έτους. Αν δεν διατίθενται δεδομένα βροχογράφου χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που τον συσχετίζουν με τη βροχόπτωση σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες (ημερήσια, μηνιαία) .
- Ο συντελεστής **διαβρωτικότητας εδάφους** εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως δομή, κοκκομετρία, διαπερατότητα και ποσοστό οργανικού υλικού.
- Οι συντελεστές **μήκους και βαθμού κλίσης** αποτυπώνουν την επίδραση της γεωμορφολογίας και του αναγλύφου στην παραγωγή εδαφικής απώλειας.
- Ο συντελεστής **διαχείρισης - κάλυψης γης** εκφράζει την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών στο ρυθμό παραγωγής εδαφικής διάβρωσης. Οι τιμές του προκύπτουν μέσω της μιας πολλαπλασιαστικής σχέσης 5 άλλων αδιάστατων (0-1) συντελεστών: πρότερης χρήσης γης (Prior Land Use), φυτοκάλυψης (Canopy Cover) , επιφανειακής κάλυψης (Surface Cover), εδαφικής τραχύτητας (Surface Roughness) και εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture)
- Ο συντελεστής **ελέγχου της διάβρωσης** εκφράζει την επίδραση των καλλιεργητικών πρακτικών στην απομείωσή της. Τέτοιες πρακτικές είναι η καλλιέργεια παράλληλα με τις ισοϋψείς (0.6-0.9), με λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών (0.3-0.45) και με χρήση αναβαθμών και μικρών αναχωμάτων κάθετων στην κλίση του εδάφους (0.12-0.18).

Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al.,1997)

Τιμές του συντελεστή K
και για την Ευρώπη
(Panagos et al., 2014)

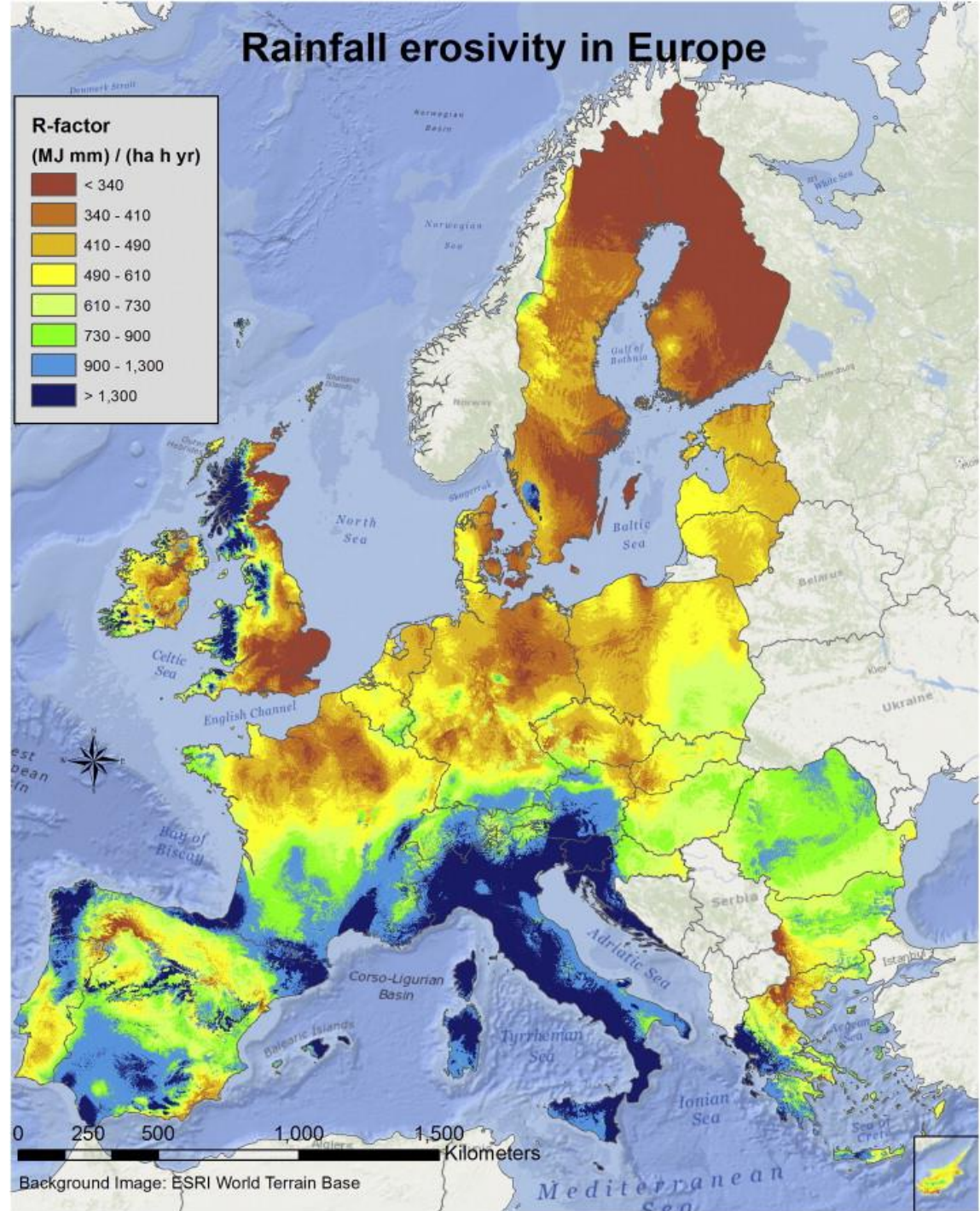
Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C.,
Borrelli, P., Alewell, C., Soil erodibility in
Europe: A high-resolution dataset based on
LUCAS, Science of Total Environment,
479–480 (2014) pp. 189–200



**Αναθεωρημένη
Παγκόσμια Εξίσωση
Εδαφικής Απώλειας
Revised Universal Soil
Loss Equation - RUSLE
(Renard et al.,1997)**

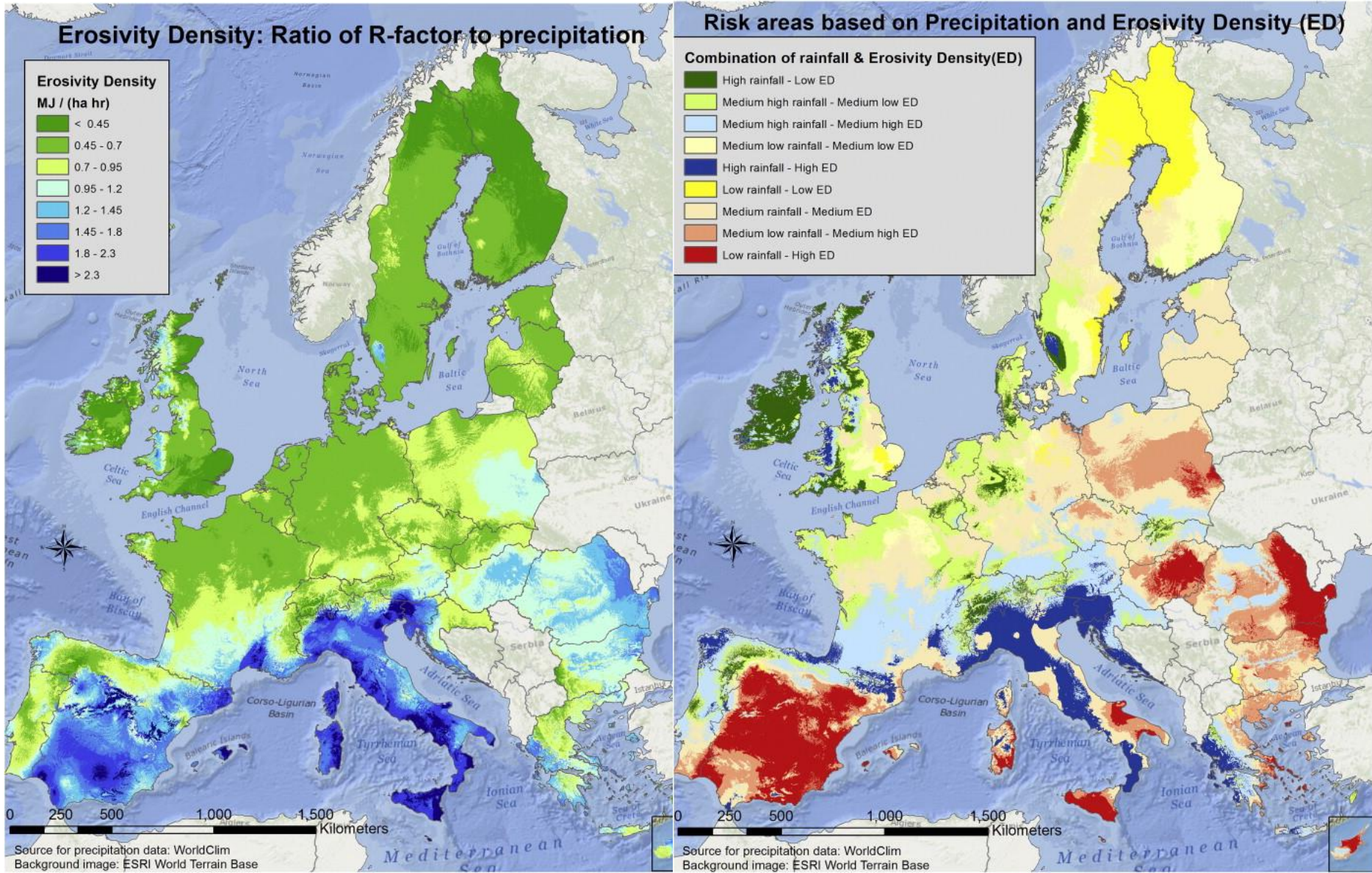
**Τιμές του συντελεστή R
και για την Ευρώπη
(Panagos et al., 2015)**

Rainfall erosivity in Europe, Panos Panagosa, Cristiano Ballabioa, Pasquale Borrellia, Katrin Meusburgerb, Andreas Klikc, Svetla Roussevad, Melita Perčec Tadiće, Silas Michaelidesf, Michaela Hrabalíkovág, Preben Olsenh, Juha Aaltoj, Mónika Lakatosj, Anna Rymaszewicz, Alexandru Dumitrescul, Santiago Begueríam, Christine Alewellb, Science of The Total Environment, Volume 511, Pages 801–814, 2015



Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al., 1997)

Πυκνότητα διάβρωσης και περιοχές σε κίνδυνο στην Ευρώπη (Panagos et al., 2015)



Εμπειρικές μέθοδοι

Ετήσιος όγκος φερτών (Gavrilovic, 1988)

Η εμπειρική εξίσωση Gavrilovic αναπτύχθηκε αρχικά με εφαρμογή σε υπολεκάνη του Αξιού ποταμού και έχει εφαρμοστεί σε ορεινές υδρολογικές λεκάνες της Βαλκανικής χερσονήσου αλλά και των Ιταλικών και Ελβετικών Άλπεων.

W: ετήσιος όγκος φερτών υλών (m³)

$$W = w \cdot A$$

w: ετήσια (ειδική) διάβρωση
της λεκάνης (m³/km²)

A: έκταση λεκάνης (km²)

$$w = \pi \cdot T \cdot P \cdot \sqrt{z^3}$$

T: συντελεστής θερμοκρασίας

P: ετήσιο ύψος βροχής
(mm) στο μέσο
υψόμετρο της λεκάνης

z: συντελεστής διάβρωσης

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0.1}$$

t₀: μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)
στο μέσο υψόμετρο της υπό
εξέταση περιοχής

$$z = x \cdot y \cdot (\varphi + \sqrt{J})$$

x: φυτοκάλυψη - έργα υδρονομίας (0.05~1)

y: εδαφική διαβρωσιμότητα (0.2~2)

φ: είδος/βαθμός διάβρωσης (0.1~1)

J: μέση κλίση (%)

Εμπειρικές μέθοδοι

Μέση ετήσια στερεοαπορροή, Κουτσογιάννης και Τάρλα, 1987

Εμπειρική σχέση για την εκτίμηση ποσοτήτων μέσης ετήσιας στερεοαπορροής που προέκυψε από την επεξεργασία στοιχείων στερεοϋδρομετρήσεων σε επτά θέσεις ποταμών στη ΒΔ Ελλάδα

$$G = 15 \cdot \gamma \cdot e^{3P}$$

G : μέση ετήσια στερεοαπορροή σε αιώρηση (t/km^2)

P : μέσο ετήσιο ύψος βροχής (m)

γ : γεωλογικός συντελεστής

$$\gamma = \kappa_1 p_1 + \kappa_2 p_2 + \kappa_3 p_3$$

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$: κατηγορίες κατάταξης εμφανιζόμενων πετρωμάτων από άποψη διαβρωσιμότητας.

p_1, p_2, p_3 : ποσοστό εμφάνισης στη λεκάνη απορροής

Κατηγορίες πετρωμάτων από άποψη διαβρωσιμότητας

Υψηλής (αλλούβια, φλύσχης)

$$\kappa_1 = 1$$

Μέτριας (μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι)

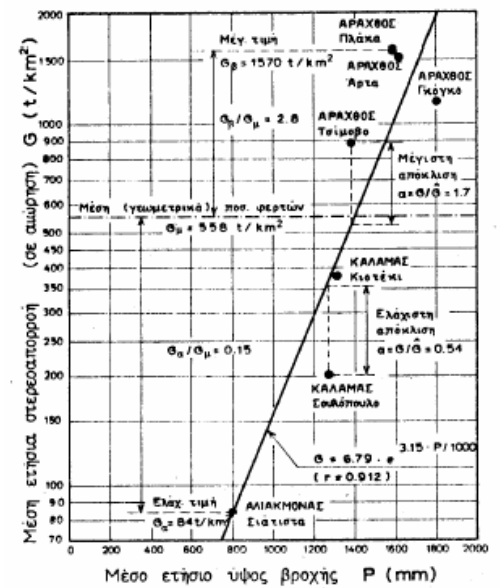
$$\kappa_2 = 0.5$$

Χαμηλής (ασβεστόλιθοι,

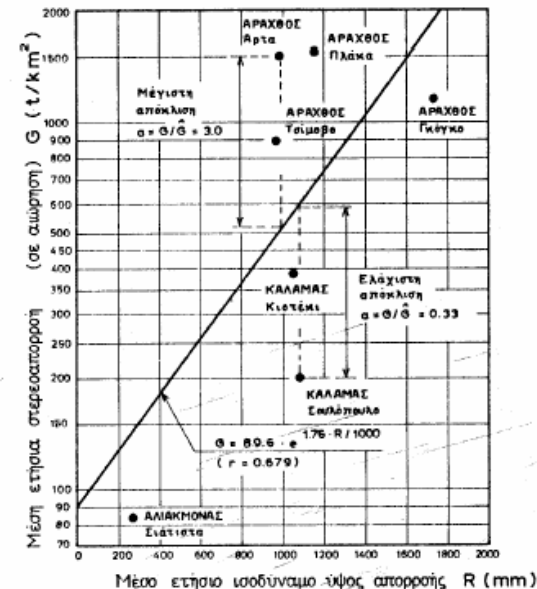
δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκρηξιγενή)

$$\kappa_3 = 0.1$$

Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Τάρλα, 1987, Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα, *Τεχνικά Χρονικά*, 7 (3).



ΣΧΗΜΑ 3: Συσχέτιση στερεοαπορροής σε αιώρηση και βροχοπτώσης (σε μέση ετήσια βάση)



ΣΧΗΜΑ 4: Συσχέτιση στερεοαπορροής σε αιώρηση και απορροής (σε μέση ετήσια βάση)

Εμπειρικές μέθοδοι

Συντελεστής Στερεοαπορροής (SDR)

(Vanoni, 1975)

$$\text{SDR}=0.42 * A^{-0.125}$$

Vanoni, V.A., 1975, Sedimentation Engineering, in *Manuals and Reports on Engineering Practices*, ASCE, New York.

(USDA-SCS, 1971)

$$\text{SDR}=0.51 * A^{-0.11}$$

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA-SCS), 1971, National Engineering Handbook, Section 3: Sedimentation, Chapter 6: Sediment sources, yields, and delivery ratios, pp 18.

(Renfro, 1975)

$$\log\text{SDR}=1.7935-0.14191*\log*A$$

Renfro, G.W., 1975, Use of Erosion Equations and Sediment Delivery Ratios for Predicting Sediment Yield, in *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, U.S. Department of Agriculture (USDA).

A: έκταση λεκάνης (mi²)

Εμπειρικές μέθοδοι

Πυκνότητα φερτών

Η πυκνότητα των σωματιδίων των φερτών υλικών (dry bulk density) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των τιμών **1.0 και 1.6 t/m³**.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις αποθέσεις ενός ταμιευτήρα είναι:

Τυπικά εύρη τιμών πυκνότητας για αποθέσεις ταμιευτήρων U.S. Natural Resources Conservation Service

	Μονίμως βυθισμένο	Συχνά αναδυόμενο
Διάσταση Κόκκου	Πυκνότητα (t/m ³)	
Άργιλος	0.64~0.96	0.96~1.28
Ιλύς	0.88~1.20	1.20~1.36
Μίγμα αργίλου-ιλύος	0.64~1.04	1.04~1.36
Μίγμα άμμου-ιλύος	1.20~1.52	1.52~1.76
Άμμος	1.36~1.60	1.36~1.60
Χαλίκι	1.36~2.00	1.36~2.00
Άμμος-χαλίκι φτωχής διαβάθμισης	1.52~2.08	1.52~2.08

1. Τα έτη και ο τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα
2. Η σύσταση και κοκκομετρία των αποτιθέμενων φερτών υλικών
3. Ο ρυθμός συμπίεσης των αποτιθέμενων υλικών

Εμπειρικές μέθοδοι

Παράδειγμα διαστασιολόγηση νεκρού όγκου ταμιευτήρα

Εμβαδόν λεκάνης απορροής: 82 km^2

Διάρκεια ζωής ταμιευτήρα: 50 έτη

Εδαφική διάβρωση σε λεκάνη (εκτίμηση με RUSLE): $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$

Συντελεστής στερεοαπορροής: 0.27

Στερεοαπορροή: $20 \times 0.27 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1} = 5.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$

Συνολική στερεοαπορροή λεκάνης: $5.4 \times 82 \times 100 = 44270 \text{ t}$

Πυκνότητα φερτών υλών: 1.25 t/m^3

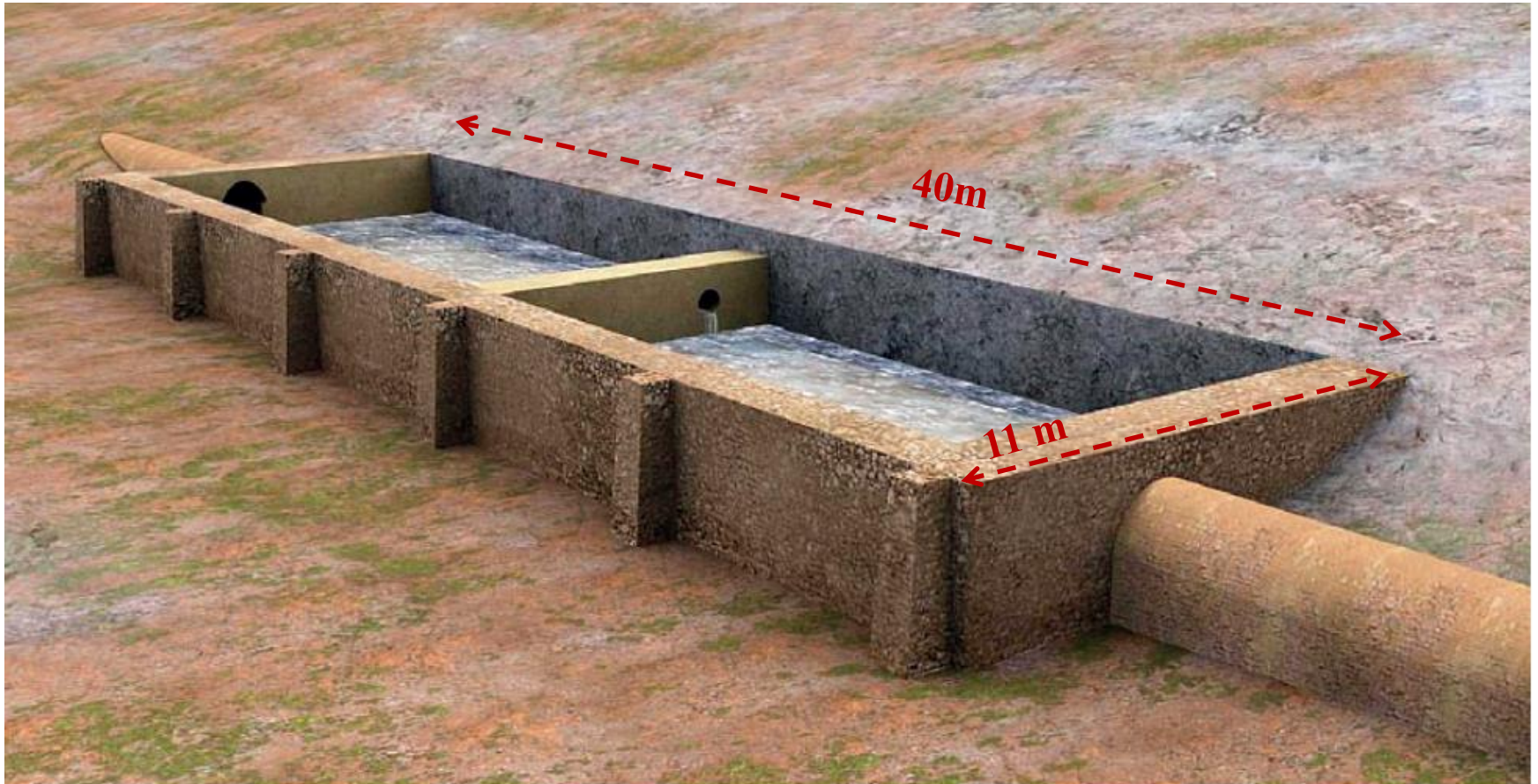
Ετήσιος όγκος αποθέσεων σε ταμιευτήρα: $44270 / 1.25 = 35416 \text{ m}^3$

Όγκος αποθέσεων σε ταμιευτήρα σε 50 έτη: 1.8 hm^3

Διαχείριση φερτών

Δεξαμενές καθίζησης σε υδραγωγεία

Ανδριάνειο υδραγωγείο Κορίνθου:
Τρισδιάστατη αναπαράσταση δεξαμενής καθίζησης στη θέση Αλεπότρυπες

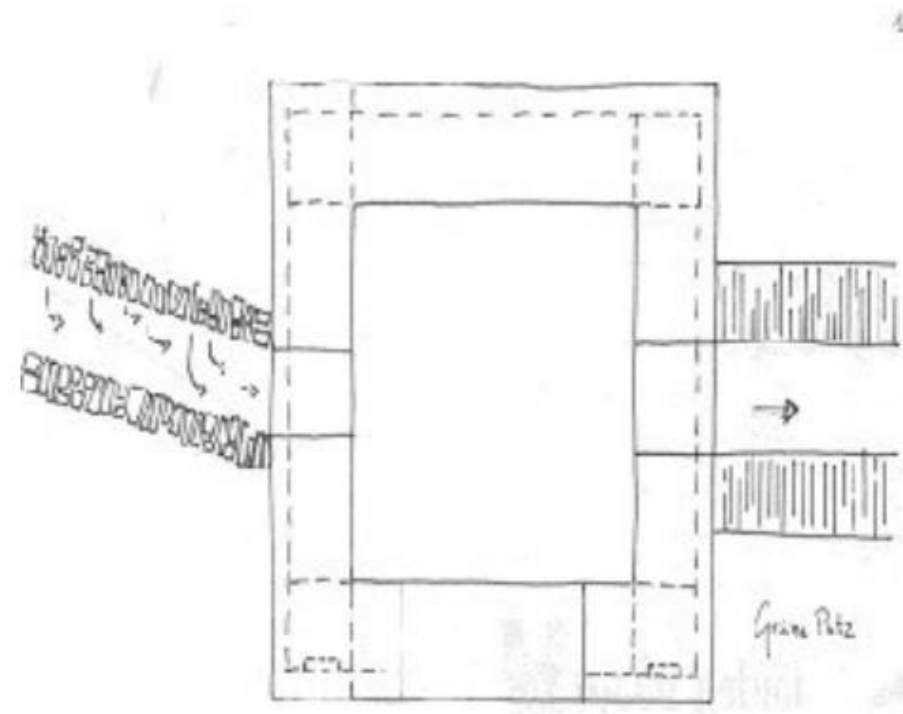


Πηγή: Γ. Λώλος, Το Ανδριάνειο υδραγωγείο Κορίνθου και η μεταφορά του νερού στα Ρωμαϊκά χρόνια, Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, 2010

Διαχείριση φερτών

Δεξαμενές καθίζησης σε υδραγωγεία

Ρωμαϊκό υδραγωγείο Κολονίας

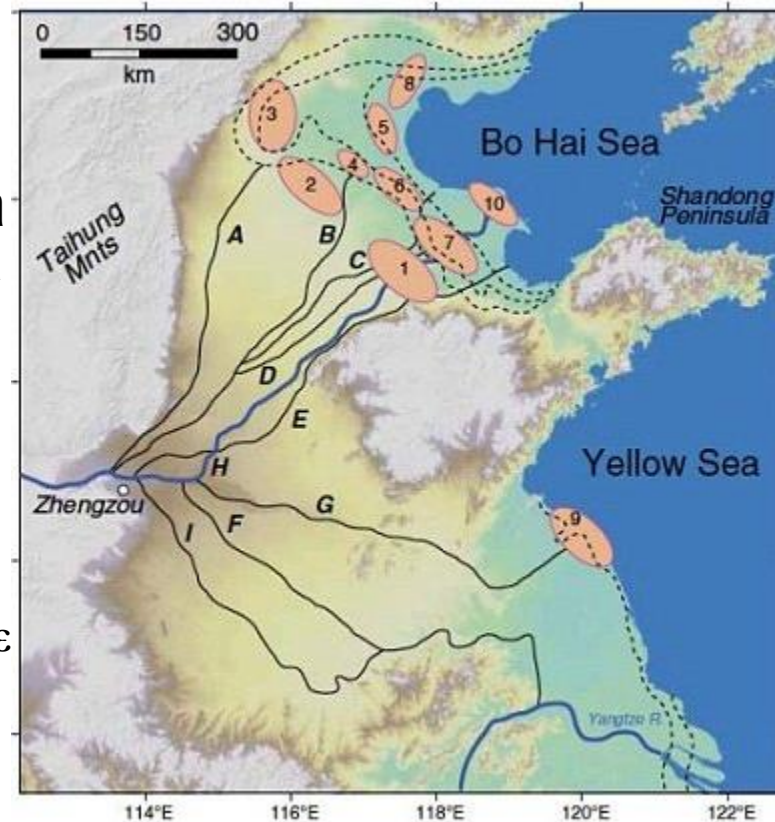


Πηγή: Chatzakis M.K, A.G. Lyrintzis, D.D. Mara and A.N. Angelakis, Sedimentation Tanks through the Ages

Διαχείριση φερτών

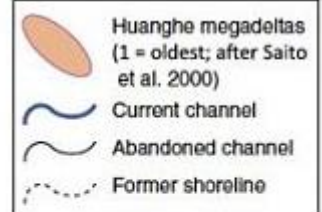
Τα φερτά στην ιστορία της Κίνας

- Ο Κίτρινος ποταμός έχει μια από τις μεγαλύτερες στερεοπαροχές στον κόσμο και πήρε το όνομά του από το χρώμα των φερτών που μεταφέρει.
- Στο μέσο ρού ο ποταμός φτάνει στην πεδιάδα και καθώς η κλίση της κοίτης μειώνεται, η ταχύτητα γίνεται μικρότερη και τα αιωρούμενα φερτά αποτίθενται στην κοίτη. Η συσσώρευση των φερτών μεταξύ των αναχωμάτων έχει αποτέλεσμα η κοίτη του ποταμού να ανυψώνεται (μέχρι και 10 m) σε σχέση με τις παραποτάμιες περιοχές
- Από την αρχαιότητα είχε δοθεί έμφαση στην **εκβάνθυση του ποταμού και την κατασκευή και συντήρηση των αναχωμάτων** κατά την εποχή των χαμηλών παροχών, ώστε να προστατεύονται οι παρόχθιοι οικισμοί και καλλιέργειες. Σε αρχαία κείμενα (θεωρείται ότι αφορούν στο 2000 π.Χ.) αναφέρεται ότι ο Αυτοκράτορας Yu σταθεροποίησε την μέχρι τότε μεταβαλλόμενη πορεία του Κίτρινου ποταμού σώζοντας την Κίνα από πλημμύρες
- Εάν ο ποταμός υπερχειλίσει και τα αναχώματα καταστραφούν υπάρχει ο κίνδυνος αλλαγής πορείας του ποταμού. Στην ιστορία έχουν καταγραφεί 2000 καταστροφές αναχωμάτων με μεγάλες επιπτώσεις στον πληθυσμό και **26 σημαντικές αλλαγές της διαδρομής του ποταμού.**

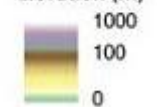


Channel avulsion date

A	~2278 B.C.
B	~602 B.C.
C	~15 A.D.
D	893
E	1048
F	1289
G	1324
H	1853
I	1938-1947



Elevation (m)



Πηγή: Πανεπιστήμιο Ουάσιγκτόν

Διαχείριση φερτών

Μέθοδοι προστασίας ταμιευτήρων

1. Ελαχιστοποίηση Εισροής

Μέτρα περιορισμού της διάβρωσης της ανάντη λεκάνης
Διατάξεις συγκράτησης φερτών ανάντη του ταμιευτήρα

2. Μεγιστοποίηση της εκροής

Μηχανική απομάκρυνση (Dredging)

Υδραυλική έκπλυση (Flushing, sluicing)

3. Καθοδήγηση των υλικών, ώστε να μην εισέρχονται στον ταμιευτήρα

Παράκαμψη του ταμιευτήρα

Απομάκρυνση φερτών από ταμιευτήρες

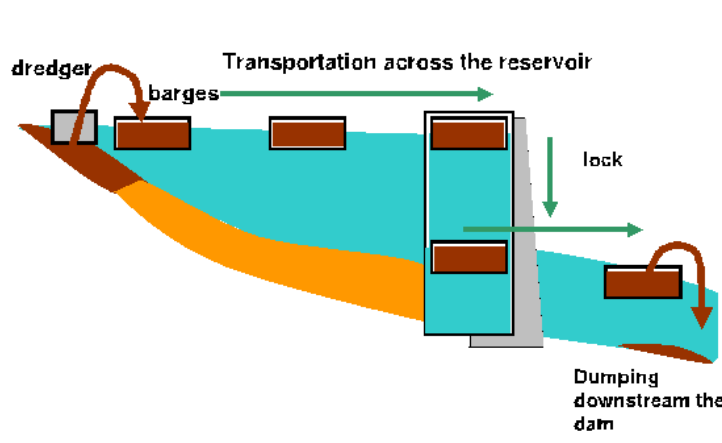
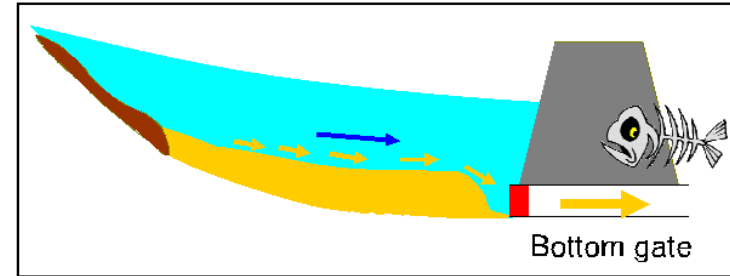
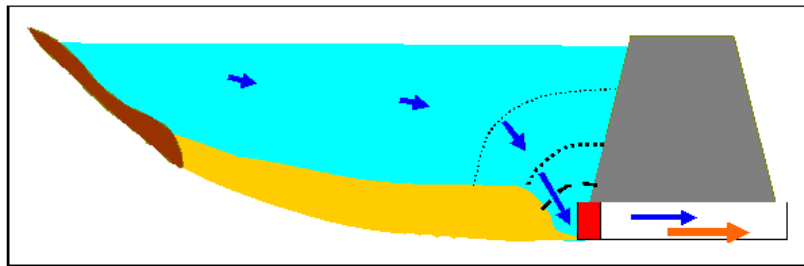
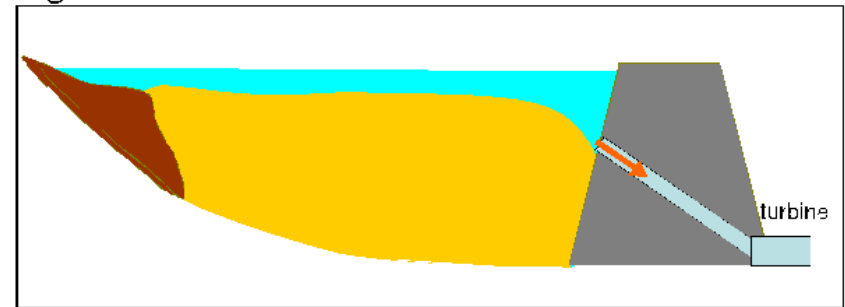
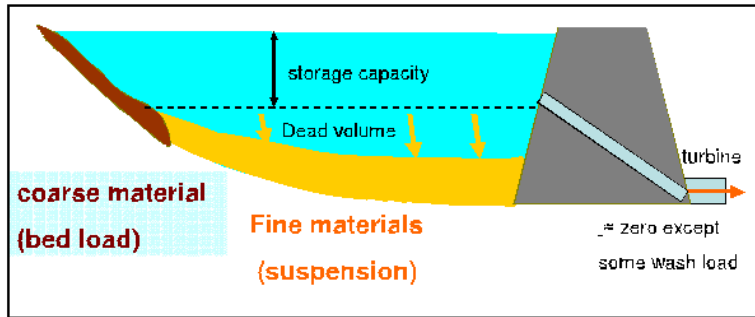


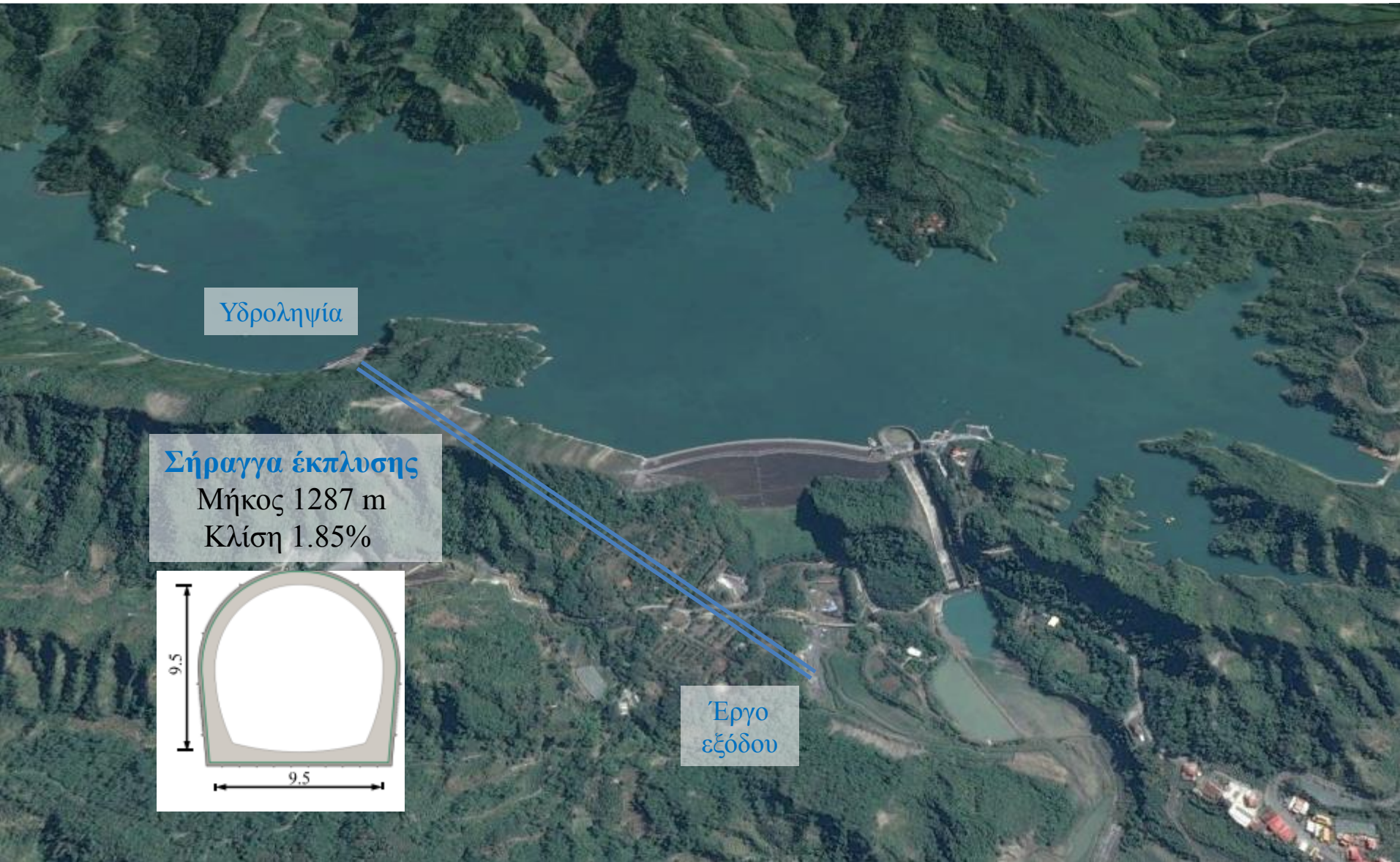
Figure 10. Nourishment of the Rhine River by barges of gravel.

Έργα εκτροπής φερτών από ταμιευτήρα

Φράγμα Nanhua, Taiwan

Χωρητικότητα ταμιευτήρα: 158 hm^3 Έκταση λεκάνης: 512 km^2

Το 2009 οι πλημμύρες που προκλήθηκαν από τον Τυφώνα Morakot προκάλεσαν την εισροή 17 hm^3 στον ταμιευτήρα.



Απομάκρυνση φερτών από ταμιευτήρες

Θύρες απομάκρυνσης φερτών (φράγμα Gezhouba –Κίνα)



Έργα εκτροπής φερτών από ταμιευτήρα

Ταμιευτήρες με έργα εκτροπής φερτών σε Ιαπωνία και Ελβετία

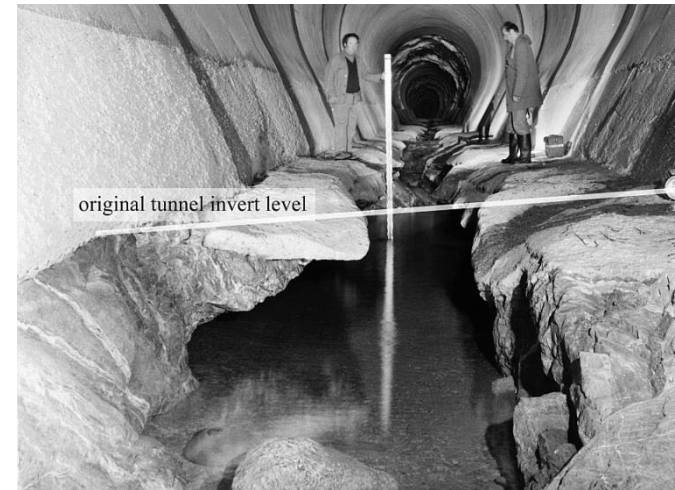
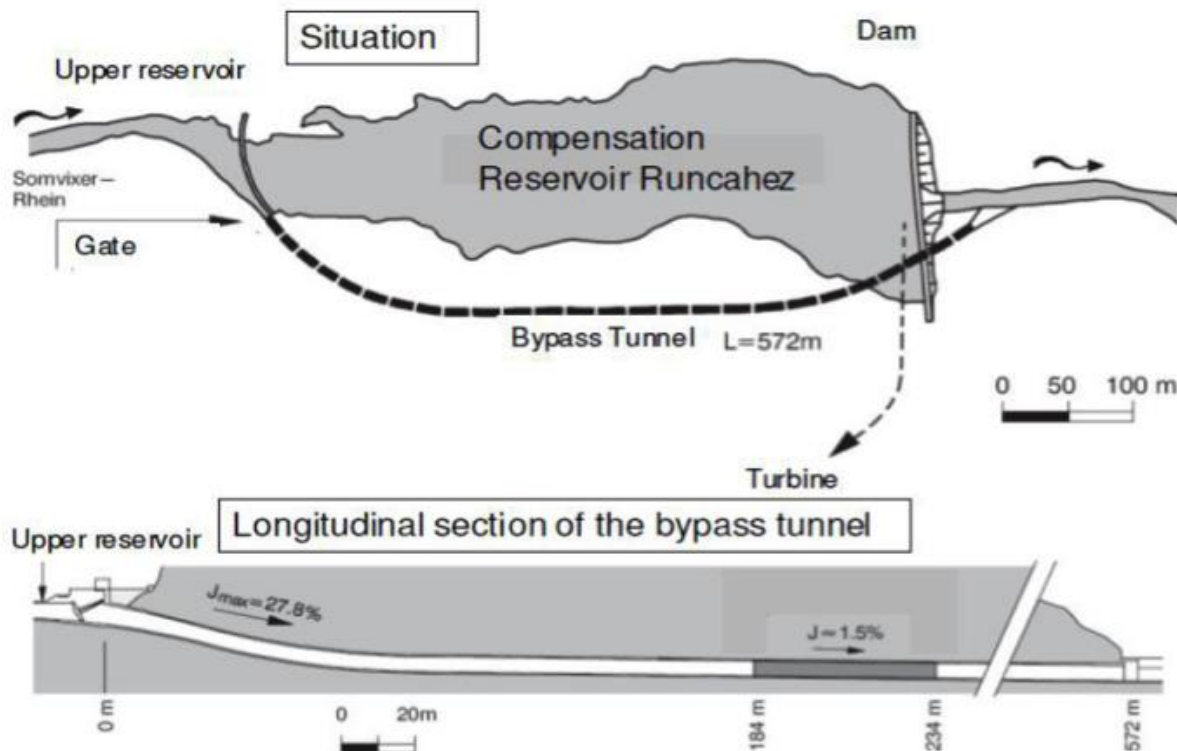
Φράγμα	Έτος	Σχήμα	Διαστάσεις (m)	Μήκος (m)	Κλίση (%)	Παροχή σχεδιασμού (m ³ /s)	Συχνότητα λειτουργίας (ημέρες/έτος)
Nunobiki (J)	1908	Αψίδα	2.9×2.9	-/258	-/1.3	39	-
Asahi (J)	1998	Αψίδα	3.8×3.8	12/2350	20/2.9	140	13
Miwa (J)	2004	Πέταλο	7×7.8	-/4308	-/1	300	-
Matsukawa (J)	2015	Αψίδα	5.2×5.2	-/1417	-/4	200	-
Egschi (S)	1976	Κύκλος	D=2.8	20/360	21/2.6	74	10
Palagnedra (S)	1974	Κύκλος	D=6.2	50/1760	29.6/2	250	2-5
Pfaffensprung (S)	1922	Πέταλο	5.2×4.7	25/282	35/3	220	200
Rempen (S)	1983	Πέταλο	3.4×3.5	22/450	25/4	80	1-5
Runcahez (S)	1962	Αψίδα	4.3×3.8	85/572	25/1.4	110	4

Πηγή: Auel et al, 2010 και Vischer et al, 1997)

Έργα εκτροπής φερτών από ταμιευτήρα

- Φράγμα εκτροπής της ροής
- Είσοδος της σήραγγας εκτροπής. Συνήθως με θυρόφραγμα, ώστε η ροή να εκτρέπεται μόνο κατά τις περιόδους πλημμυρών
- Τμήμα επιτάχυνσης σήραγγας. Απότομη κλίση (15-35%), υπερκρίσιμη ροή
- Τμήμα ήπιας κλίσης (1-4%). Διατομή πεταλοειδής ή αψιδωτή
- Έξοδος της σήραγγας. Μακριά από το φράγμα. Διάταξη καταστροφής ενέργειας

Φράγμα Runcahez (Ελβετία)



Απομάκρυνση φερτών από ταμιευτήρες Κατεδάφιση του φράγματος Glines Canyon



Τοξωτό από σκυρόδεμα, ύψους 64 m.
Κατασκευάστηκε το 1927, στον ποταμό
Elwha River (πολιτεία της Washington,
ΗΠΑ), για υδροηλεκτρική παραγωγή με
εγκατεστημένη ισχύ 13.1 MW.
Η κατεδάφιση ξεκίνησε το 2012
(ολοκληρώθηκε το 2014) με στόχο την
αποκατάσταση του οικοσυστήματος