



Seminario tecnico

LA RISPOSTA DEI SISTEMI ARGINALI A EVENTI ESTREMI: DAL COMPORTAMENTO OSSERVATO ALLA SUA MODELLAZIONE

*Prof. Michela Marchi
Università di Bologna*



13 luglio 2026

Contenuti

PROBABILITÀ DI COLLASSO ARGINALE

GLI EVENTI DEL MAGGIO 2023 IN EMILIA ROMAGNA

- Eventi metereologici
- Conseguenze

IMPATTO SUI SISTEMI ARGINALI

- La raccolta dati
- Interpretazione dei meccanismi di collasso

IL RUOLO DELLE VULNERABILITÀ ARGINALI NELLE ALLUVIONI DELL'EMILIA-ROMAGNA

- Codifica delle Vulnerabilità
- Caso di studio – Rotta di Via Fratelli Bandiera a Faenza (RA)

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - LESSON LEARNED – PROGETTO BEAVER



Rischio alluvionale e Probabilità di collasso arginale

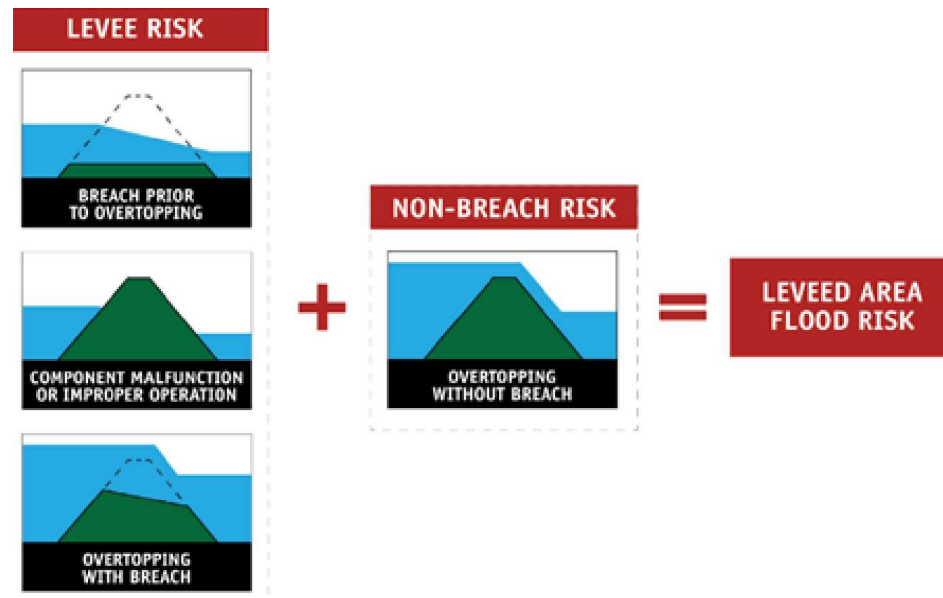
Le mappe di rischio idraulico nei tratti fluviali protetti da arginature sono spesso ancora redatte ipotizzando il solo fenomeno della tracimazione, nel presupposto di argini non collassabili fino al momento del sormonto.



Nelle mappe di rischio in cui è prevista la formazione di brecce, la loro posizione, distribuzione, numerosità non è correlata alle reali condizioni di vulnerabilità arginali.

E' quindi svincolata dall'effettiva probabilità di collasso di un tratto arginale,

Rischio alluvionale e Probabilità di collasso arginale



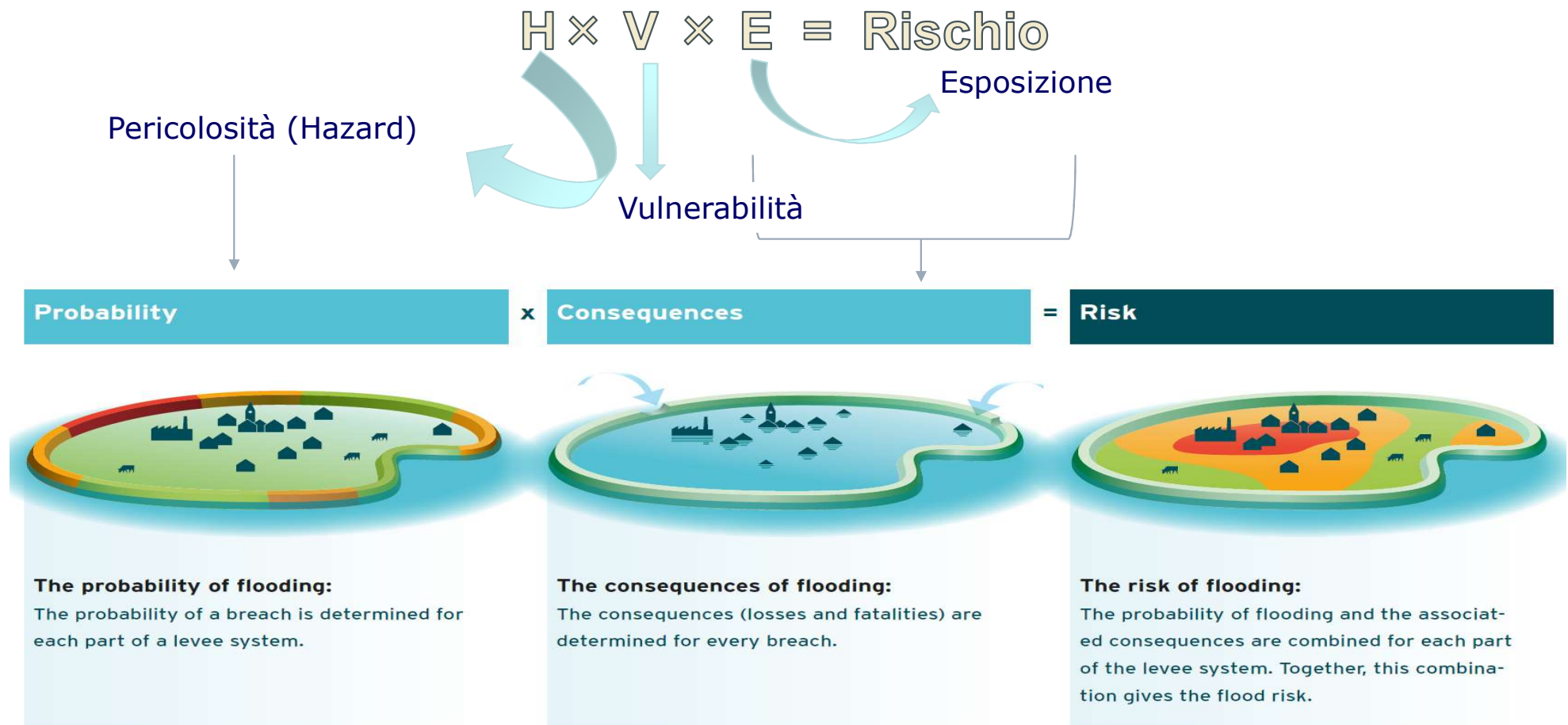
Il termine **"flood risk"**, secondo la terminologia USACE (U.S. Army Corps of Engineers), descrive il rischio complessivo di alluvione nell'area posta a valle dell'argine.

Il termine **"levee risk"** si riferisce invece al rischio associato direttamente al sistema arginale.

Un'area arginata può essere allagata a causa di uno dei quattro scenari possibili («inundation scenarios»).

In Ambito Internazionale (Olanda, Stati Uniti) i progressi fatti negli ultimi 20 anni hanno consentito di integrare la **PROBABILITA' DI COLLASSO ARGINALE** nelle mappe di rischio alluvione, includendo nelle analisi i possibili meccanismi di rottura.

Rischio alluvionale e Probabilità di collasso arginale



PREMESSA: Performance dei sistemi arginali



Raramente si dispone di documentazione sul comportamento degli argini in **scala reale**, durante eventi di piena passati

Gli argini fluviali sono infrastrutture **LINEARI** che si estendono per centinaia di chilometri, la cui effettiva capacità è determinata dalla **SEZIONE PIÙ VULNERABILE**

Ci sono enormi complessità nella quantificazione della sicurezza di una **sezione ARGINALE** rispetto ai diversi meccanismi di collasso

- *Caratterizzazione dei terreni – (miscele limi sabbiosi-limi argillosi) in condizioni di parziale saturazione*
- *Sollecitazione idraulica transitoria*
- *per gran parte della loro vita non sono sollecitati alla loro capacità di progetto*



Contenuti

PROBABILITÀ DI COLLASSO ARGINALE

GLI EVENTI DEL MAGGIO 2023 IN EMILIA ROMAGNA

- Eventi metereologici
- Conseguenze

IMPATTO SUI SISTEMI ARGINALI

- La raccolta dati
- Interpretazione dei meccanismi di collasso

IL RUOLO DELLE VULNERABILITÀ ARGINALI NELLE ALLUVIONI DEI L'EMILIA-ROMAGNA

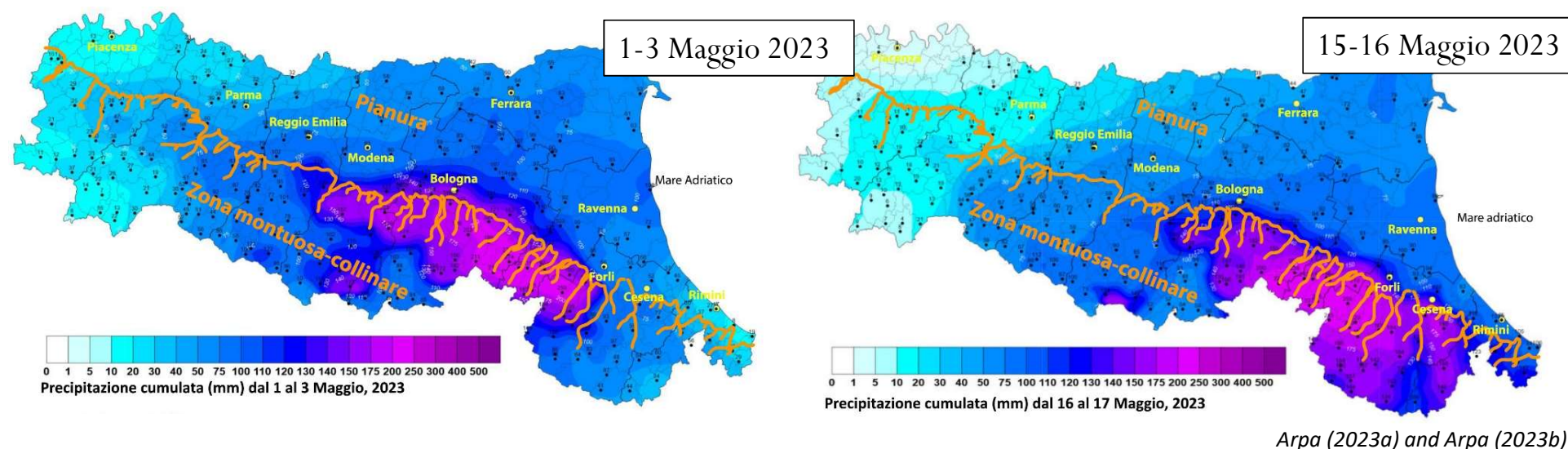
- Codifica delle Vulnerabilità
- Caso di studio – Rotta di Via Fratelli Bandiera a Faenza (RA)

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - LESSON LEARNED



Gli eventi meteorologici del maggio 2023 in Emilia Romagna

Due eventi meteorologici estremi hanno colpito in breve sequenza l'Emilia-Romagna



CARATTERI DI ECCEZIONALITA' DEGLI EVENTI:

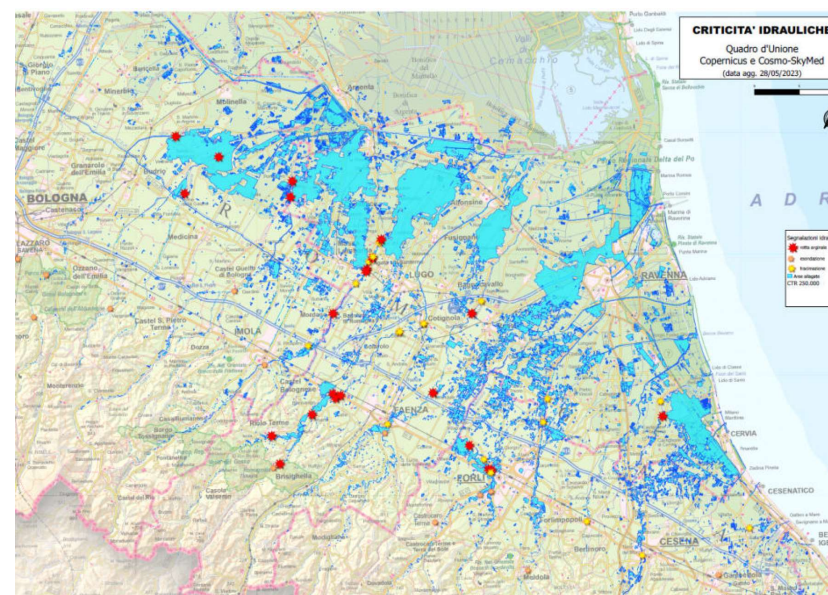
- Cumulate localmente superiori ai 500 mm, su larga scala
- Entrambi gli eventi hanno interessato le **stesse aree** a brevissima distanza di tempo

Tempi di ritorno delle precipitazioni hanno superato i 500.

Gli eventi meteorologici del maggio 2023 in Emilia Romagna

CONSEGUENZE documentate (Brath et al. 2023):

- **Straripamento simultaneo di 23 fiumi** -volume complessivo stimato di 350 milioni di metri cubi d'acqua esondata - 11 volte la capacità della diga di Ridracoli;
- **Allagamenti su una superficie di circa 540 km²**, principalmente in Romagna;
- **65.598 frane attivate**, su un'area di 72,21 chilometri quadrati;



Mapa delle aree allagate al termine del secondo evento di piena del maggio 2023, elaborato a partire da rilievi LiDAR e ortofoto effettuati lungo il corso dei fiumi interessati mediante l'uso di droni (Modificato da Piano Speciale Preliminare del Commissario Straordinario alla Ricostruzione, 2023).

Contenuti

PROBABILITÀ DI COLLASSO ARGINALE

GLI EVENTI DEL MAGGIO 2023 IN EMILIA ROMAGNA

- Eventi metereologici
- Conseguenze

IMPATTO SUI SISTEMI ARGINALI

- La raccolta dati
- Interpretazione dei meccanismi di collasso

IL RUOLO DELLE VULNERABILITÀ ARGINALI NELLE ALLUVIONI DEI L'EMILIA-ROMAGNA

- Codifica delle Vulnerabilità
- Caso di studio – Rotta di Via Fratelli Bandiera a Faenza (RA)

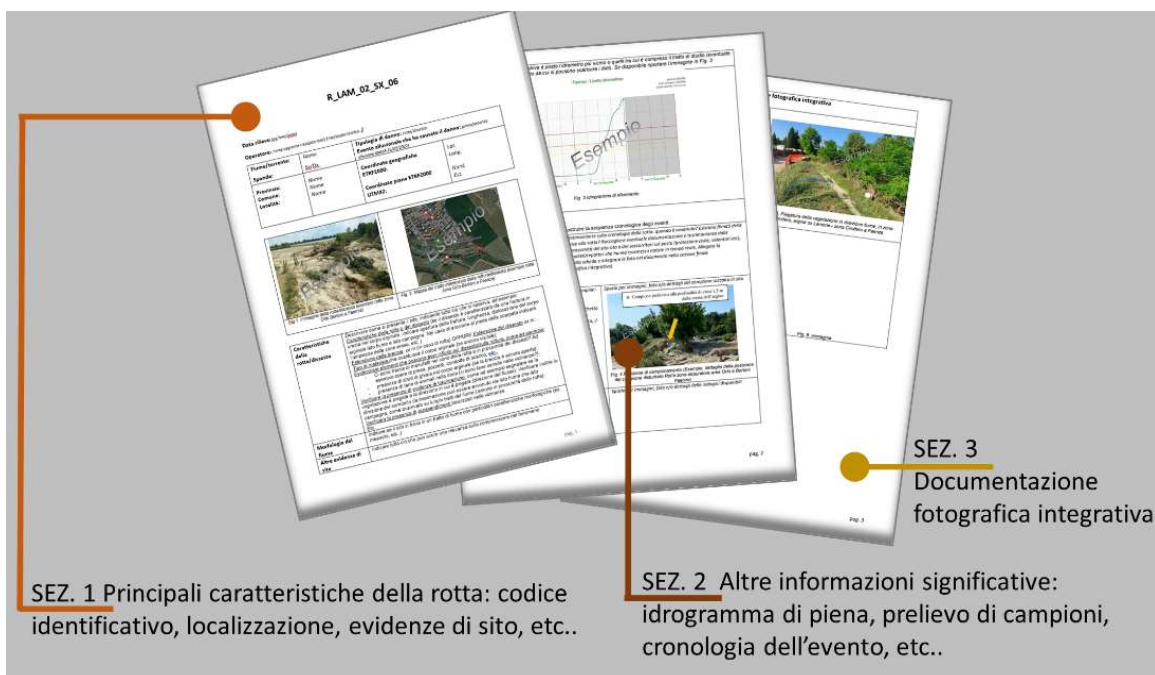
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - LESSON LEARNED



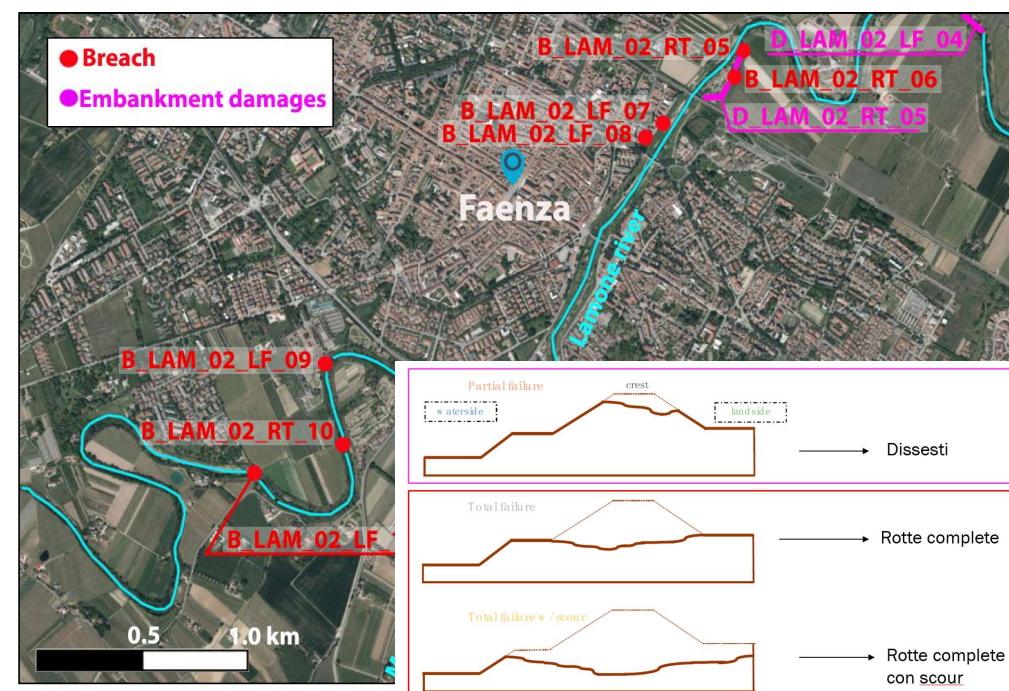
Impatto sui sistemi arginali

LA RACCOLTA DATI

Schede monografiche delle rotte e dei dissesti



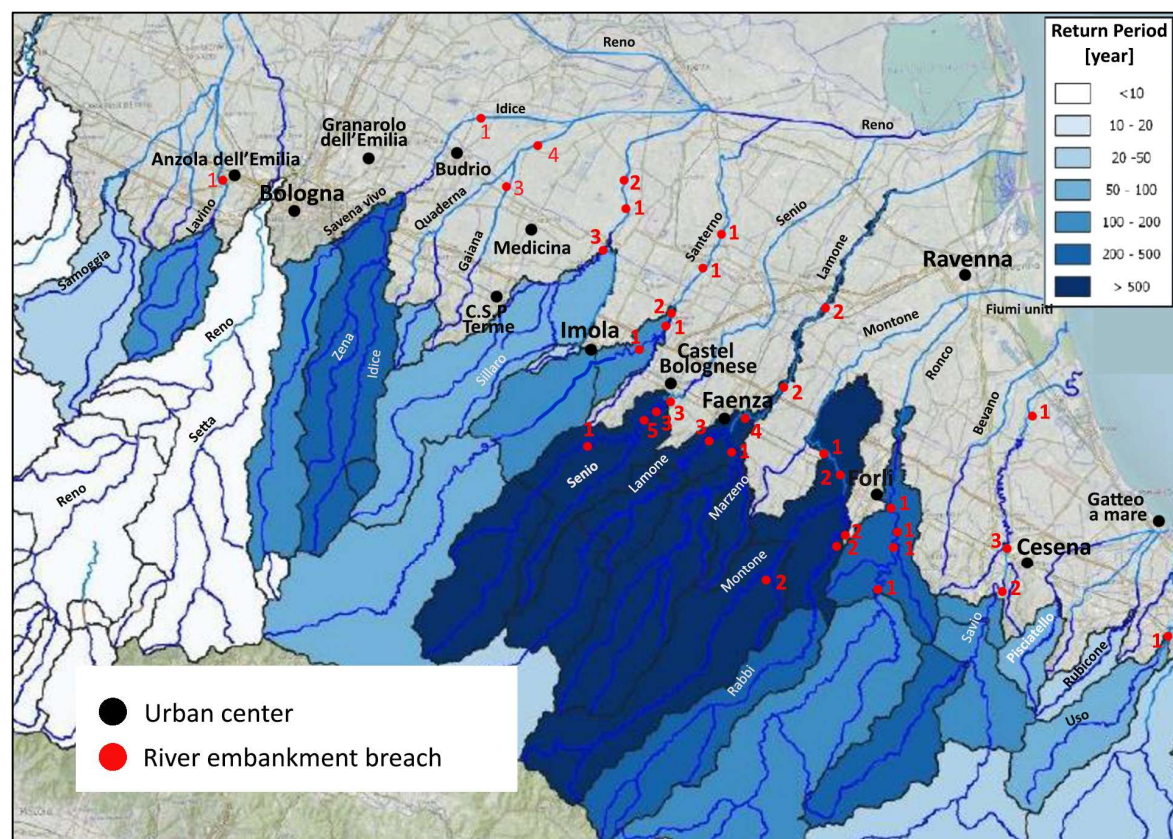
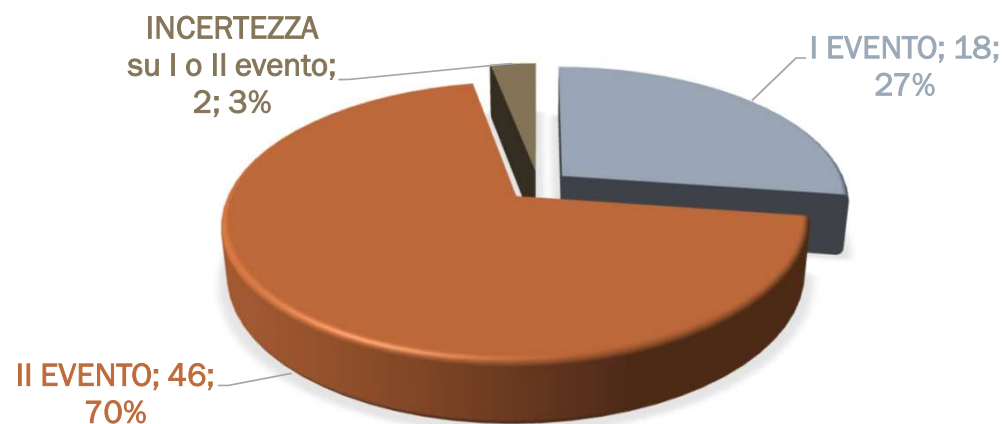
Mappatura in GIS



Impatto sui sistemi arginali

MAPPATURA DELLE ROTTE PRINCIPALI

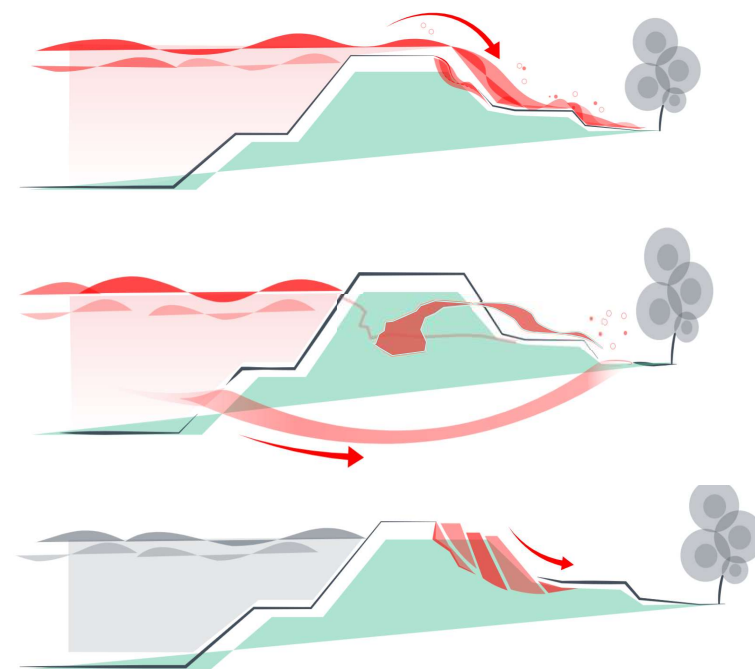
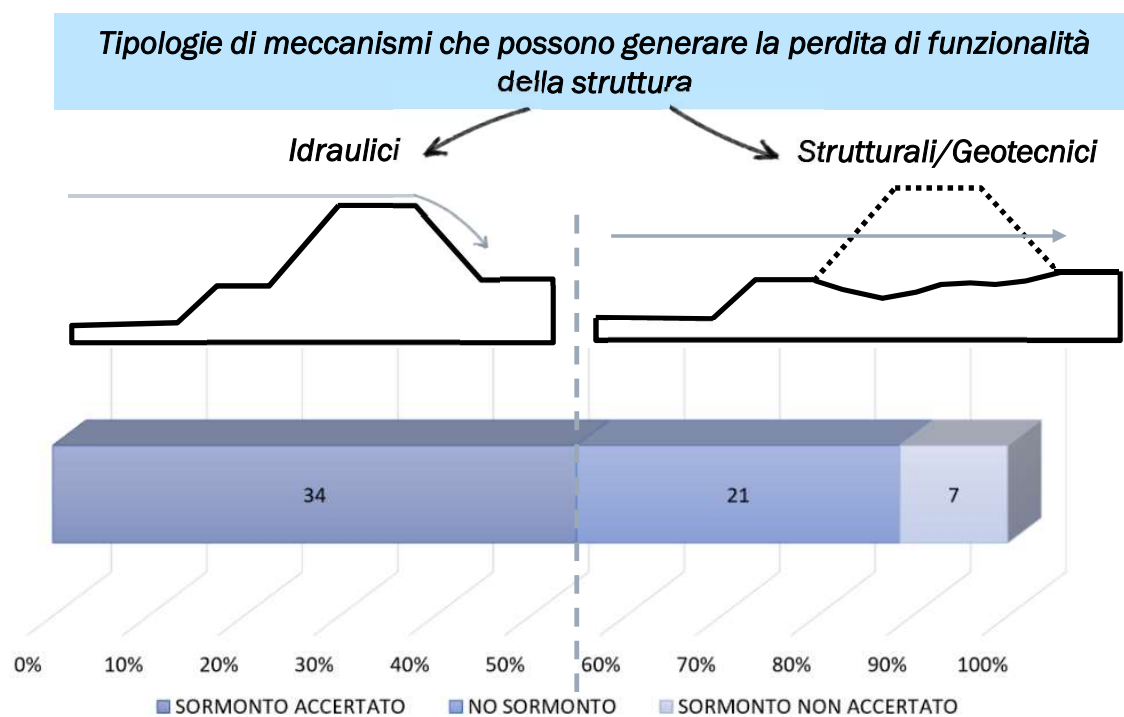
66 rotte principali su 16 fiumi



Mappa della rete fluviale colpita dagli eventi di maggio 2023, con il tempo di ritorno associato al massimo in due giorni consecutivi dell'altezza di pioggia media areale per i vari bacini. Ad ogni punto può corrispondere più di una rotta. Il torrente Marano, interessato dal secondo evento, non è riportato in questa mappa.

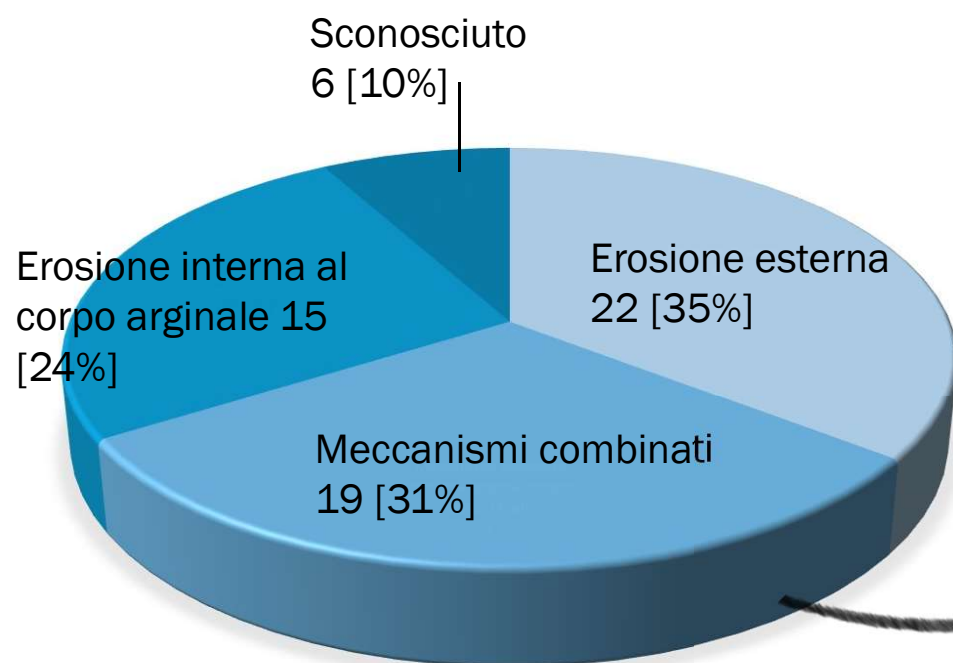
Impatto sui sistemi arginali

INTERPRETAZIONE DEI MECCANISMI DI COLLASSO



Impatto sui sistemi arginali

INTERPRETAZIONE DEI MECCANISMI DI COLLASSO



Ipotesi sui più probabili meccanismi di collasso, basate principalmente su evidenze di sito e testimonianze



Contenuti

PROBABILITÀ DI COLLASSO ARGINALE

GLI EVENTI DEL MAGGIO 2023 IN EMILIA ROMAGNA

- Eventi metereologici
- Conseguenze

IMPATTO SUI SISTEMI ARGINALI

- La raccolta dati
- Interpretazione dei meccanismi di collasso

IL RUOLO DELLE VULNERABILITÀ ARGINALI NELLE ALLUVIONI DELL'EMILIA-ROMAGNA

- Codifica delle Vulnerabilità
- Caso di studio – Rotta di Via Fratelli Bandiera a Faenza (RA)

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - LESSON LEARNED



Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

FATTORI DI VULNERABILITÀ

- I fattori di vulnerabilità sono elementi o condizioni che possono **compromettere la stabilità dell'argine**, rendendolo più suscettibile al collasso durante eventi di piena.
- Possono essere suddivisi in tre categorie**, in base alla loro origine: *Intrinseca*, *Indotta*, *Sistemica*

Intrinseca

caratteristiche proprie e strutturali della sezione



Indotta

si può manifestare a seguito di modifiche, di origine naturale e antropica

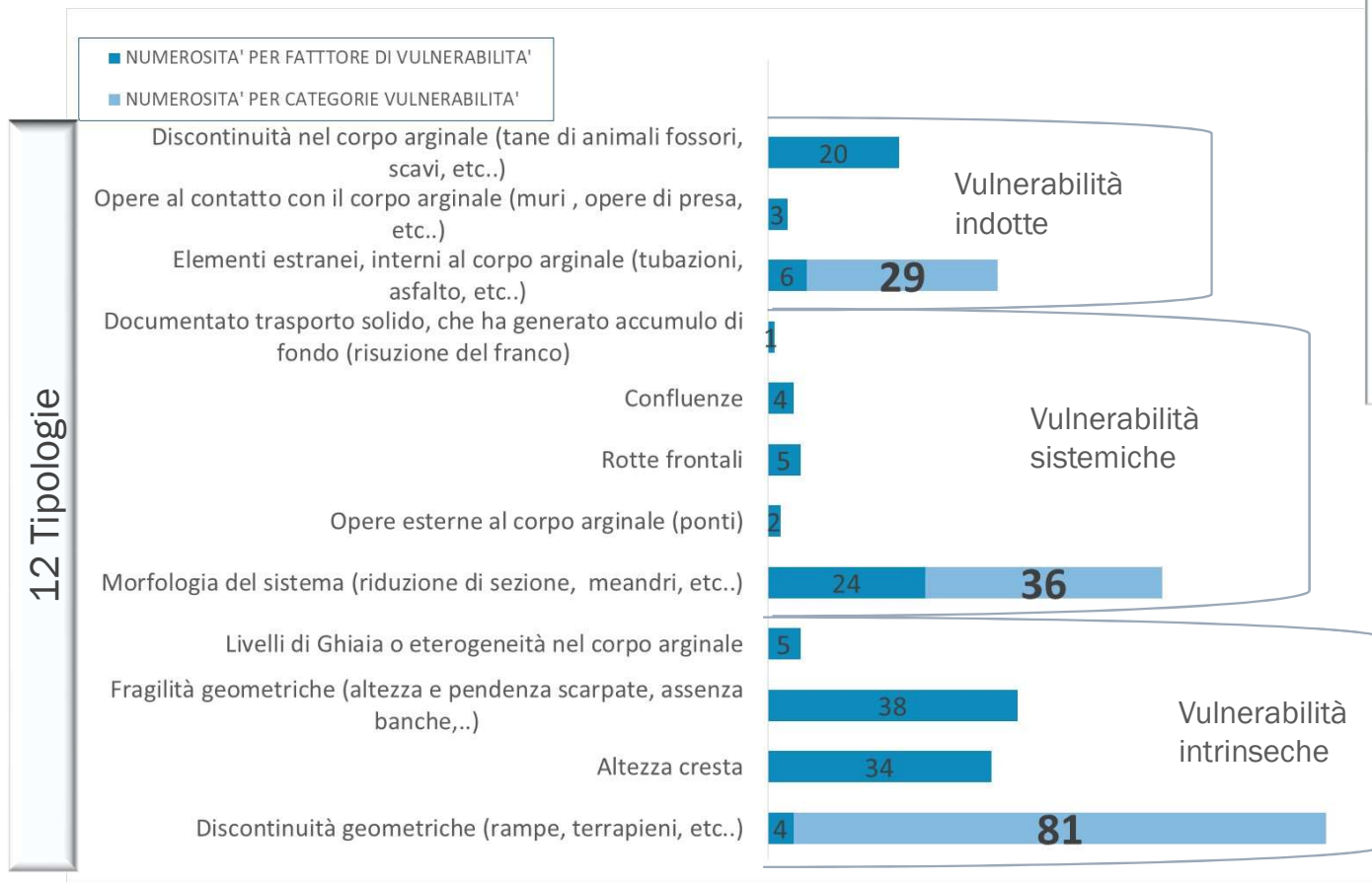
Sistemica

E' determinata dall'inserimento della sezione arginale all'interno di un sistema tridimensionale di protezione del territorio, dalla morfologia fluviale, dalle infrastrutture



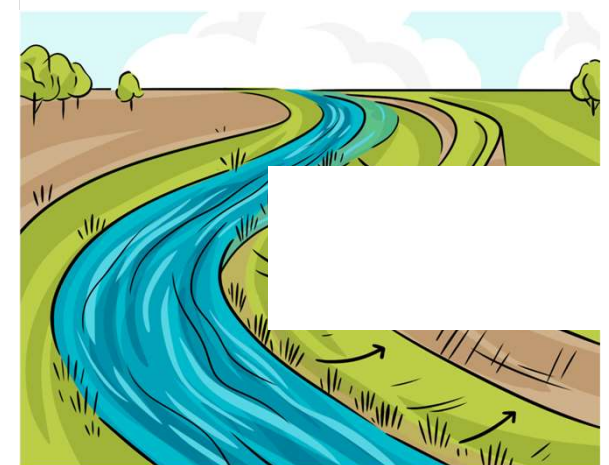
Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

SINTESI DELLA NUMEROSITA' delle VULNERABILITA'



Abbiamo rilevato:

- fino a **6 tipologie** di vulnerabilità su una singola sezione;
- In **28 sezioni** ne sono stati osservati **più di due** contemporaneamente;



Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

CASO DI STUDIO – ROTTA DI VIA FRATELLI BANDIERA A FAENZA (RA)



vulnerabilità sistemica

Restringimento di sezione
Altezza della cresta minore
in sinistra idraulica

vulnerabilità intrinseca

Mancanza franco + Argine alto
con banca di modeste
dimensioni lato campagna

vulnerabilità sistemica

→ Erosione
esterna

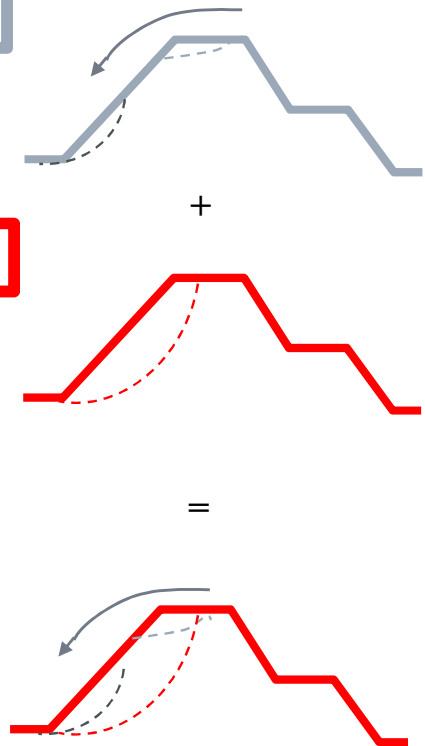
+

vulnerabilità intrinseca

→ Instabilità
della
scarpata

=

MECCANISMO DI
ROTTURA
COMBINATO



Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

CASO DI STUDIO – ROTTA DIVIA FRATELLI BANDIERA A FAENZA (RA)



- Geometria da LIDAR della Regione;
- Stratigrafia dedotta da prove CPT e CPTU disponibili nel dataset della Regione, a qualche centinaio di metri, lato campagna sia in dx che in sx idraulica;
- Ipotesi sui possibili valori MEDI dei parametri per la caratterizzazione delle Unità:

Sinistra Idraulica

Destra Idraulica

ARGINE

GOLENA

ARGILLA

LIMO

ARGILLA

SABBIA

SEZ X-X

	γ_{sat} [kN/m ³]	E' [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	k_{sat} [m/s]
ARGINE	20	20 000	30.6	1	1E-07
GOLENA	20	20 000	30	1	1E-07
ARGILLA	21	15 000	28	10	1E-09
LIMO	20	20 000	30	5	1E-07
SABBIA	20	35 000	35	1	1E-06

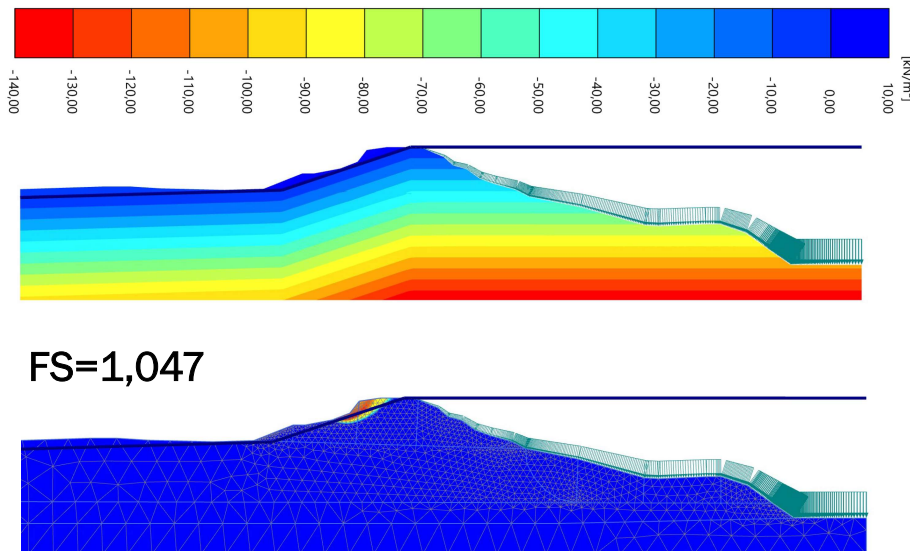
Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

CASO DI STUDIO – ROTTA DIVIA FRATELLI BANDIERA A FAENZA (RA)

- **Analisi di ROUTINE:** ANALISI IN CONDIZIONI DI FLUSSO STAZIONARIE; cadente 1:3 (sx);
- Condizione idraulica al contorno lato fiume: massima piena del Maggio 2023 (= cresta argine)
- Modello Mohr-Coulomb (c- ϕ reduction method)



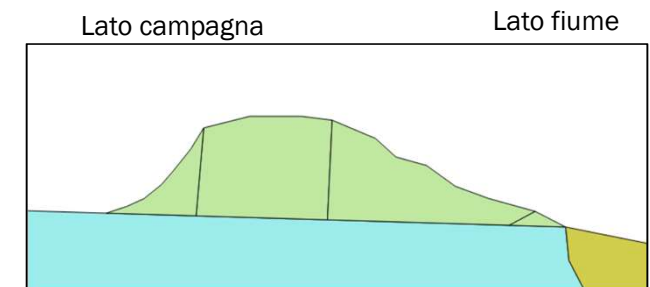
Argine geometria iniziale



Argine post erosione piede lato campagna



Modellazione numerica non converge
nella definizione delle condizioni
tenso-deformative iniziali (terreno arginale al collasso!)



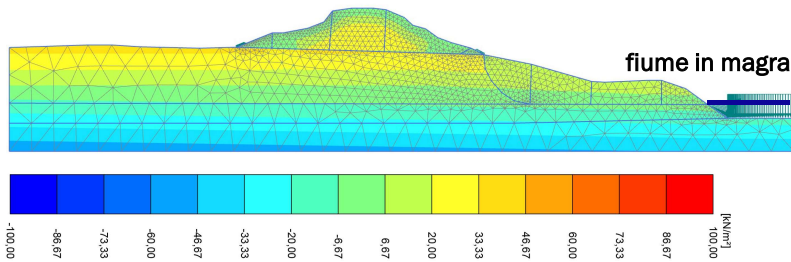
Il ruolo delle vulnerabilità arginali nelle alluvioni dei bacini sudorientali della regione Emilia-Romagna

CASO DI STUDIO – ROTTA DIVIA FRATELLI BANDIERA A FAENZA (RA)

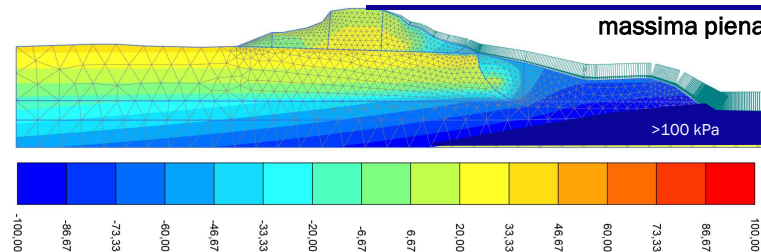
- ANALISI IN REGIME TRANSITORIO - terreno in condizioni di **parziale saturazione** (generata includendo le precipitazioni sul corpo arginale).
- Condizione idraulica al contorno: **idrogramma reale delle piene del Maggio 2023**
- Modello Mohr-Coulomb (c- ϕ reduction method) + Modello di ritenzione VG



Distribuzione press. interstiziali iniziale:



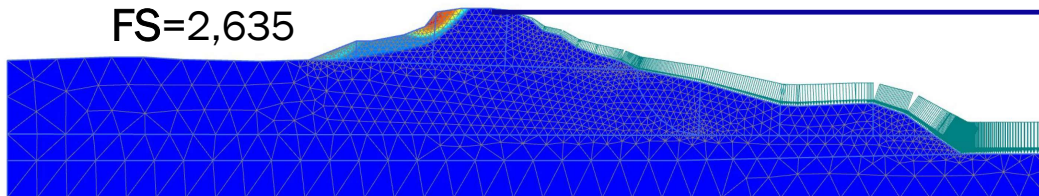
Distribuzione press. interstiziali al picco del II evento:



Permanenza della piena
insufficiente a saturare il corpo
arginale

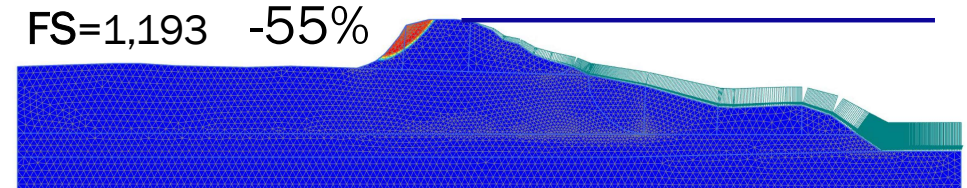
Geometria dell'argine iniziale:

FS=2,635



Geometria dell'argine post erosione al piede lato campagna:

FS=1,193 -55%



Contenuti

PROBABILITÀ DI COLLASSO ARGINALE

GLI EVENTI DEL MAGGIO 2023 IN EMILIA ROMAGNA

- Eventi metereologici
- Conseguenze

IMPATTO SUI SISTEMI ARGINALI

- La raccolta dati
- Interpretazione dei meccanismi di collasso

IL RUOLO DELLE VULNERABILITÀ ARGINALI NELLE ALLUVIONI DEI L'EMILIA-ROMAGNA

- Codifica delle Vulnerabilità
- Caso di studio – Rotta di Via Fratelli Bandiera a Faenza (RA)

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - LESSON LEARNED



LESSON LEARNED



È POSSIBILE IMPARARE DALL'ESPERIENZA DELLE ALLUVIONI PASSATE PER GESTIRE I SISTEMI ARGINALI?



Il «MAGGIO 23» può trasformarsi in uno SPARTIACQUE, come avvenuto negli STATI UNITI nel 2005 con l'Uragano Katrina.

CONCLUSIONI



- Questo set di dati a scala territoriale, suggerisce una chiave di lettura in cui i **fattori di vulnerabilità** influenzano la **probabilità collasso arginale**
- È essenziale analizzare le sezioni arginali come parte di un **sistema**, e non come segmenti isolati.
- Le analisi di vulnerabilità possono essere integrate in un'analisi del rischio finalizzata all'identificazione delle priorità di intervento.....stiamo lavorando per creare dei toolbox in GIS finalizzati ad automatizzare gli screening di primo livello
- Le **analisi numeriche**, sono significative solo se includono **condizioni iniziali** realistiche e la **natura transitoria della sollecitazione idraulica**





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Un grazie ai colleghi che hanno collaborato alla realizzazione di questo studio:

Ilaria Bertolini e Guido Gottardi



La raccolta dati è stata svolta in collaborazione con: ADBPO e Regione Emilia Romagna

... the next step

BEAVER4LIFE Project

CALL: Climate Change Adaptation LIFE-2025-SAP-CLIMA-CCA

✓ Funded by the European Commission

📅 Starting: September 2026

BUDGET: € 4.332.000

MAIN GOAL:

Enhancing climate resilience of flood embankments using rapid screening and decision-support toolbox.



Perchè serve un approccio di screening?

- Solo nel bacino del Po ci sono **6,000 km di argini**
 - Gli argini formano un Sistema di difesa **lineare**
 - *A chain is only as strong as its weakest link*
 - La nostra conoscenza sul loro comportamento è limitata
 - Le risorse per le indagini sono limitate
- ↓
- Difficoltà nell'individuare le **priorità di intervento e manutenzione**



Obiettivo dello screening

Non sostituisce le indagini di dettaglio, ma identifica dove sono più utili

- LEVEL 1
SCREENING

Large scale
Rapid
Cost-effective
Existing data

↓
Output Priority reaches



- LEVEL 2
DETAILED ASSESSMENT

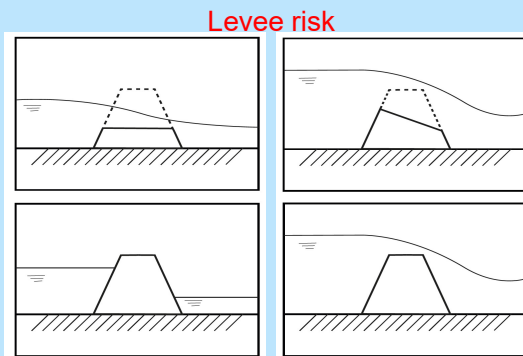
Site investigations
Monitoring
Advanced analyses

↓
Output Mitigation measures

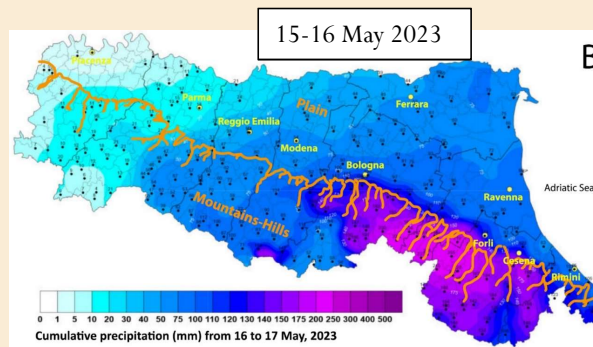
Level 1 answers "Where should we look?" while Level 2 answers "What should we do?"

Vulnerability-based screening methodology

- Is aligned with current levee safety frameworks



- grounded in empirical evidence from extreme flood events



- adopts a system-scale perspective on levee performance



... the next step

BEAVER4LIFE Project

The project takes its **NAME** from the beaver, a **NATURAL ENGINEER** capable of building and maintaining complex hydraulic structures.



... the next step

Key developments:

- ◆ Refinement and validation of the screening strategy on extensive embankment systems
- ◆ Development of a screening Toolbox (vulnerability and mitigation strategies output)
- ◆ It automates the analysis of indices and geometries, which would otherwise have to be performed manually through section analysis in AutoCAD.



... the next step

Consortium:

Coordinating Beneficiary:



Project Partners

University of Bologna



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Michela Marchi, Ilaria
Bertolini, Laura Tonni and
Guido Gottardi

CNR-Irpi



Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

Silvia Barbeta, Tommaso
Moramarco

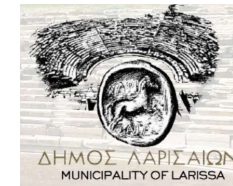
*(Italian National Research Institute
for Hydrogeologic Protection)*

Georisk Engineering LARISSA Municipality



Marco Zei,
Marco Uzielli

*(Spin-off of the
University of Florence)*



KÖTIVIZIG



Közép-Tisza-vidéki
Vízügyi Igazgatóság

Attila Lovas,
Melinda Váci,
György Rátfai