

# The FESOM model family - recent applications

Sven Harig, Andrey Babeyko<sup>(1)</sup>, Antonia Immerz, Natalja Rakowsky,  
Alexey Androsov, Tri Handayani<sup>(2)</sup>

Sergey Danilov, Dmitry Sidorenko, Qiang Wang, Dmitry Sein,  
Claudia Wekerle, Nikolay Koldunov, Vadym Aizinger et al.

Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven

<sup>(1)</sup> Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

<sup>(2)</sup> Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta

IMUM 2017, Stanford, 29 Aug. - 1 Sep. 2017

Donnerstag, 14. April 2016

BREMERHAVEN-SÜD | 15

## Hinter Olli steckt ein Supercomputer

Alfred-Wegener-Institut rüstet sich für die Zukunft: Neuen Hochleistungsrechner angeschafft – Große Hilfe für Wissenschaftler

Von Ursel Kikker

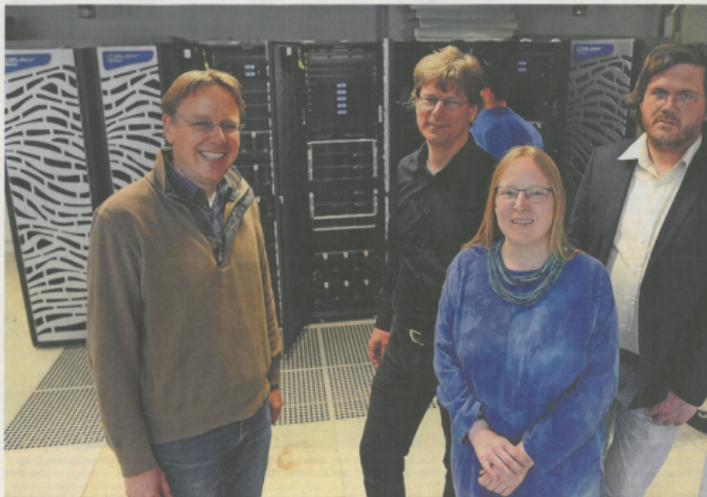
**GEESTEMÜNDE.** Die Komiker Stan Laurel und Oliver Hardy sind die Namensvettern. Der schlanke Stan stand bereits im Rechenzentrum des Alfred-Wegener-Instituts (AWI). Am Mittwoch kam der dicke Olli dazu – ein Supercomputer, der gleich sieben Rechenstrahler ein-eine große Hilfe sein.

So ist die Freude groß im dritten Stock des AWI-Hauptgebäudes. „Damit sind wir gut aufgestellt“, sind sich die Mitarbeiter im Rechenzentrum einig. Dr. Dirk Barbi hat mal auf die Liste der 500 größten Hochleistungsrechner der Welt geguckt. Danach wurde sich Olli aus Bremerhaven etwa auf Platz 270 einreihen.

Bestellt wurde bei dem amerikanischen Unternehmen Cray mit Sitz in Seattle/Washington. Der Supercomputer vom Typ Cray CS400 ist mit 11.232 Rechenkernen ausgestattet. Haushaltsübliche Computer haben gerade einmal ein oder zwei Rechenkerne, bessere Geräte vielleicht vier bis acht. Dazu hat Barbi Intel Xeon Prozessoren der neuesten Generation ausgewählt. „Wir stellen uns darauf ein, dass wir lernen müssen“, sagt Barbi. Doch dafür haben sie eben die neuesten Prozessoren. Das AWI hat auf seiner Internet-Seite die wichtigsten Daten zu Olli aufgelistet. Eine Zahl wie mehr als 400 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde gibt eine leise Ahnung von dem, was „der Dicke“ alles kann.

### Schnellere Berechnungen

„Dieser neue Rechner ist so schnell, dass wir für die Berechnung unserer Tsunami-Simulationen nur noch die Hälfte der bisherigen Zeit brauchen werden“,



Haben gut lachen: Mit dem neuen Hochleistungsrechner, der im Hintergrund aufgestellt wird, können AWI-Mitarbeiter Martin Losch, Malte Thoma, Natalja Rakowsky und Dirk Barbi besser und schneller arbeiten beziehungsweise ihre Kollegen unterstützen. Foto: Scheschka

der AWI-Arbeitsgruppe „Wissenschaftliches Rechnen“. Sie ist eines von vielen AWI-Forschern, deren Arbeitsbedingungen sich durch den Kauf des Hochleistungsrechners deutlich verbessern werden. Mit Hilfe des neuen Systems könnten sie direkt am AWI größere Rechnungen ausführen, zum Beispiel zur arktischen Meeresbedeckung, ergänzt der Klimawissenschaftler Dr. Martin Losch. Dafür mussten sie bisher auf Großrechner in München

Hamburg oder sogar Großbritannien ausweichen. „Das große Problem ist, die Daten dann wieder zurückzukriegen“, sagt Losch. Anders gesagt: Klüffig sparen sie viel Zeit und Nerven. Bislang überschlägt Administrator Malte Thoma grob, müssten sie 80 Prozent ihrer Berechnungen auslagern. Das wird dank des neuen, recht transparent arbeitenden Supercomputers deutlich weniger werden. Die AWI-

projekte mittlerer Größe vollständig am AWI rechnen und größer mit Testläufen vorbereiten. Bei Klima-Rechenmodellen oder der Simulation einer Tsunamiwelle werden oft Datenmengen von zwei Terabyte und mehr erzeugt. Aus diesem Grund hätten sie beim Kauf des Großrechners sehr genau darauf geschaut, dass er mit besonders schnellen Festplatten ausgestattet ist, erläutern die AWI-Mitarbeiter.

Supercomputer kostet drei Millionen Euro, die vom Bundesforschungsministerium sowie den Ländern Bremen, Brandenburg und Schleswig-Holstein finanziert werden. Spätestens im Sommer, wenn alles eingetrahrt ist, soll er allen zeigen, was er kann. Am Mittwoch begannen die Aufbauarbeiten; das Team von Cray wird noch die nächsten Tage in der Stadt sein. Die ersten Nutzer werden Ende Mai mit Olli arbeiten.

### KOMPAKT

Einbrecher

#### Bargeld aus Büro mitgehen lassen

**GEESTEMÜNDE.** Einbrecher haben in der Nacht zu Mittwoch Bargeld aus einem Büro an der Georgstraße erbeutet. Die Täter behielten mit Gewalt ein Toilettenfenster auf, das zum Bürokomplex gehört. Sie kletterten durch das in zwei Metern Höhe gelegene Fenster und durchsuchten die Räumlichkeiten, durchwühlten die Schränke und nahmen das Bargeld mit. Ob sie noch weitere Beute machten, muss noch geklärt werden. Die Polizei (☎ 953444) bittet um Hinweise.

Vorstandswahlen

#### Ludwig Köthe bleibt BTV-Vorsitzender

**GEESTEMÜNDE.** Beim Bremerhavener Tennisverein von 1905 (BTV) standen Vorstandswahlen an. Ludwig Köthe wurde dabei als 1. Vorsitzender, Dr. Esko Unger als Sportwart, Andreas Seitz als 1. Jugendwart und Walter Hissenkemper als 1. Beisitzer wiedergewählt. Mit Glenn Schmitzler (2. Sportwart) und Gaby Jung (2. Beisitzerin) erklärten sich zudem zwei „Neulinge“ zur Mitarbeit im Vorstand bereit. Rita Wulff übernimmt kommissarisch für ein Jahr das Kasernenamt.

Israel-Bilder

#### Frauenbund lädt zum Vortrag ein

**GEESTEMÜNDE.** Einen Lichtbildervortrag über das heutige Israel hält Pastor Michael Großel von der Petruskirche beim Montagstreffen des Deutschen Evangelischen Frauenbundes, Ortsverband Bremerhaven. Die Veranstaltung beginnt am Montag, 18. April, um 15 Uhr im Gemeindeforum der Kirche, An der sind ohne An- HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT

## FESOM

- FESOM1.4, FESOM2.0
- Performance
- Examples

## TsunAWI

- TsunAWI scenarios for the Indonesia Tsunami Warning System
- Comparison with EasyWave (regular mesh, near real time)

## **FESOM1.4** – finite element dynamical core

- Horizontal mesh: Triangular unstructured,
- Vertical: Prisms or tetrahedra,
- Working horse.

## **FESOM2.0** – finite volume dynamical core

- Ready and working, focus on model physics,
- Optimized data structure: vertical as first dimension allows for direct memory access,
- Less resources for same throughput,
- Different placement of velocities (node  $\rightarrow$  edge),
- Same meshes (vertical: prisms), input, sea ice component.

# FESOM - Performance compared



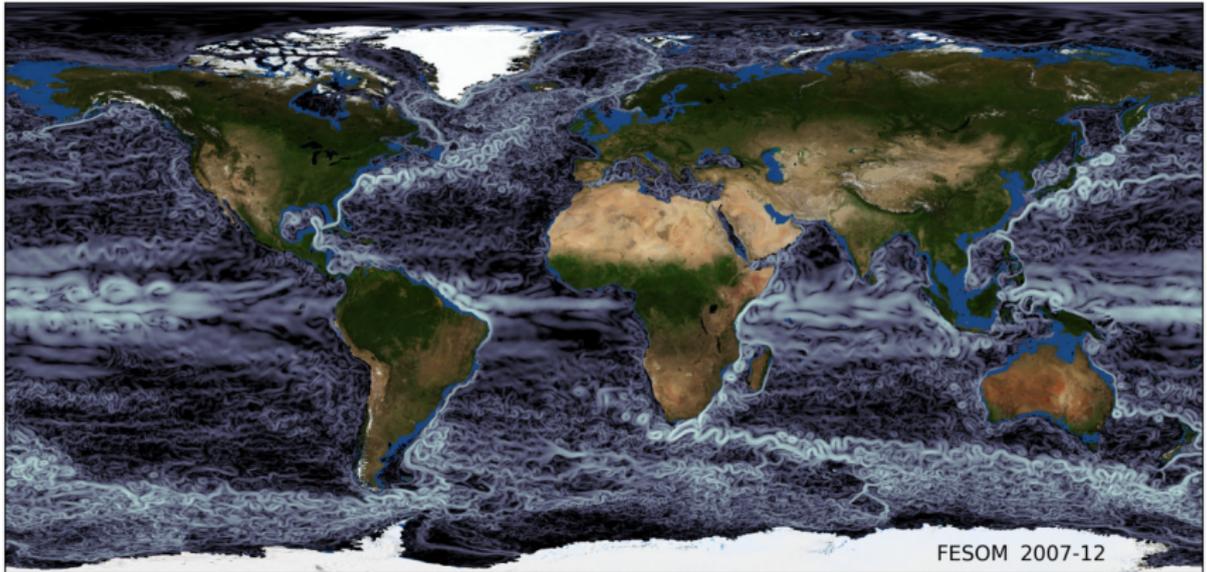
Model, Setup	SYPD	#Cores	time step
NEMO (1/4) <sup>o</sup> 1M wet nodes	≈6	800	1440s - 1080s
NEMO (1/12) <sup>o</sup> 9M wet nodes	≈2	3.500	360s - 240s
NEMO (1/16) <sup>o</sup>	≈0.8	3.500	200s
STORM MPI-OM 5.6M wet nodes	≈2	2.000	n/a
FESOM1.4, 1.3M nodes down to 8km res.	≈6	2.400	600s
FESOM1.4, 5M nodes down to 4km res.	≈2	7.200	300s
FESOM2.0, 2M nodes 15km uniform	≈18	1728	1.200s
FESOM2.0, 6M nodes down to 4km res.	≈1.5	1728	60s

- **CORE-II intercomparison project:** FESOM1.4 shows very good behaviour for meshes used in climate studies,
- FESOM1.4 is not slower than structured codes, but needs more resources,
- For the same number of nodes, we gain resolution where it is needed,
- FESOM1.4 and FESOM2.0 scale well,
- FESOM2.0 performance is competitive to codes on structured meshes.

# FESOM1.4: PRIMAVERA project

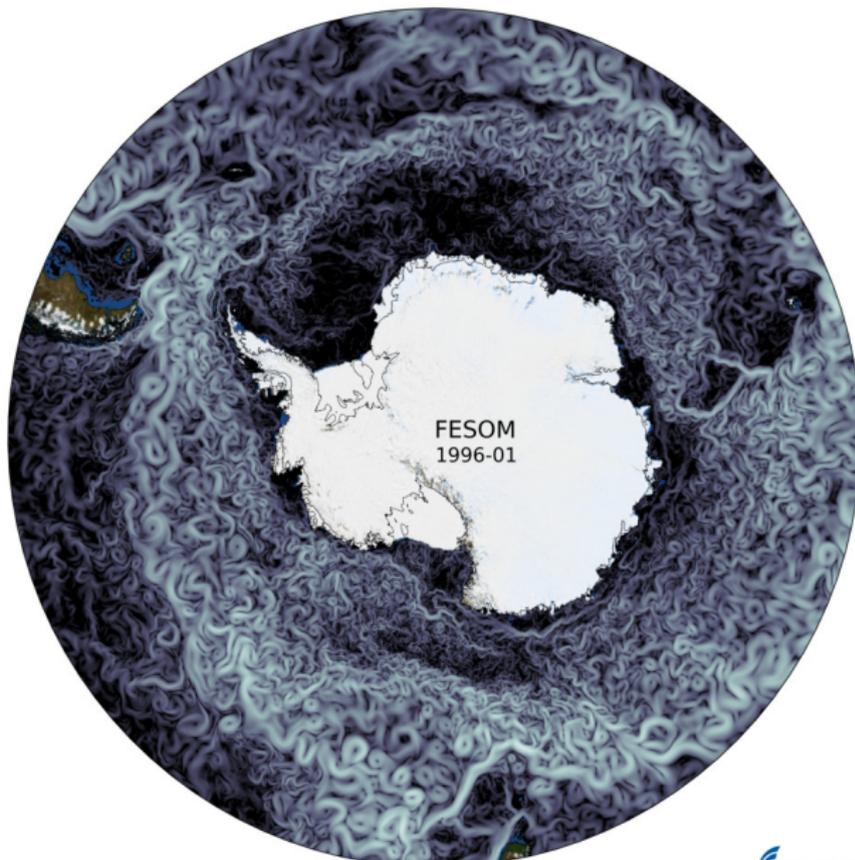


Velocity field at 100m depth. All images by N. Koldunov.

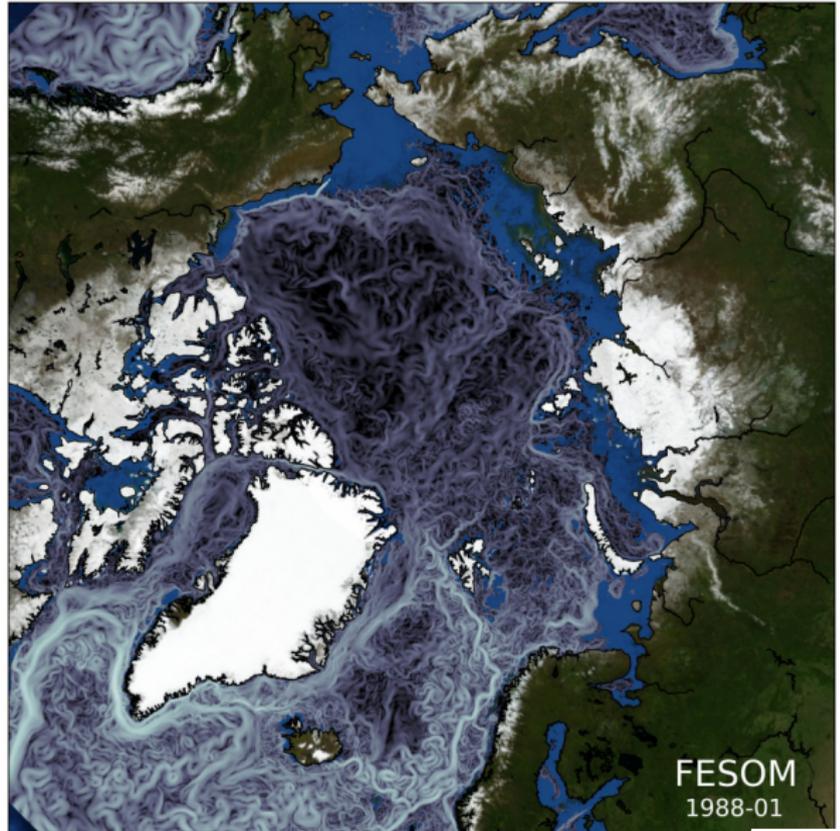


Eddie resolving mesh (Sein et al., 2016), 8km - 60km res.,  
1.3M 2D-nodes, 40M 3D, 6SYPD coupled FESOM1.4+ECHAM6.

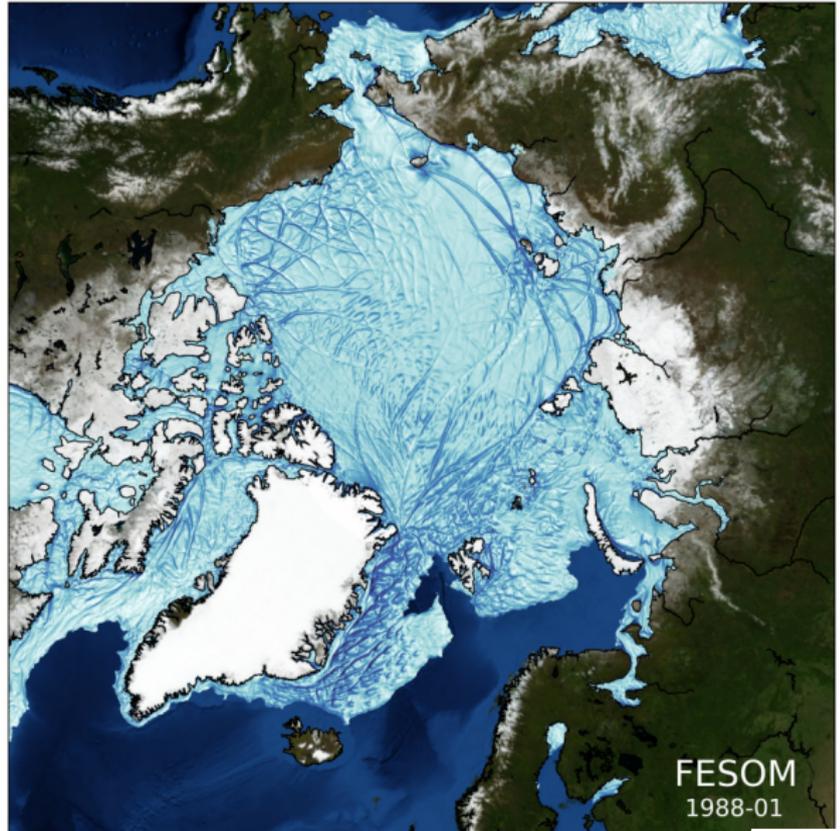
Velocity field at 100m  
Antarctica



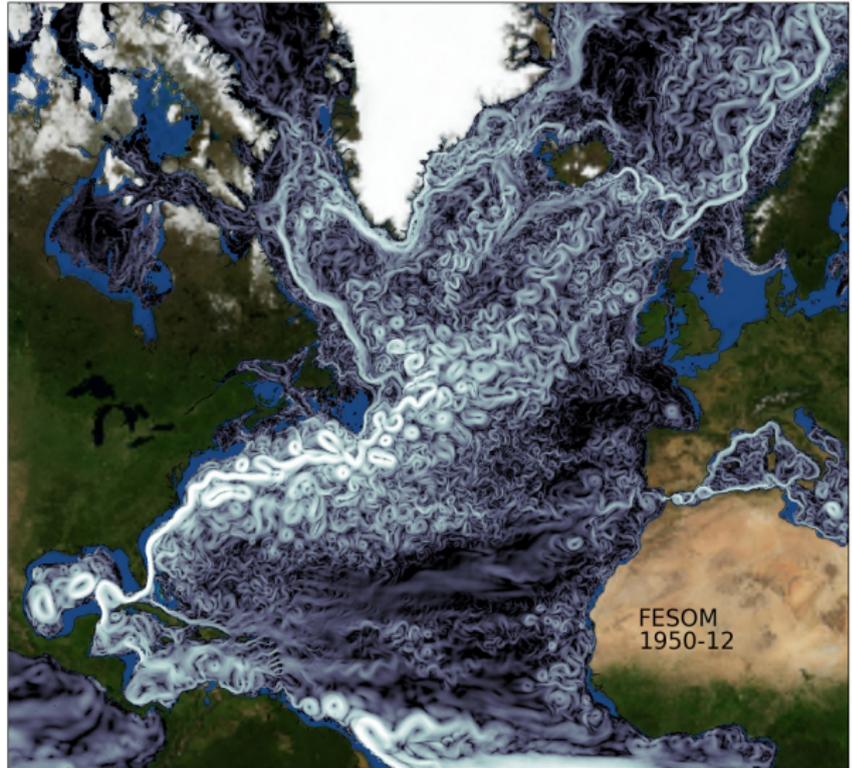
Velocity field at 100m  
Arctic



See ice  
in the Arctic

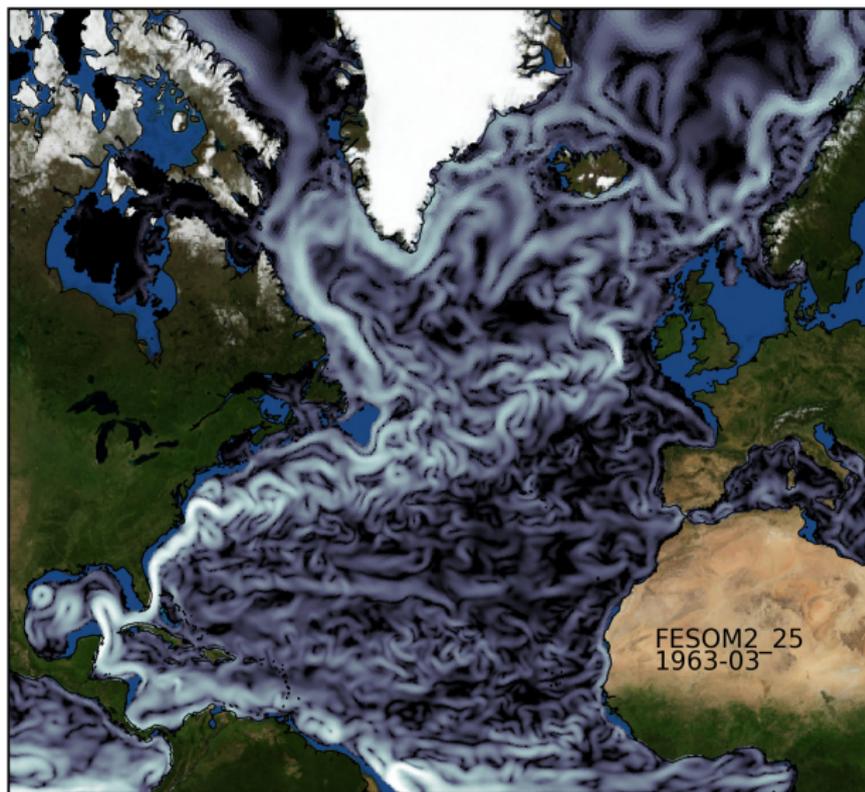


Velocity field at 100m  
North Atlantic



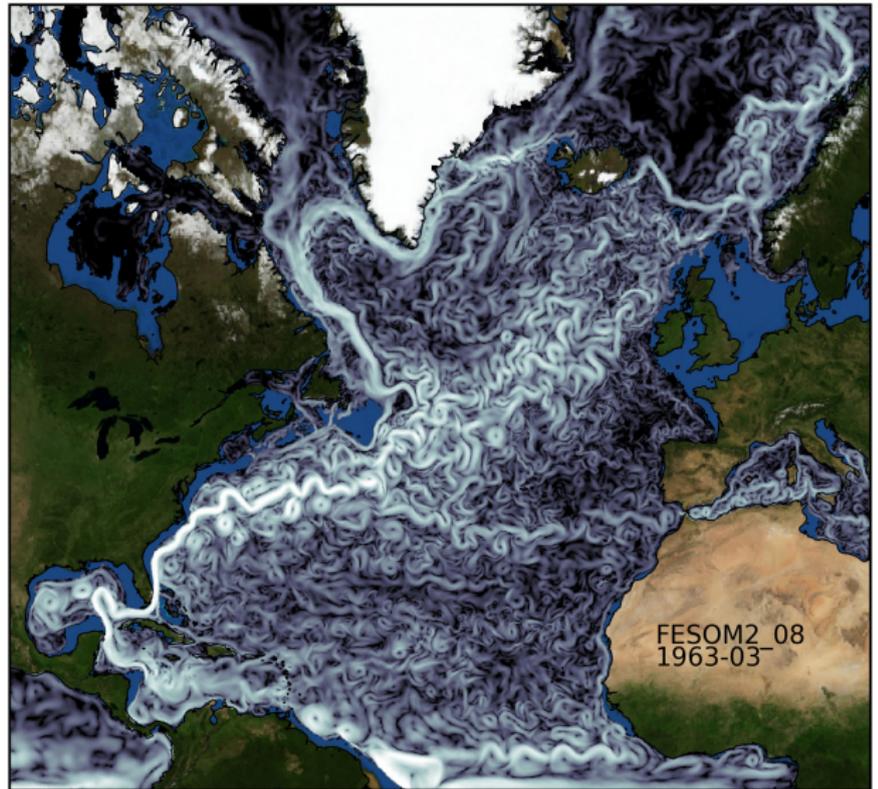
# FESOM2.0 Example

Velocity field at 100m  
North Atlantic  
max. resolution 25km



# FESOM2.0 Example

Velocity field at 100m  
North Atlantic  
max. resolution 8km



# FESOM2.0 Example

Velocity field at 100m  
North Atlantic  
max. resolution 4km



FESOM2.0 basis configuration is ready and running. We work on

- Arbitrary Lagrangian Eulerian vertical coordinates
- Transport algorithms with reduced spurious mixing
- Vertical transport algorithms with increased stability
- Vertical mixing parameterizations
- Mixed meshes (quads and triangles)
- Optimization of code and parallelization
  - Care for vectorized inner loops (vertical)
  - Better load balancing (2D, 3D, sea ice nodes)
  - Optimized MPI communication pattern (hierarchical partitioning)
  - Asynchronous MPI
  - Parallel asynchronous I/O

Please check

`www.fesom.de`

for images, videos, information on ongoing projects and more.

# GITEWS Timeline



## German-Indonesian Tsunami Early Warning System



2005-2011 GITEWS project funded by BMBF

Nov. 2008 Inauguration

March 2011 Transfer of Ownership to Indonesia

2011-2014 PROTECTS – PROject for Training, Education and Consulting for Tsunami early warning Systems, BMBF

2014-... Support contract

2015-2017 Cooperation with Indonesia, funded by Australia



UNITED NATIONS  
UNIVERSITY

...



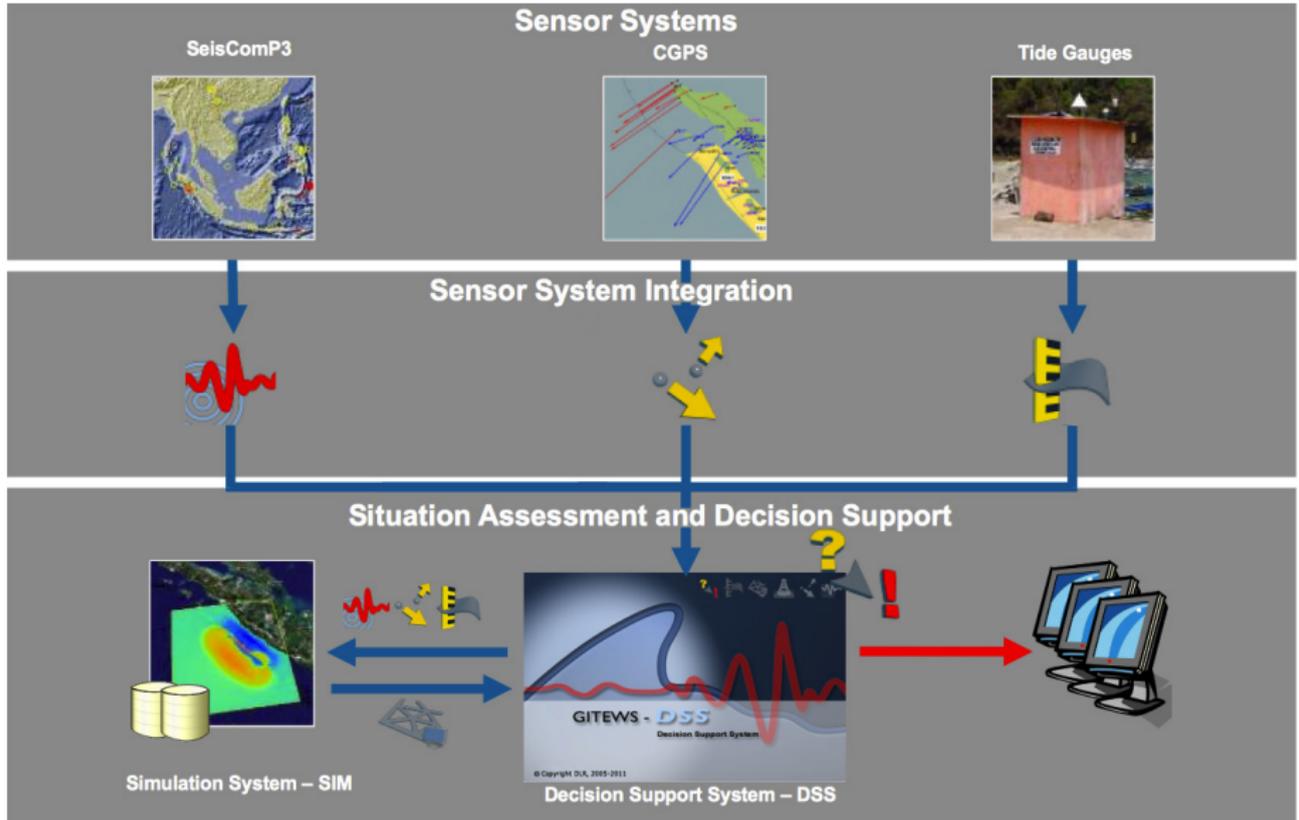
# GITEWS System Overview



Warning Center Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Jakarta

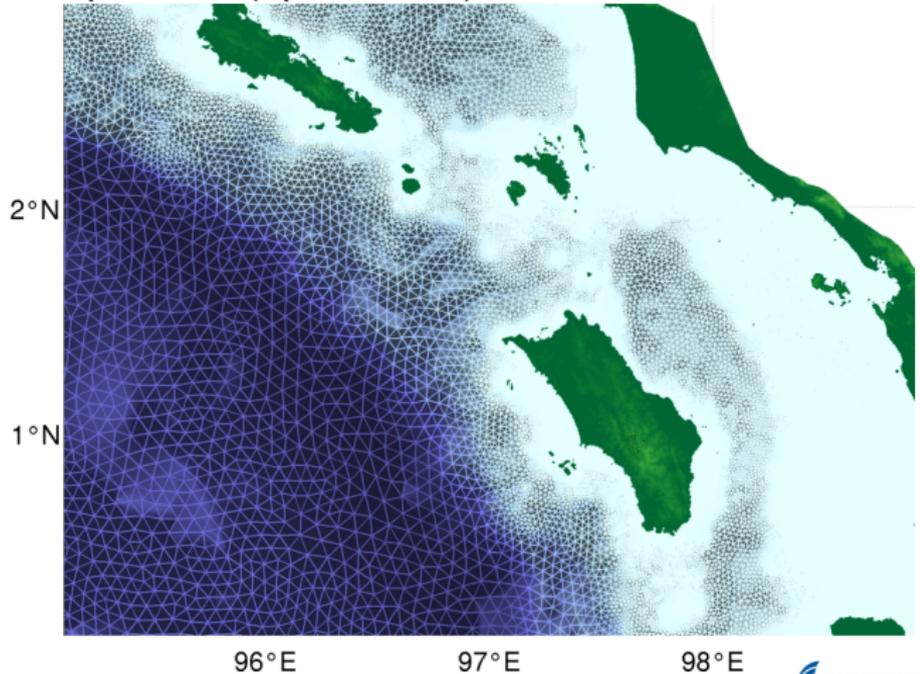


# GITEWS System Overview

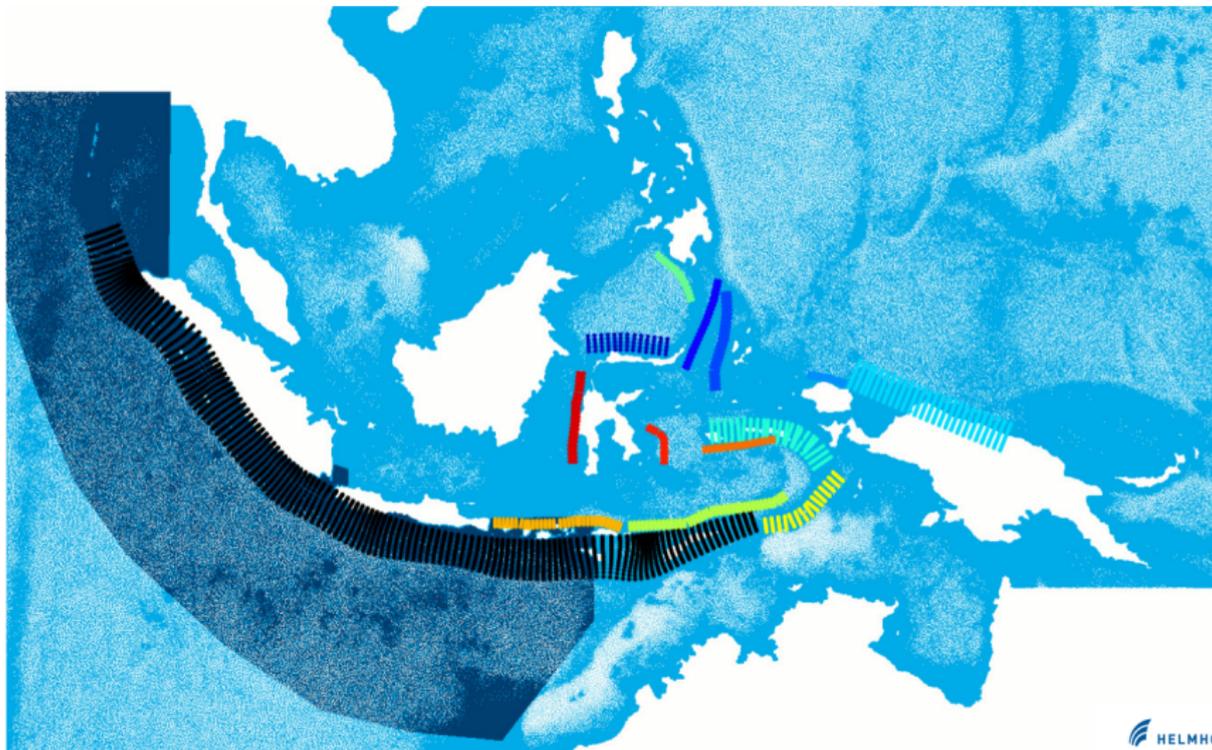


The computational domain reflects the characteristics of tsunamis:  
 Small triangles (50m-200m) at the coast,  
 large triangles in the deep ocean (up to 25km).

$$\Delta x \approx \min \left( \frac{C_{CFL}}{\sqrt{gH}}, \frac{C_{bathy}}{|\nabla H|} \right)$$



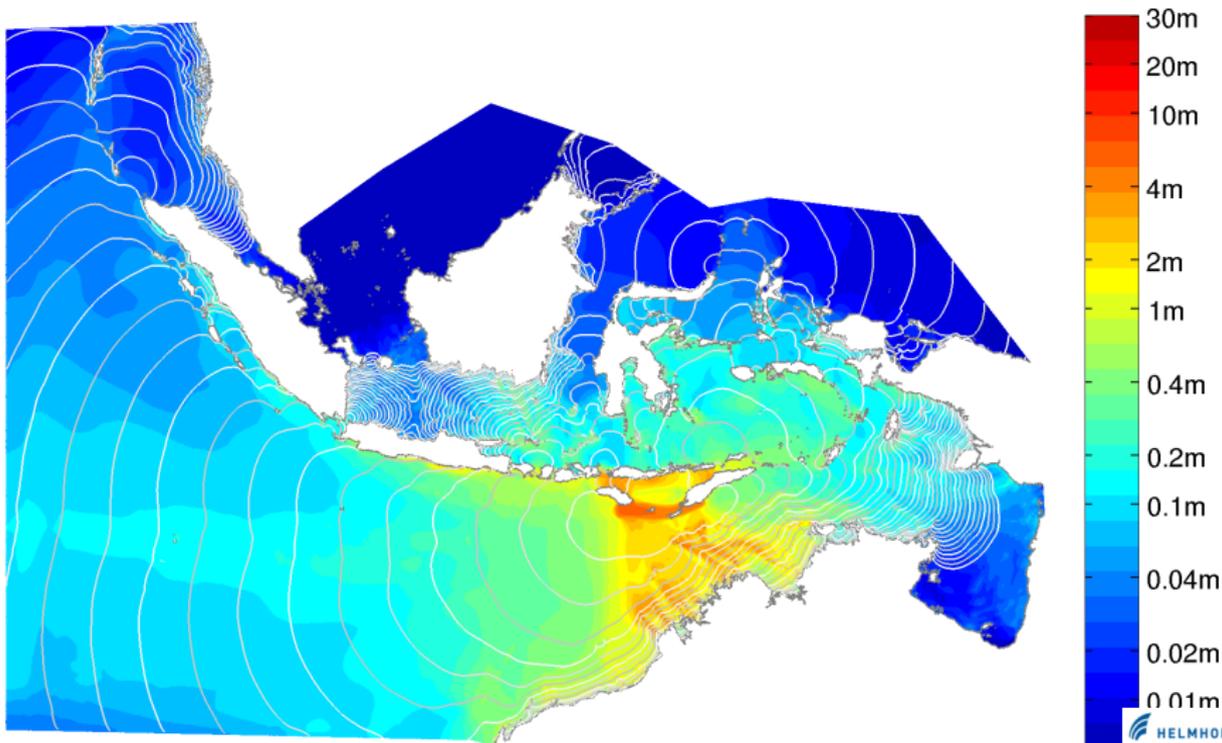
Model domain and epicenters for scenario database  
computed in 2011 and extended in 2013, 2017



# Scenario data products

## ETA isochrones and maximum amplitude

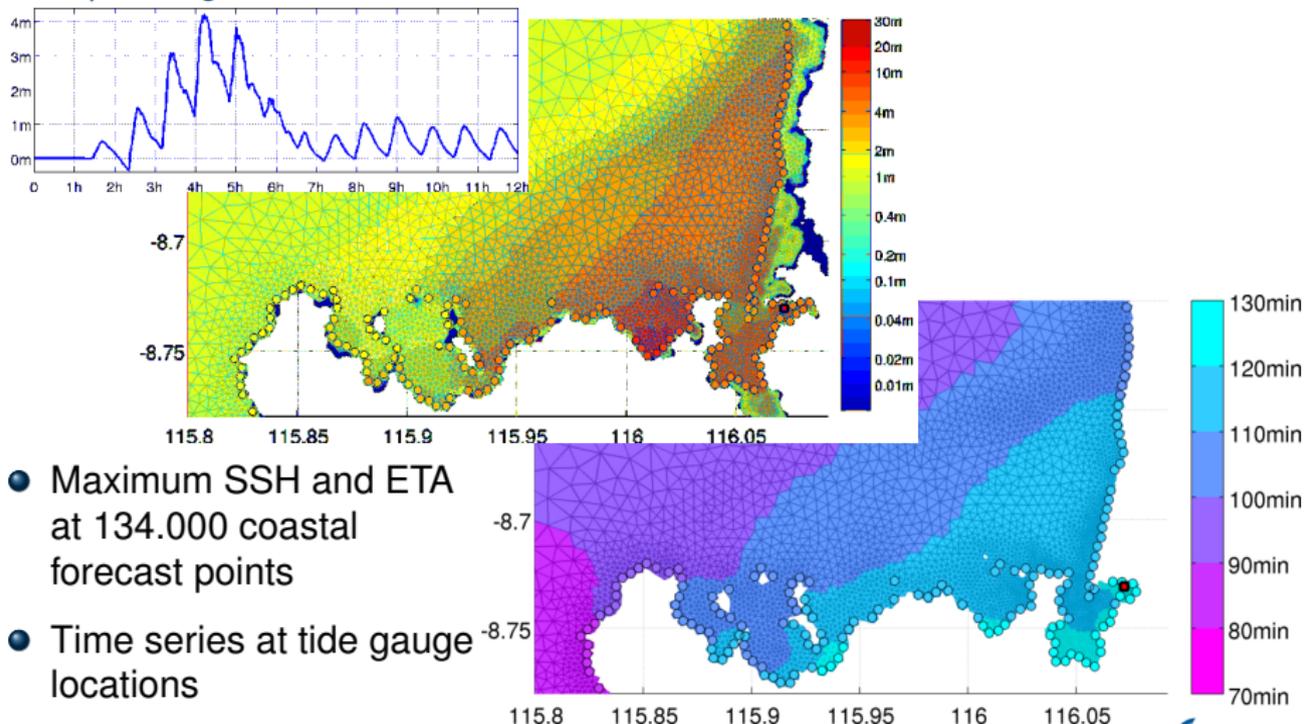
Example: Magnitude 9.0 in the Eastern Sunda Arc



# Scenario data products

## Coastal forecast points

Example: Magnitude 9.0 in the Eastern Sunda Arc, zoom to Lembar, Eastern Lombok





# Comparison of modeling approaches and the resulting warning products in the framework of the Indonesia Tsunami Early Warning System (InaTEWS)

Sven Harig<sup>1</sup>, Andrey Babeyko<sup>2</sup>, Antonia Immerz<sup>1</sup>

Natalja Rakowsky<sup>1</sup> and Tri Handayani<sup>3</sup>

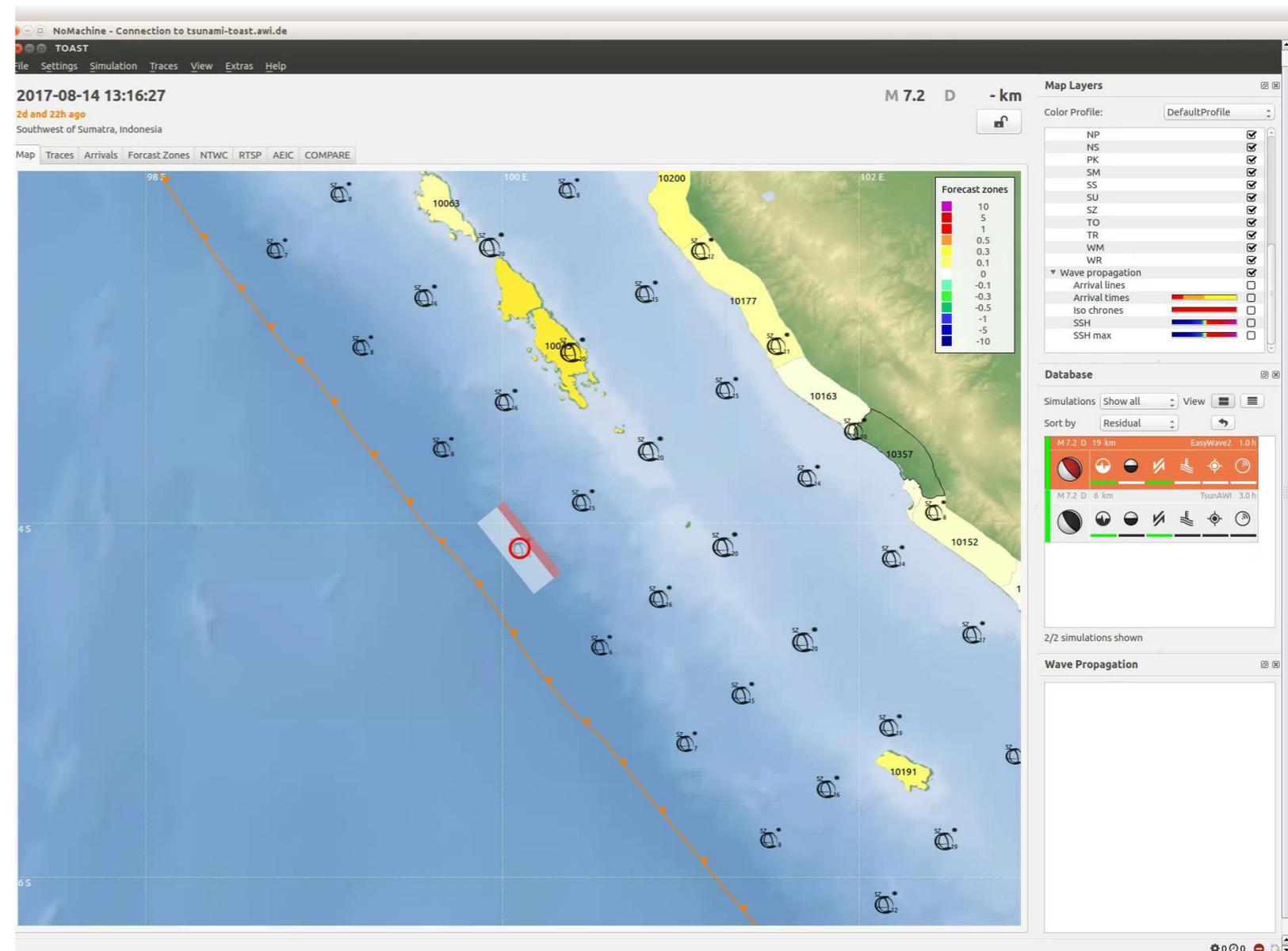
<sup>1</sup>Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

<sup>2</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

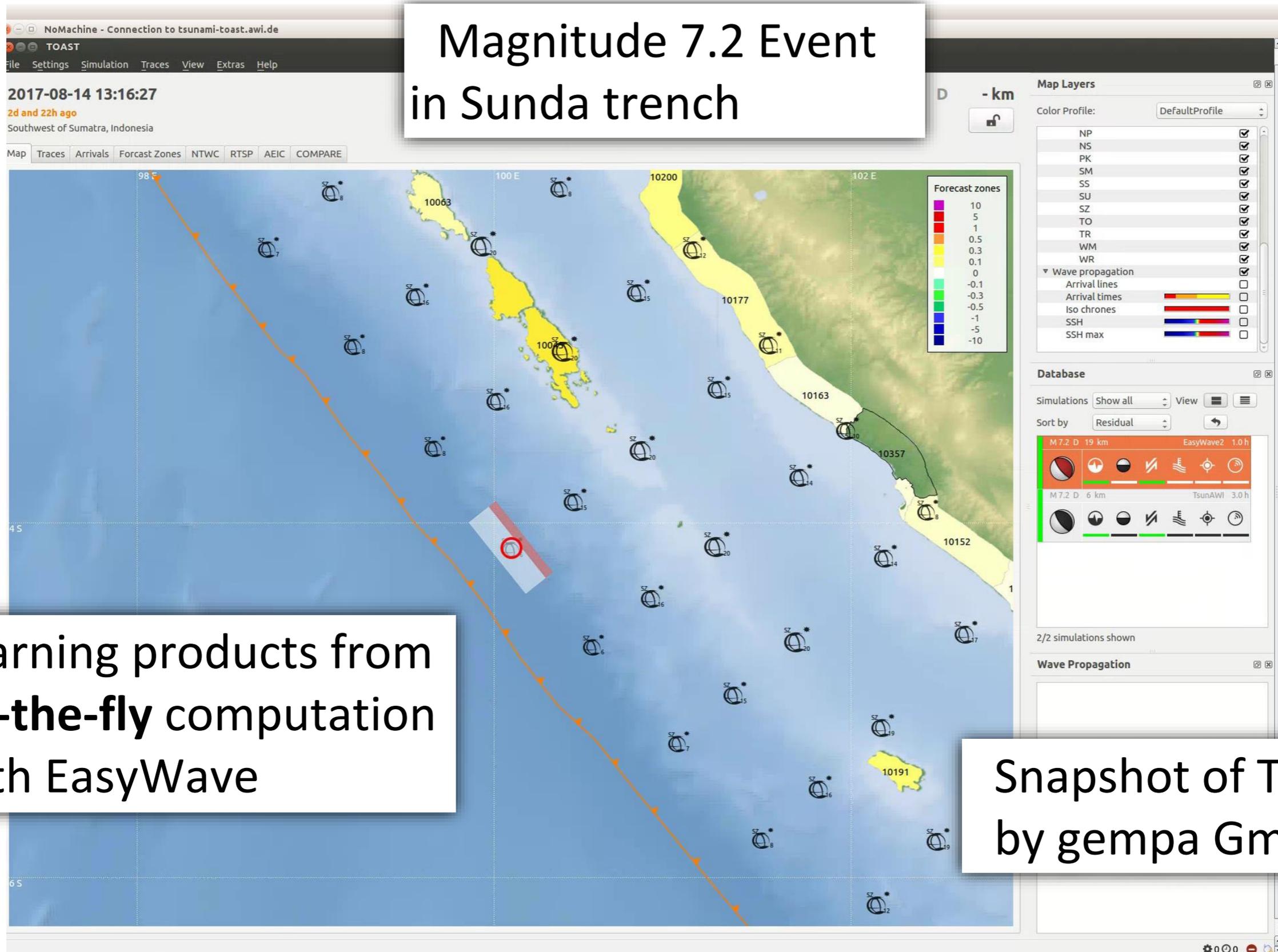
<sup>3</sup>Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics (BMKG), Jakarta, Indonesia



- Tsunami Early Warning Systems determine and disseminate
  - Estimated wave height (EWH)
  - Estimated arrival time (ETA)
- Warning is basis of e.g., evacuation of the potentially affected population
- Quality of the warning is of crucial importance
- All components of the Warning system need constant attention and improvement.



Magnitude 7.2 Event  
in Sunda trench



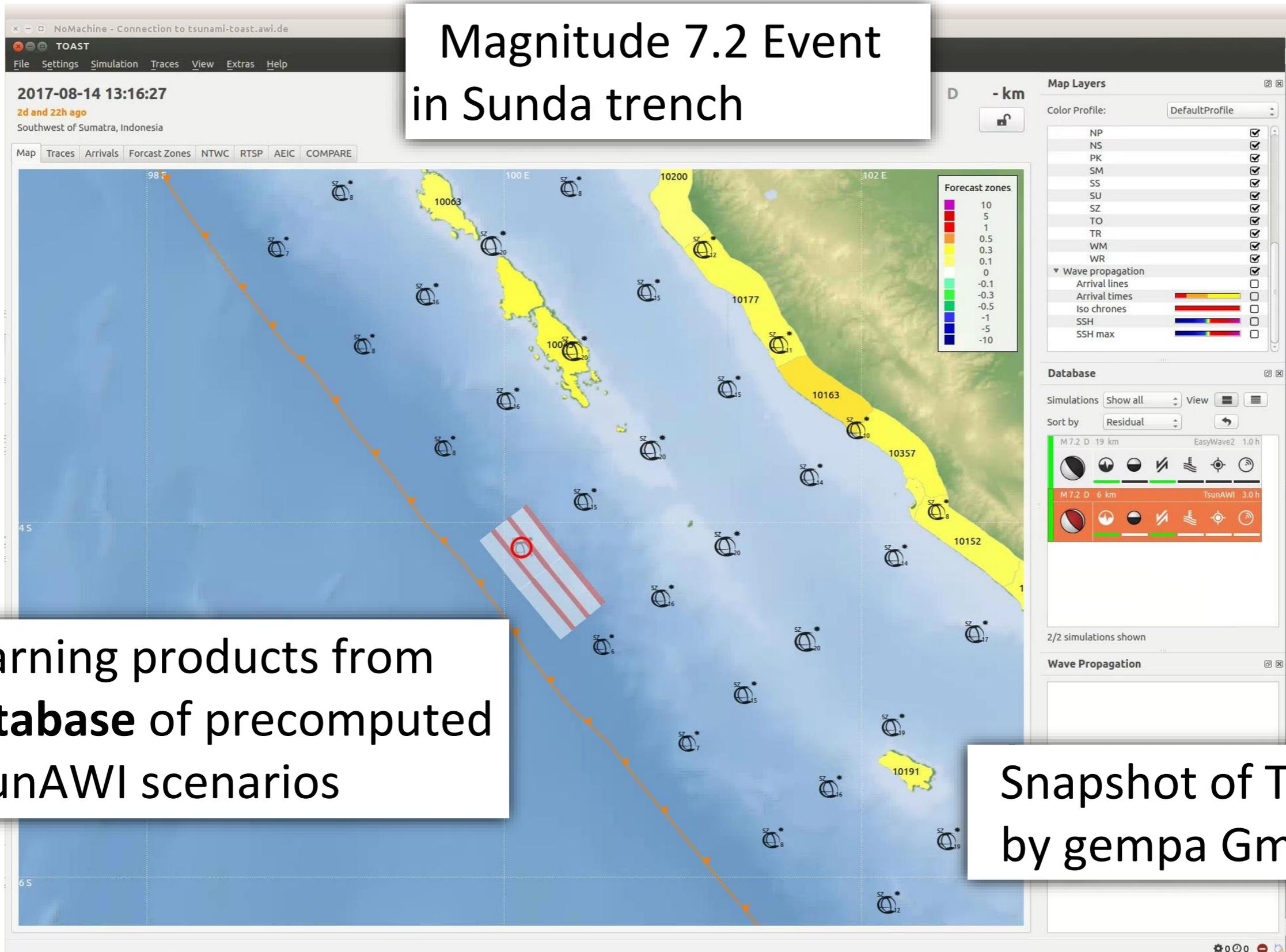
Warning products from  
**on-the-fly** computation  
with EasyWave

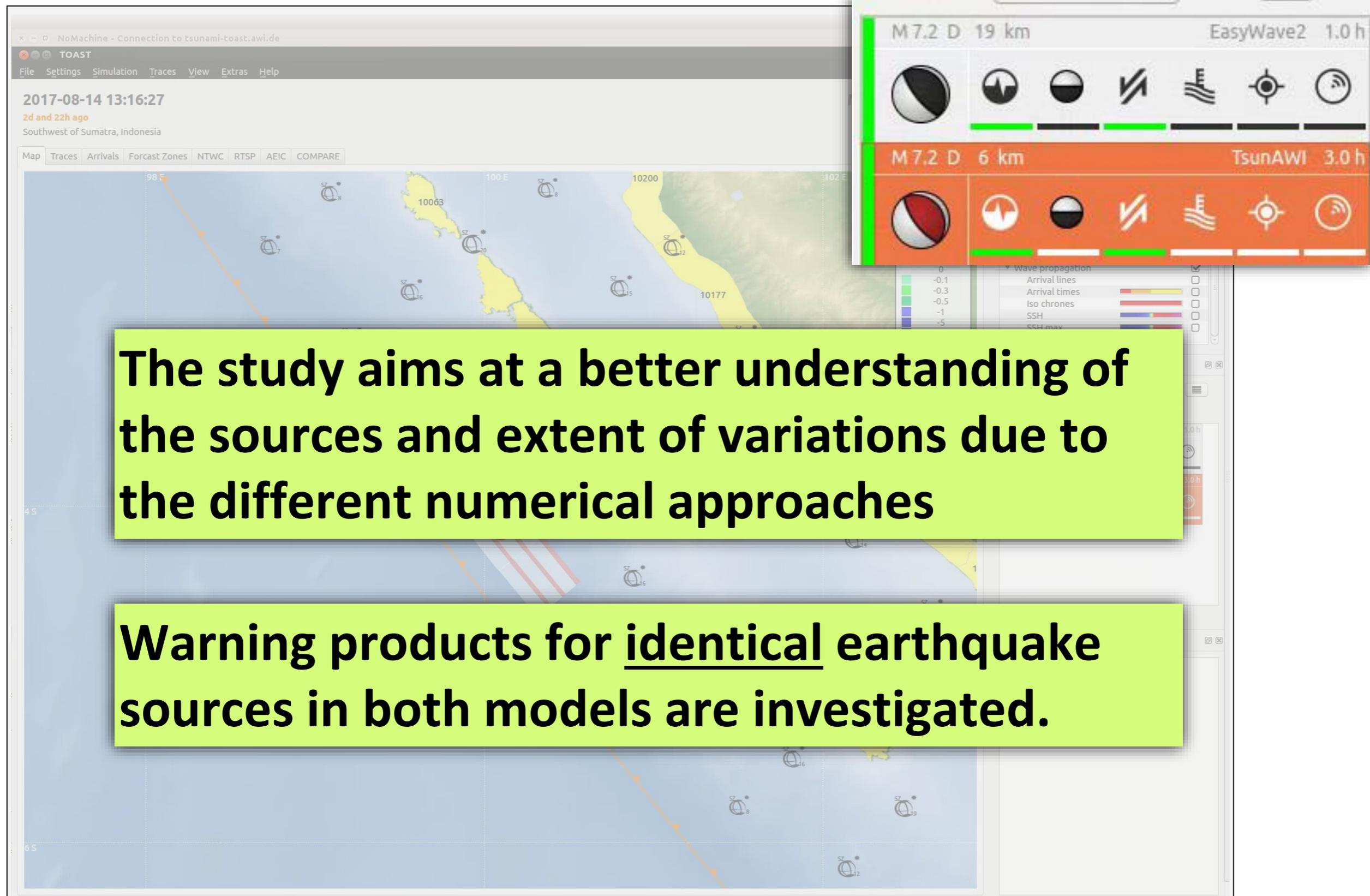
Snapshot of TOAST  
by gempa GmbH

Magnitude 7.2 Event  
in Sunda trench

Warning products from  
**database** of precomputed  
TsunAWI scenarios

Snapshot of TOAST  
by gempa GmbH





**The study aims at a better understanding of the sources and extent of variations due to the different numerical approaches**

**Warning products for identical earthquake sources in both models are investigated.**

# The model components in InaTEWS



	EasyWave	TsunAWI
Developer	Andrey Babeyko at GFZ within GITEWS	At AWI within GITEWS branch of FESOM1.4
Governing equations	Linear SWE	Nonlinear SWE
Spacial discretization	Finite differences	Finite elements (triangles)
Resolution	Regular mesh, 30 arc seconds.	10 km in the deep ocean, 250 m in coastal regions, 50 m at gauge locations & priority areas.
Inundation	Coast line as boundary wall, Estimate of run up available	Inundation scheme included
Time stepping	explicit, typically 10s	explicit, typically 1s
Implementation	Use of GPUs possible	OpenMP parallel
Time for scenario calculation (12h integration time)	~5 min (6 million nodes) on 1 core Xeon Broadwell	~6h (11 million nodes) on 18 cores Xeon Broadwell

## EasyWave

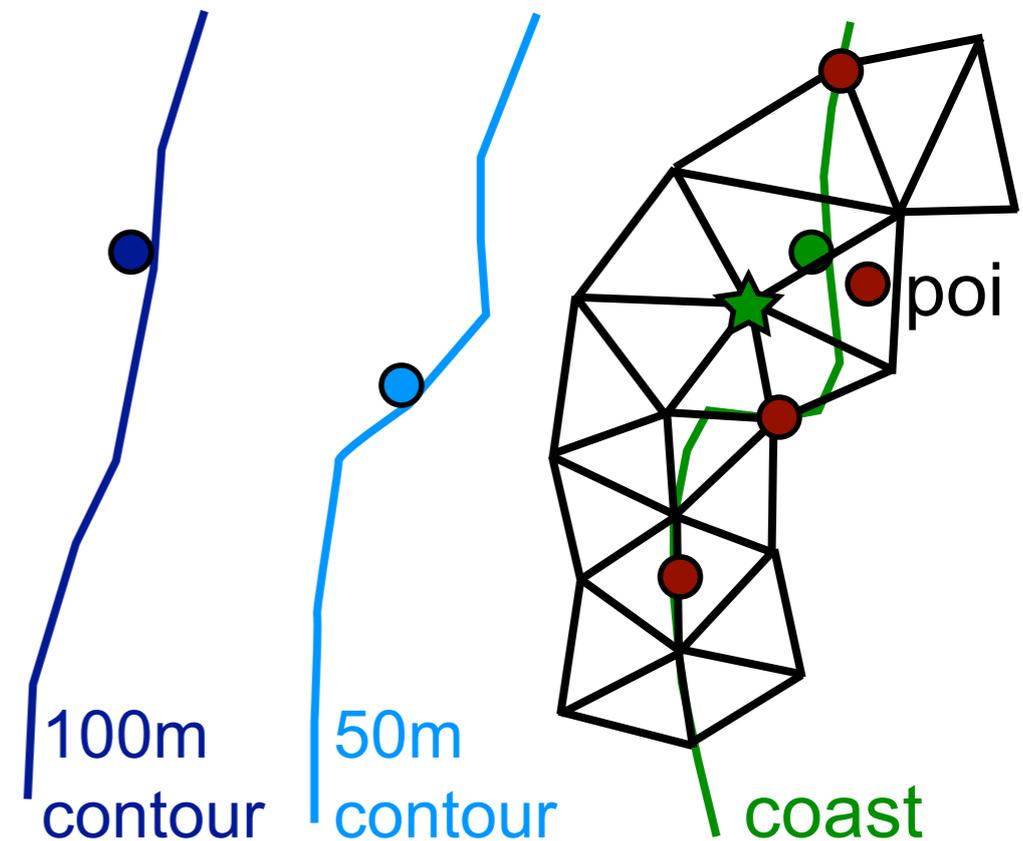
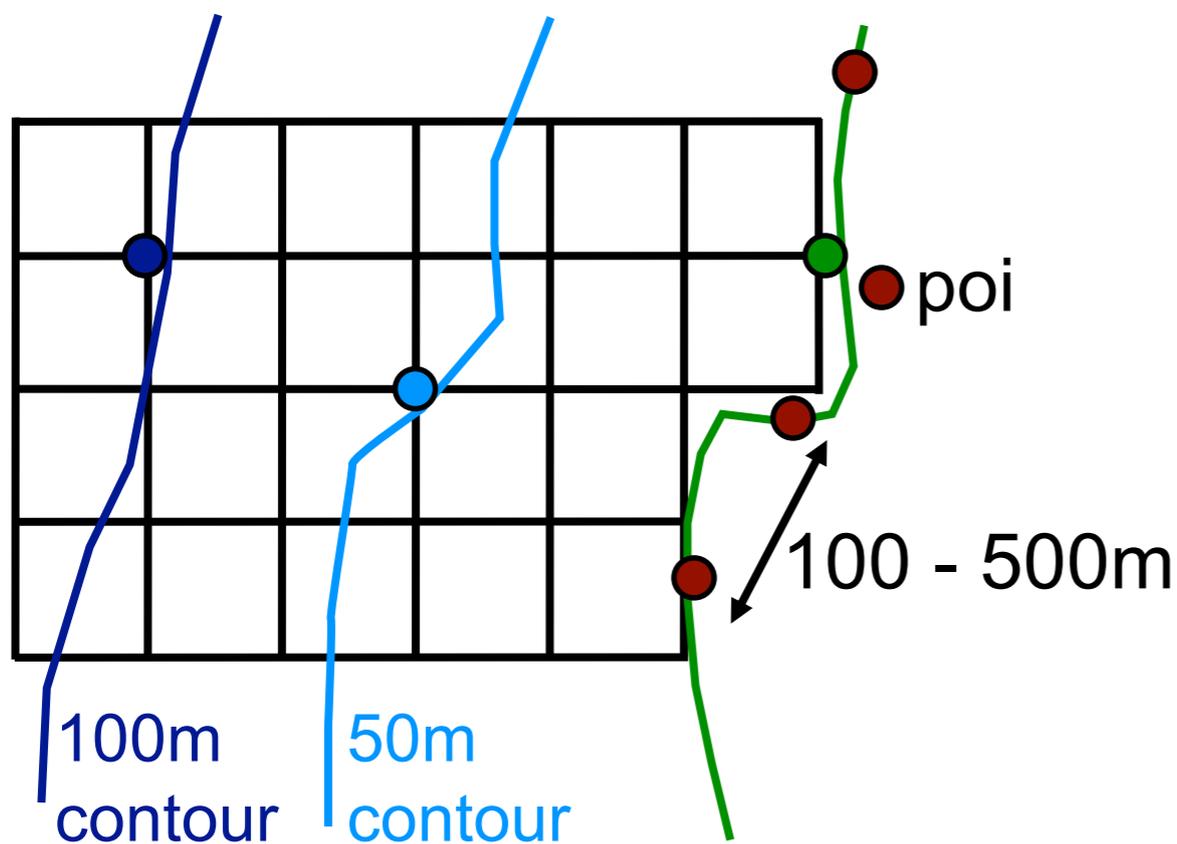
## TsunAWI

**Warning products:  
Determined by  
aggregation over  
model results in Points  
of Interest (POIs) along  
the coast**

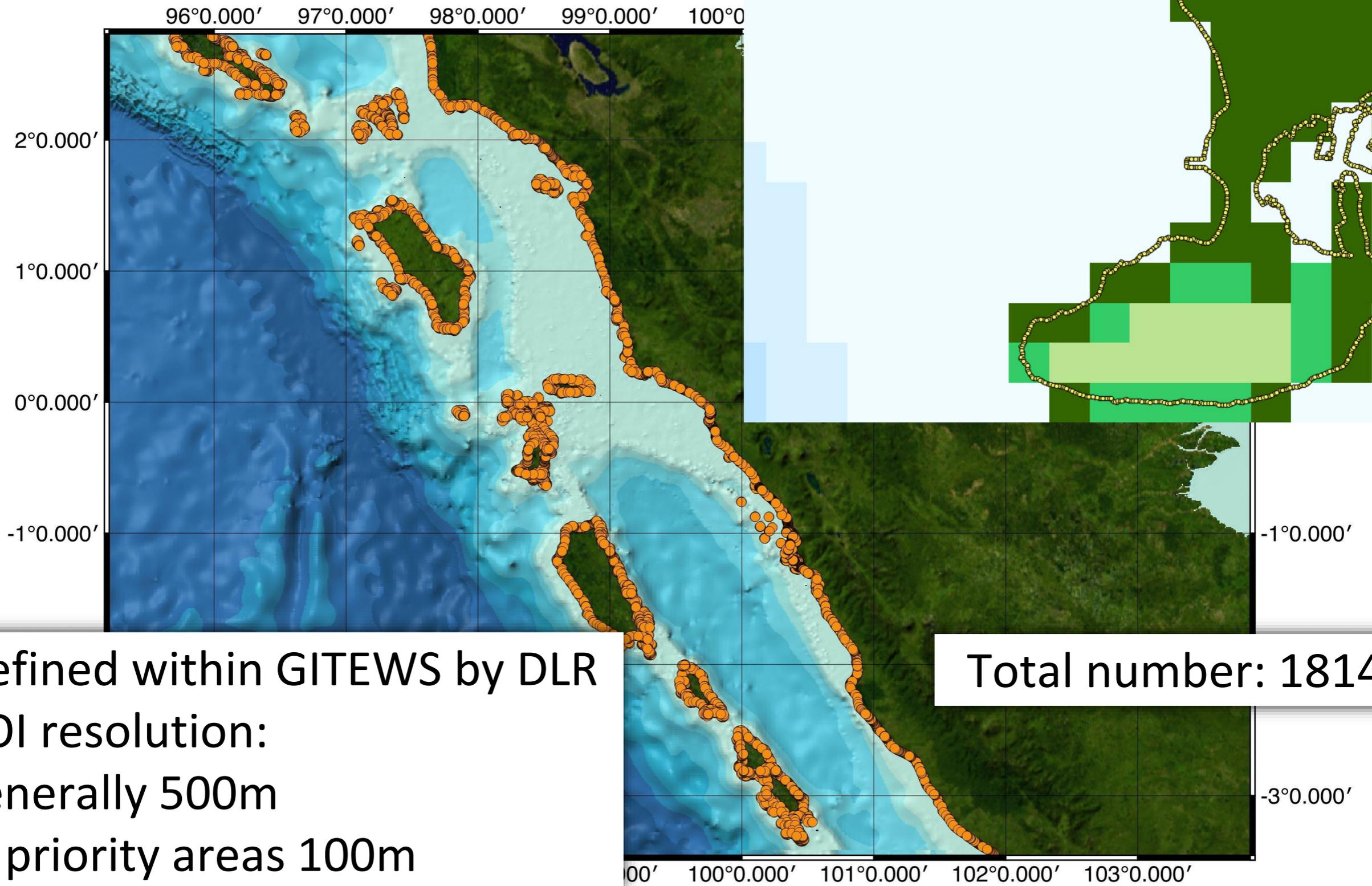
Options:

- Calculations to nearest coast point, or
- Calculation to given water depth and projection (Green's law)

Mesh covers coastal area up to terrain height of ~50m. Direct calculation of wave height in POIs



# Points of interest (POIs)

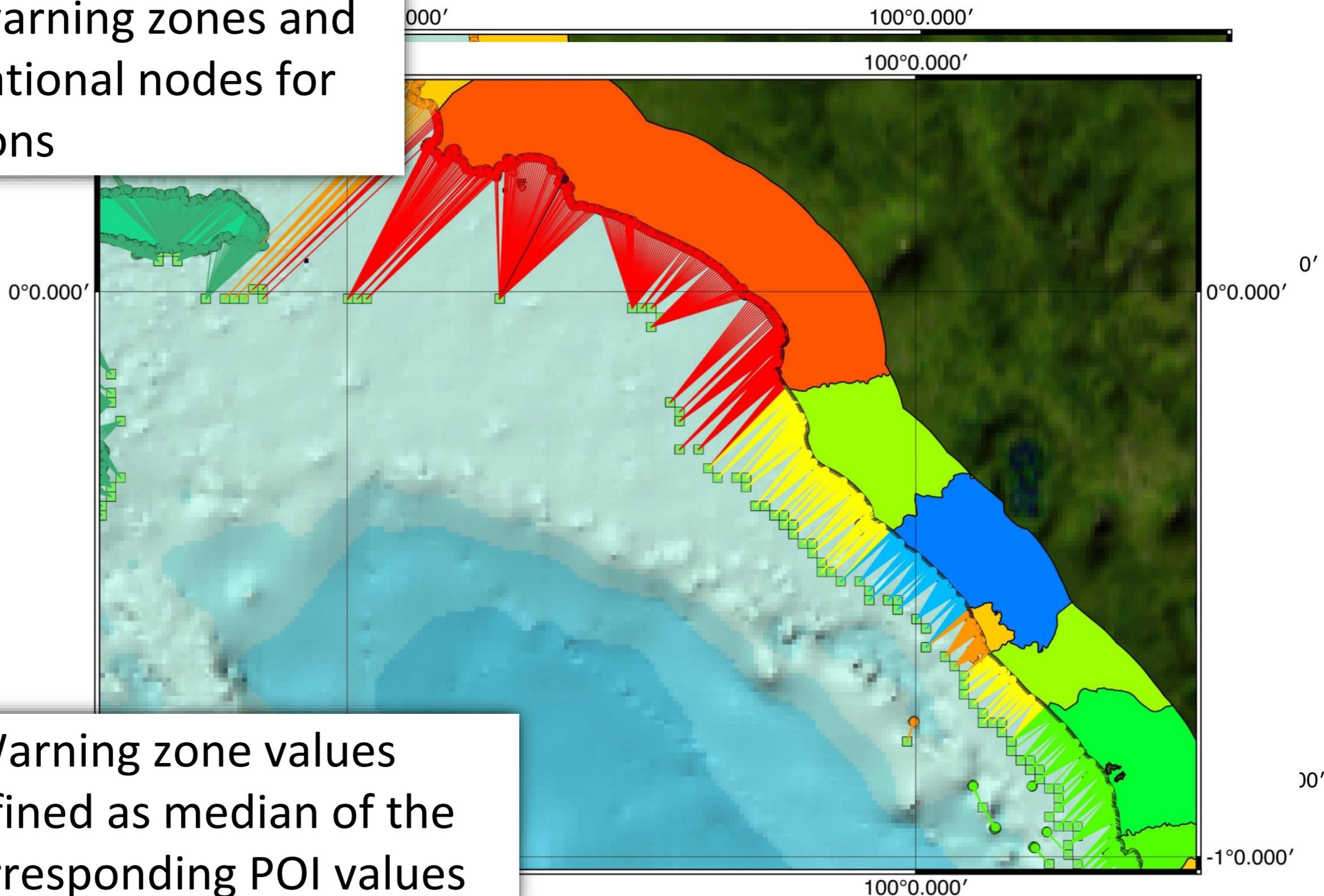


Defined within GITEWS by DLR  
POI resolution:  
generally 500m  
in priority areas 100m

Total number: 181459

# Warning zones and POIs

POIs, warning zones and computational nodes for projections



- Model resolution, boundary conditions
- **Topography**
  - easyWave: ETOPO or GEBCO
  - TsunAWI: GEBCO augmented by additional datasets (tcarta, SRTM, some local measurements)
- **Governing equations:** Additional terms in TsunAWI
  - Advection
  - Viscosity
  - Bottom friction
  - Coriolis force
- Determination of warning products:  
direct calculation vs. projection

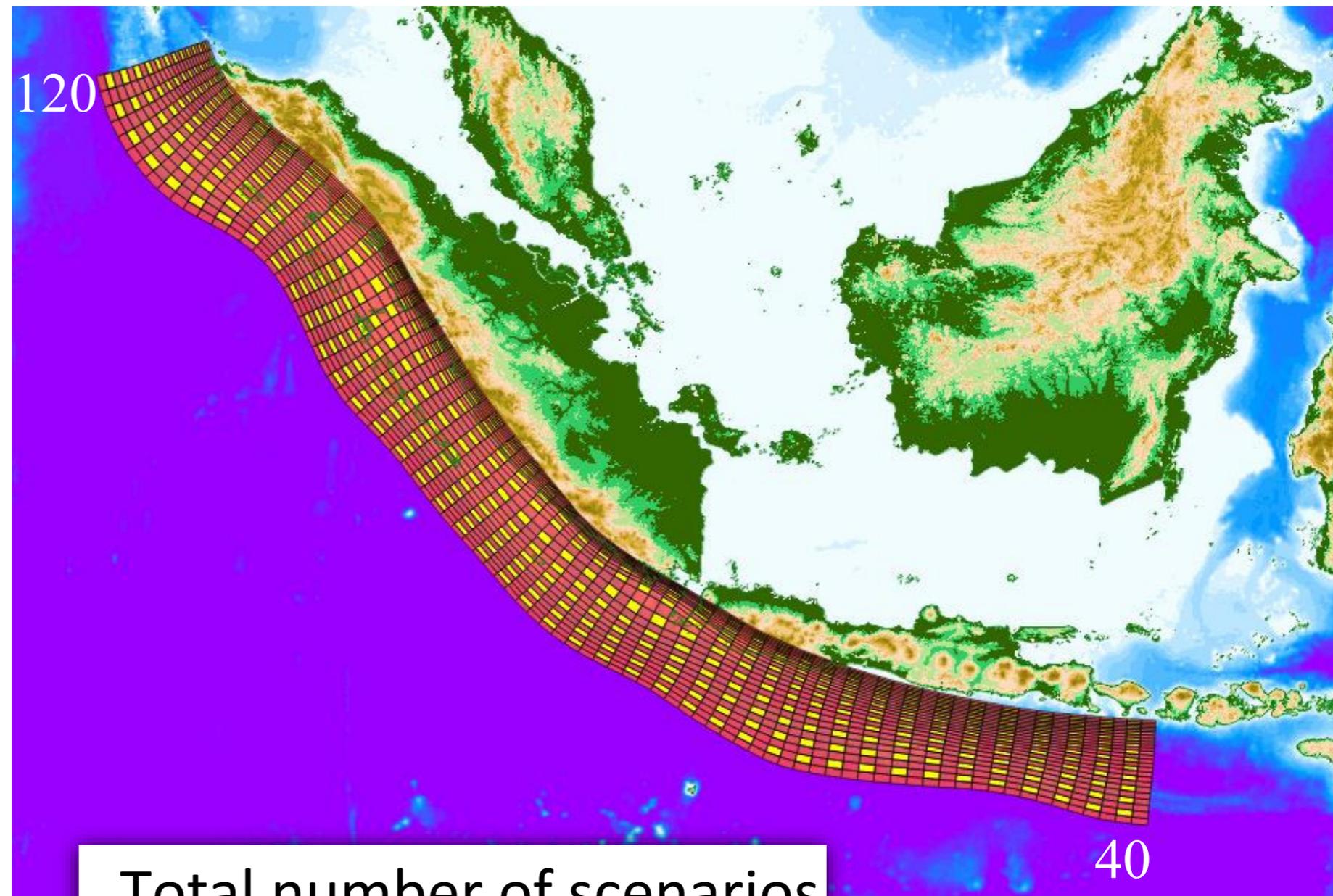
G08

G08MOD

small impact in deep ocean,  
more important close to the  
coast

Central patches of the scenarios involved in the study

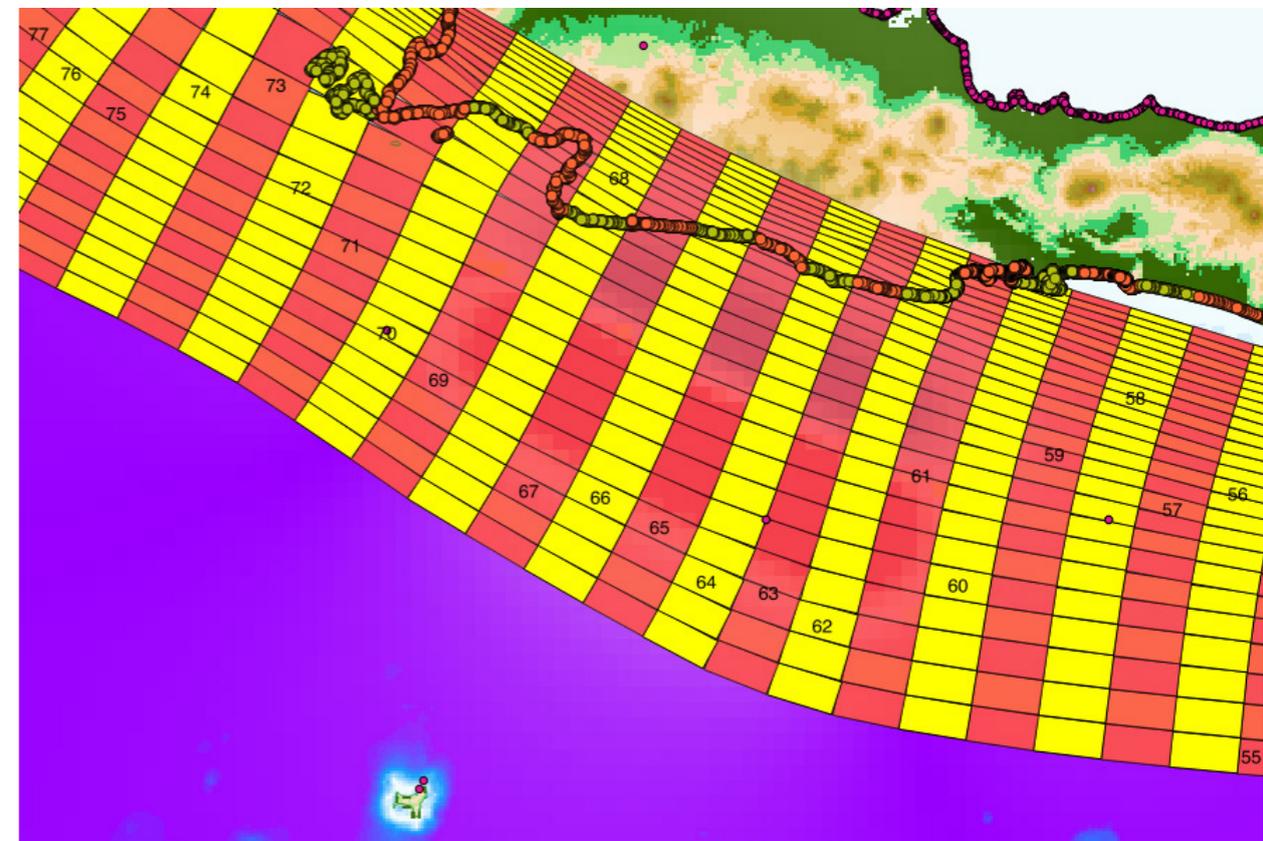
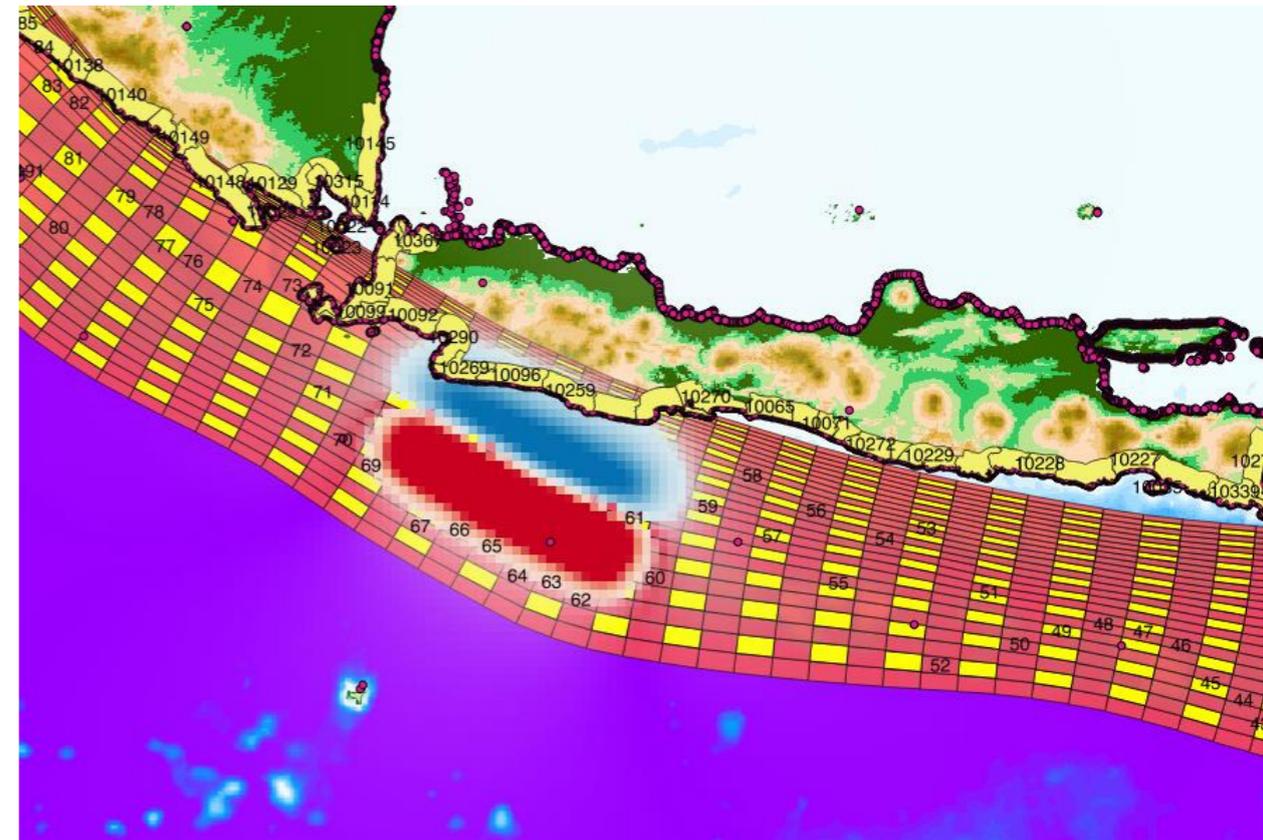
Magnitude	total nmb
7.0	497
7.2	495
7.4	486
7.6	454
7.8	412
8.0	273
8.2	326
8.4	271
8.6	214
8.8	142
9.0	66
<b>Sum</b>	<b>3636</b>

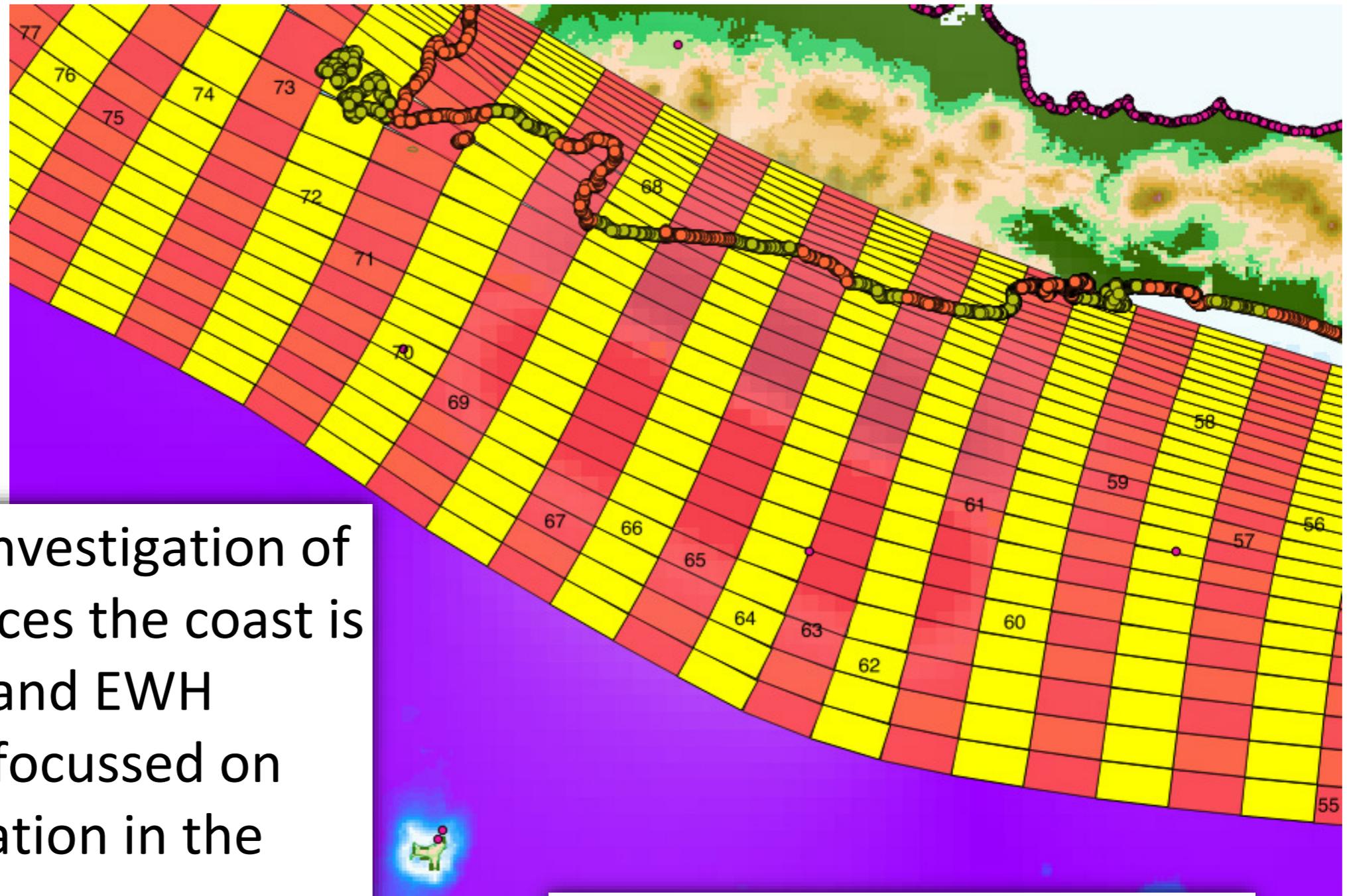


Total number of scenarios in the comparison: 3636

## Model configurations:

- TsunAWI (bathy. G08MOD)
- easyWave
  - Calc. to coast (G08)
  - Calc. to coast (G08MOD)
  - Green's law (G08)  
-- resulted in systematic overestimation
- Identical sources
- Bathymetry varies
- Analyse POI values and aggregated warning zone results





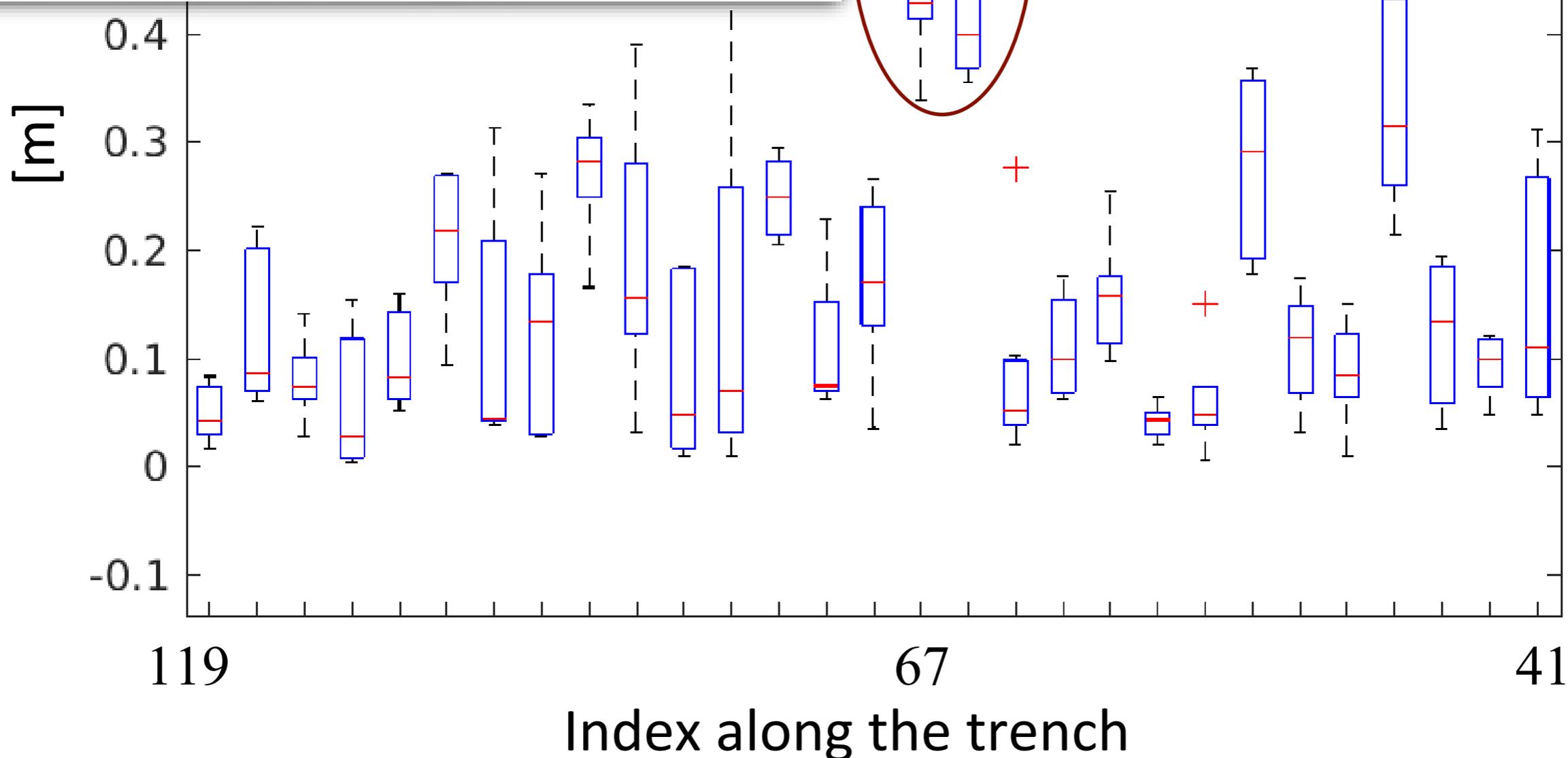
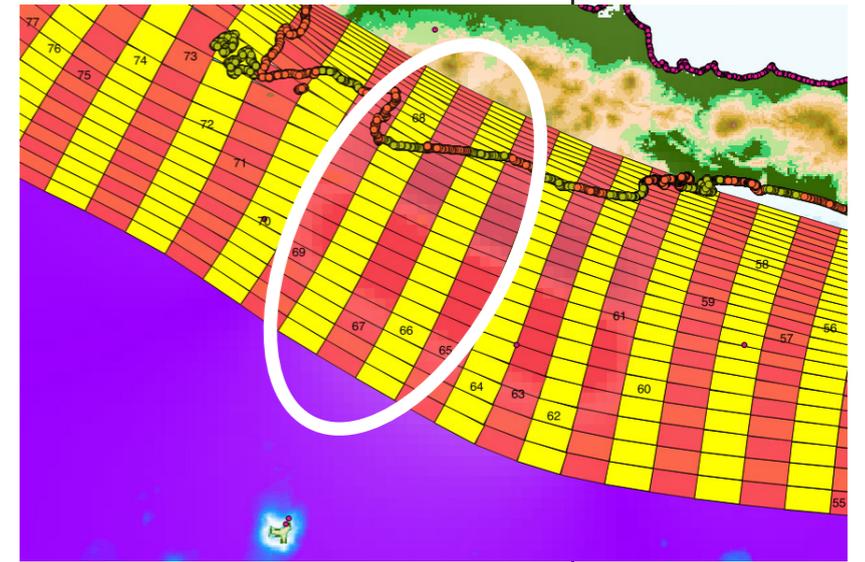
For systematic investigation of the EWH differences the coast is split into sectors and EWH comparisons are focussed on the wave propagation in the sectors

Occurring differences are visualized in box plots

# Absolute EWH differences Mw=8.40

Boxplot of EWH differences for all scenarios of magnitude 8.4

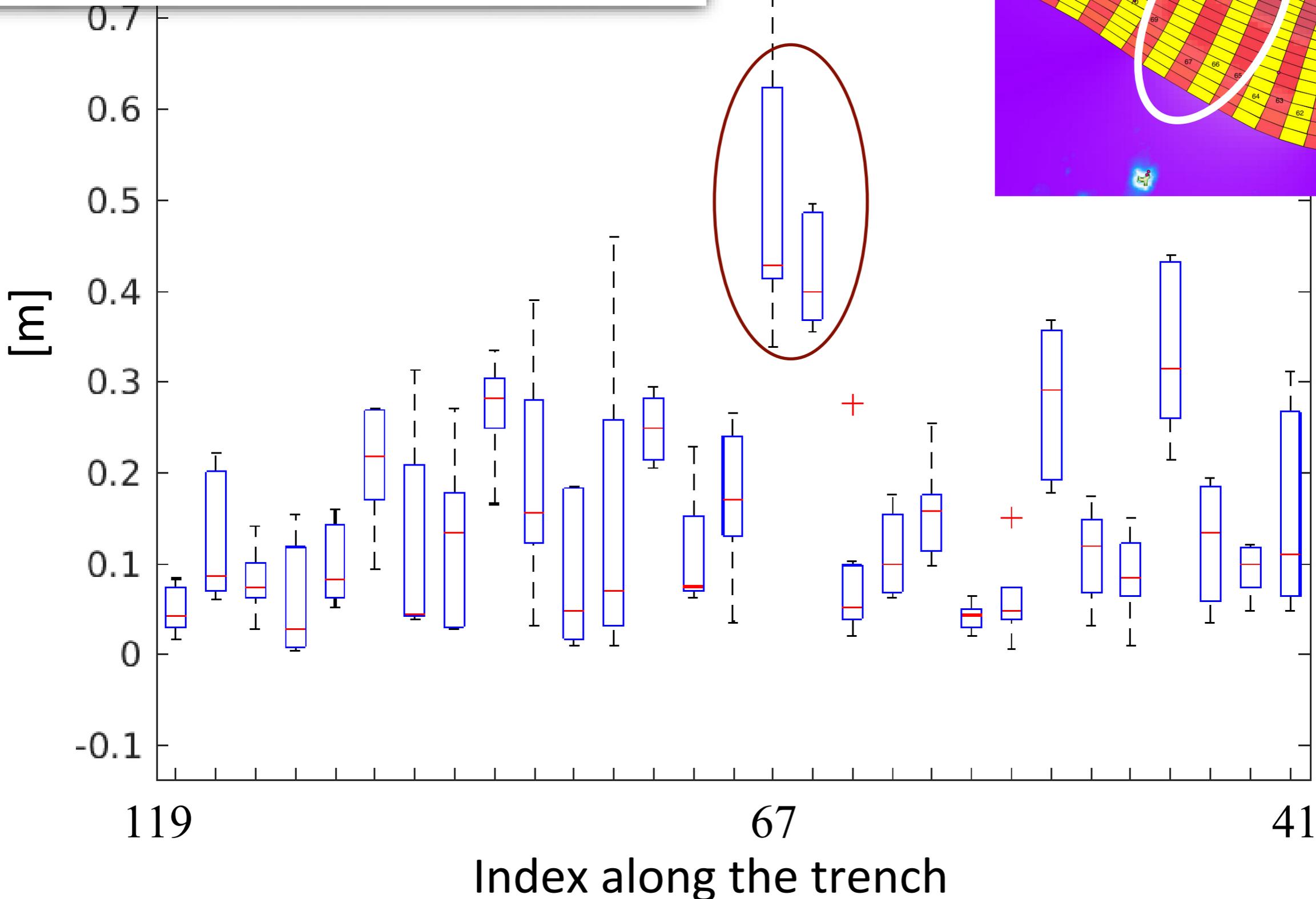
Red lines mark median of error  
Boxes show the range of values for half of the sample

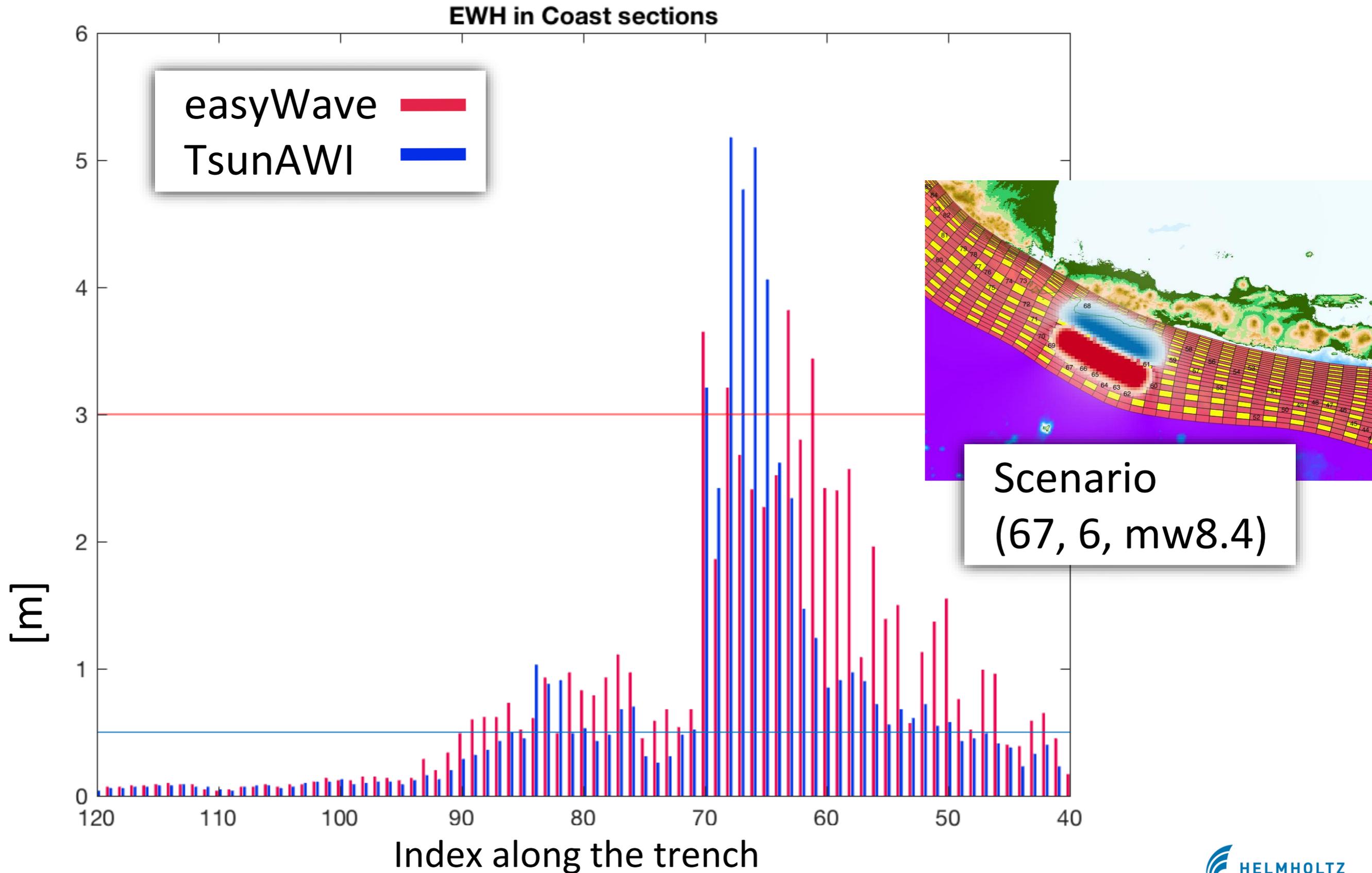


# Absolute EWH differences Mw=8.40

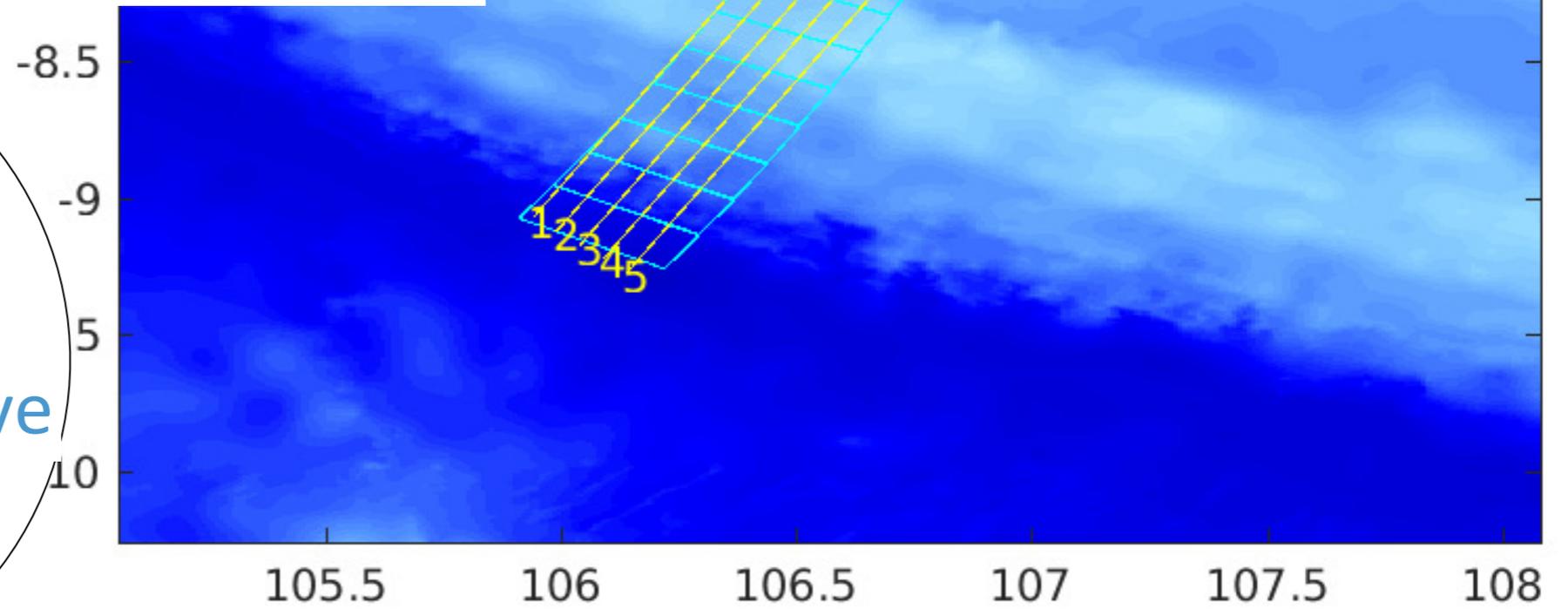
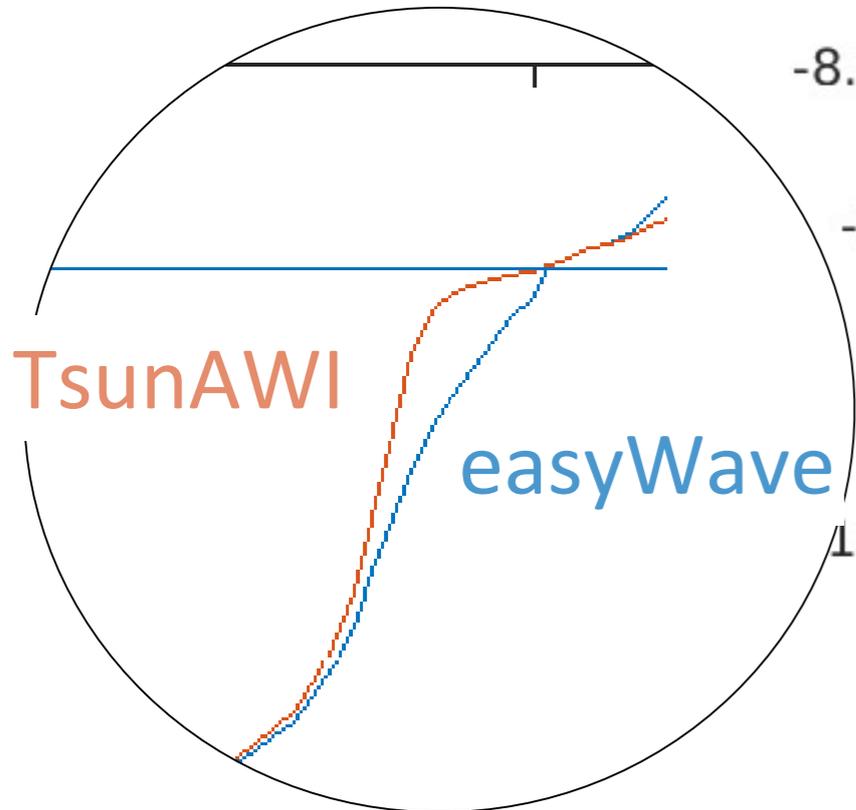
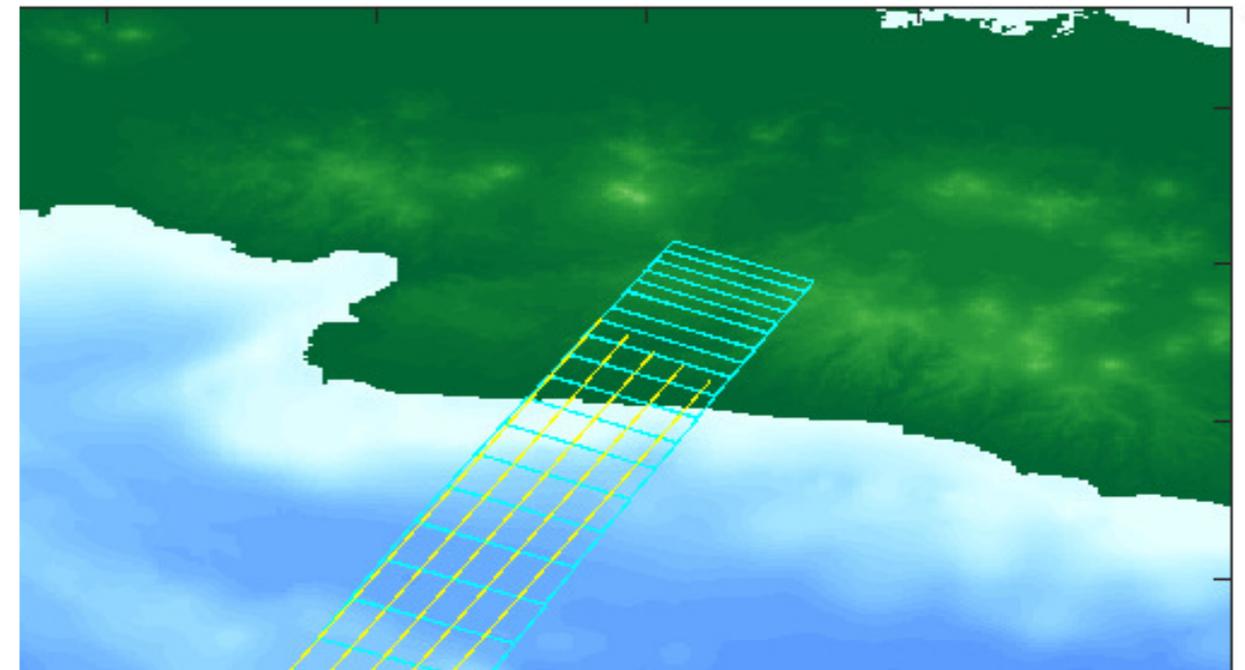
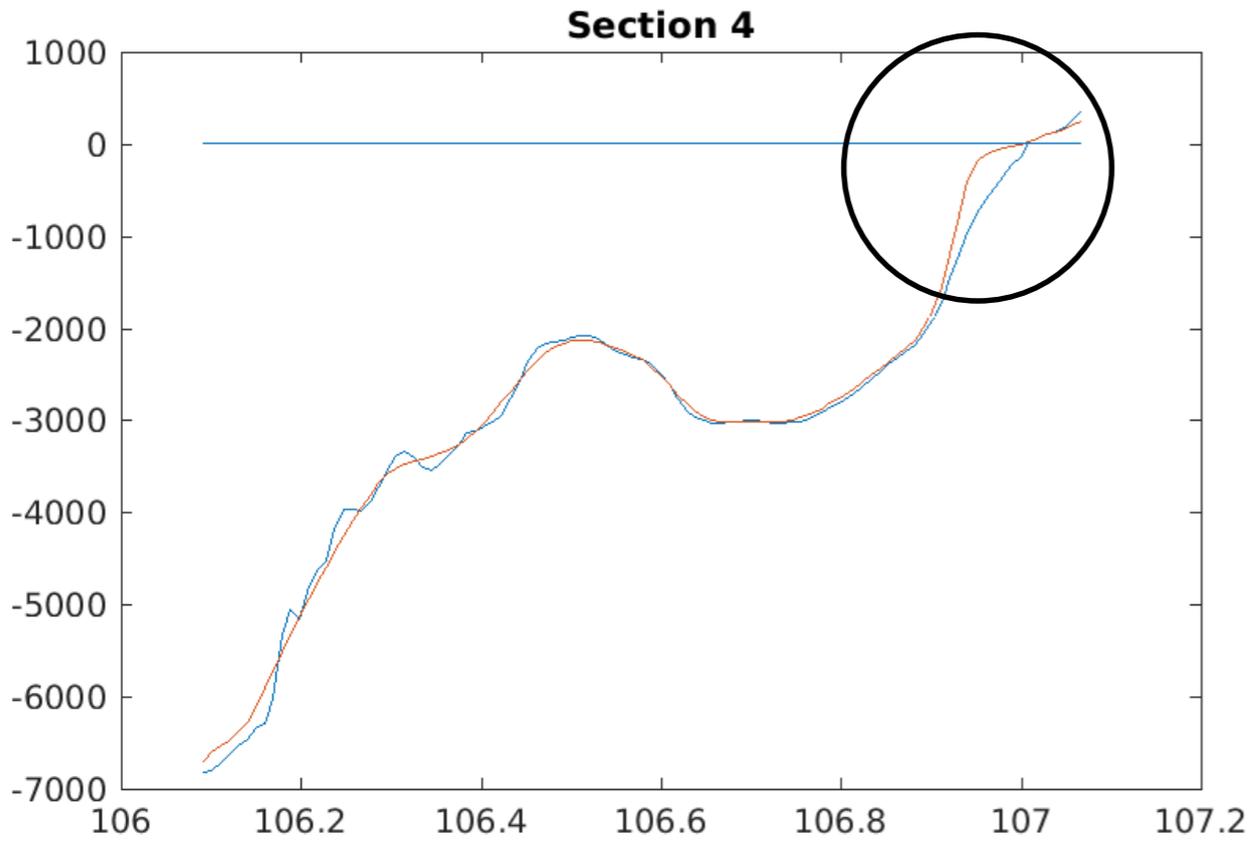


Over a range of magnitudes largest errors occur in this sector

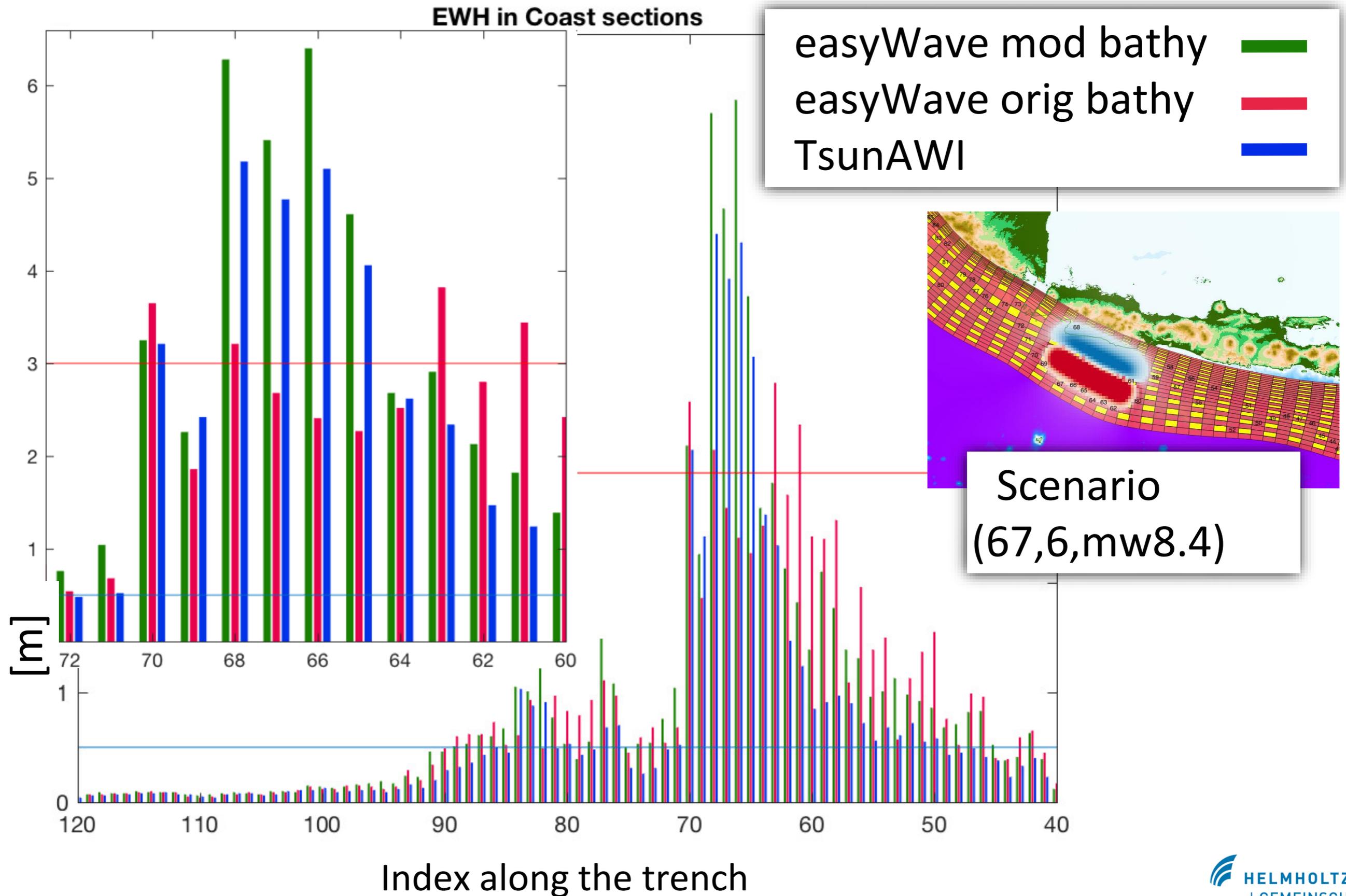




# Bathymetry sections



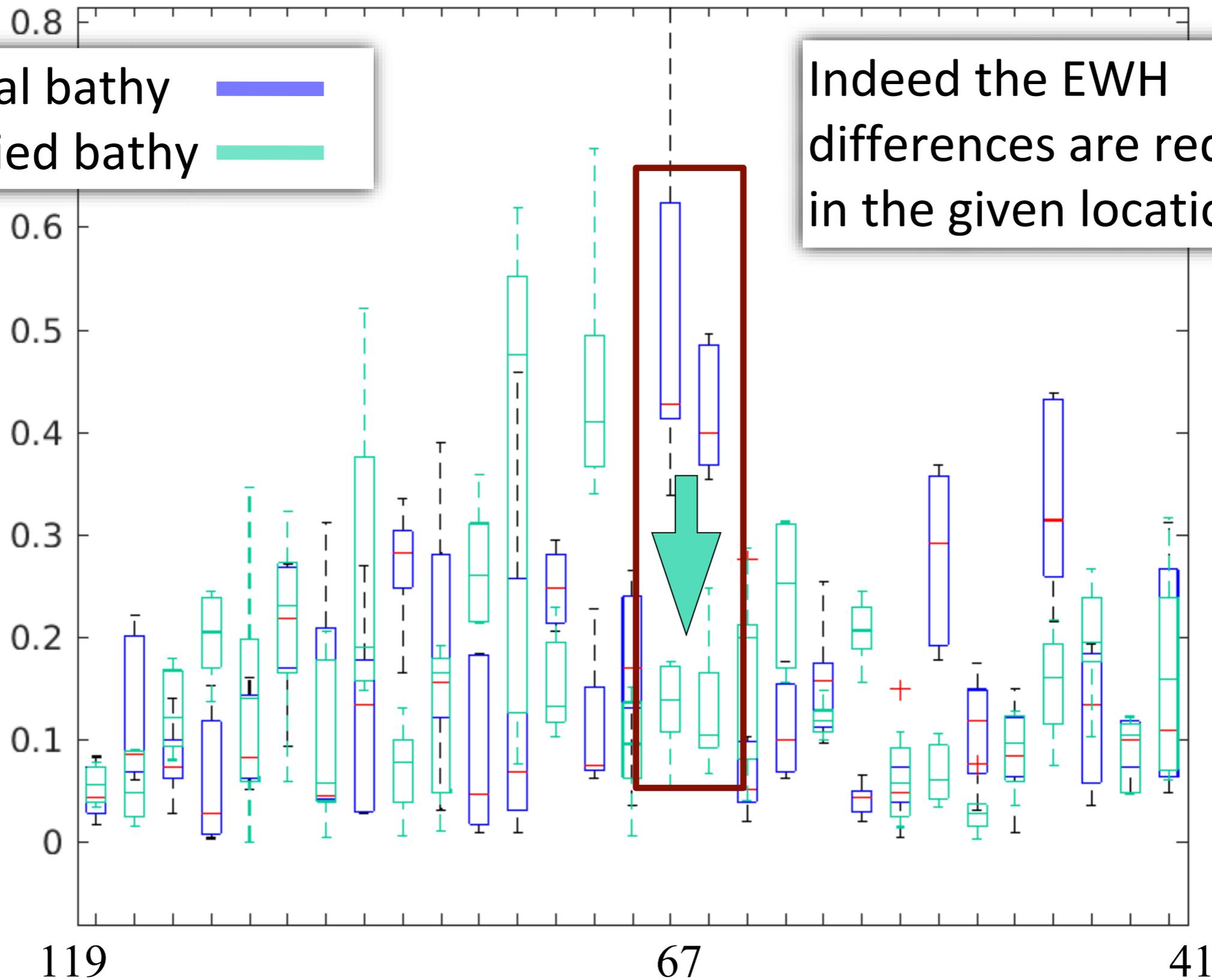
# Results after bathymetry adjustment



### Absolute EWH differences Mw=8.40

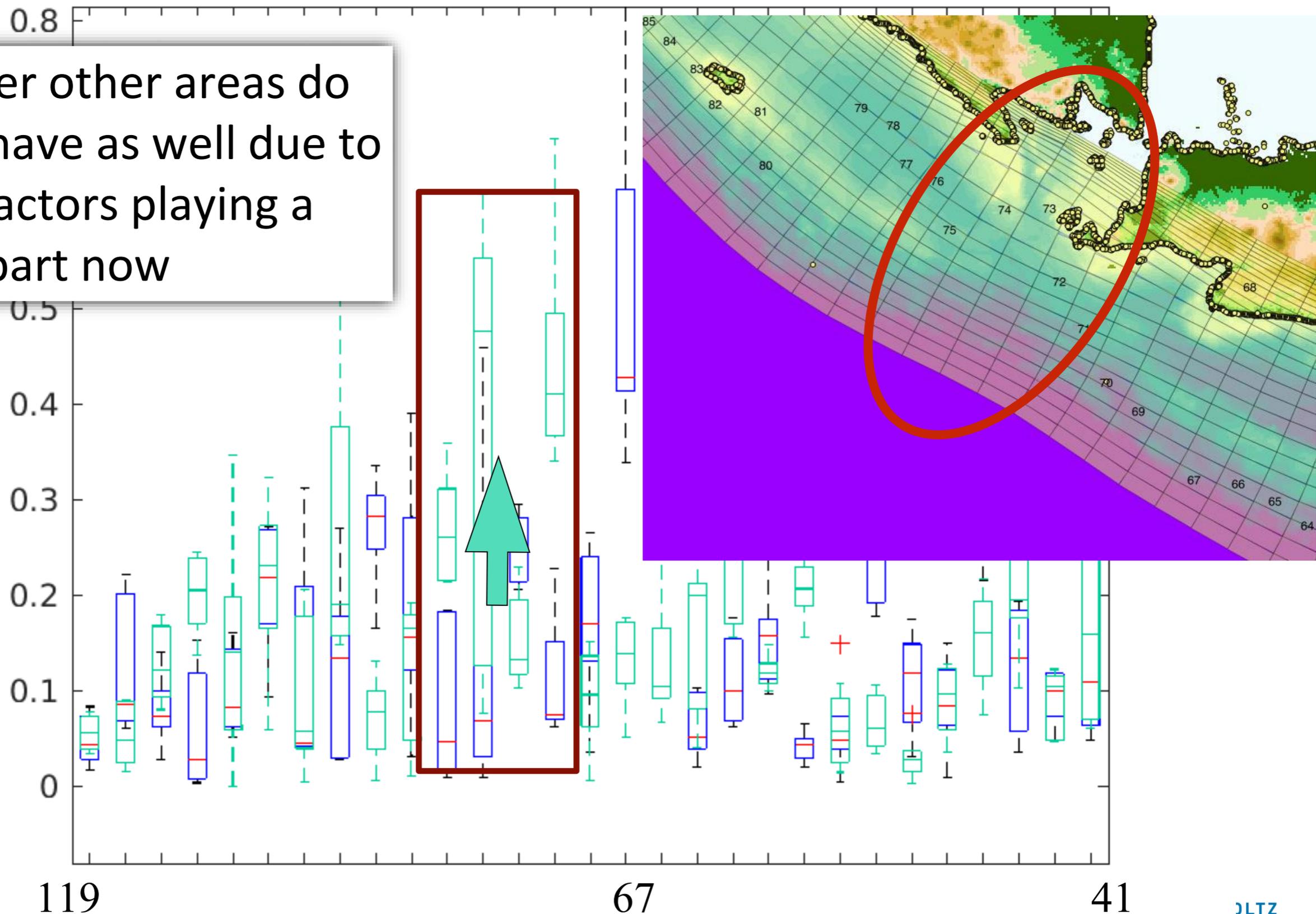
Original bathy █  
 Modified bathy █

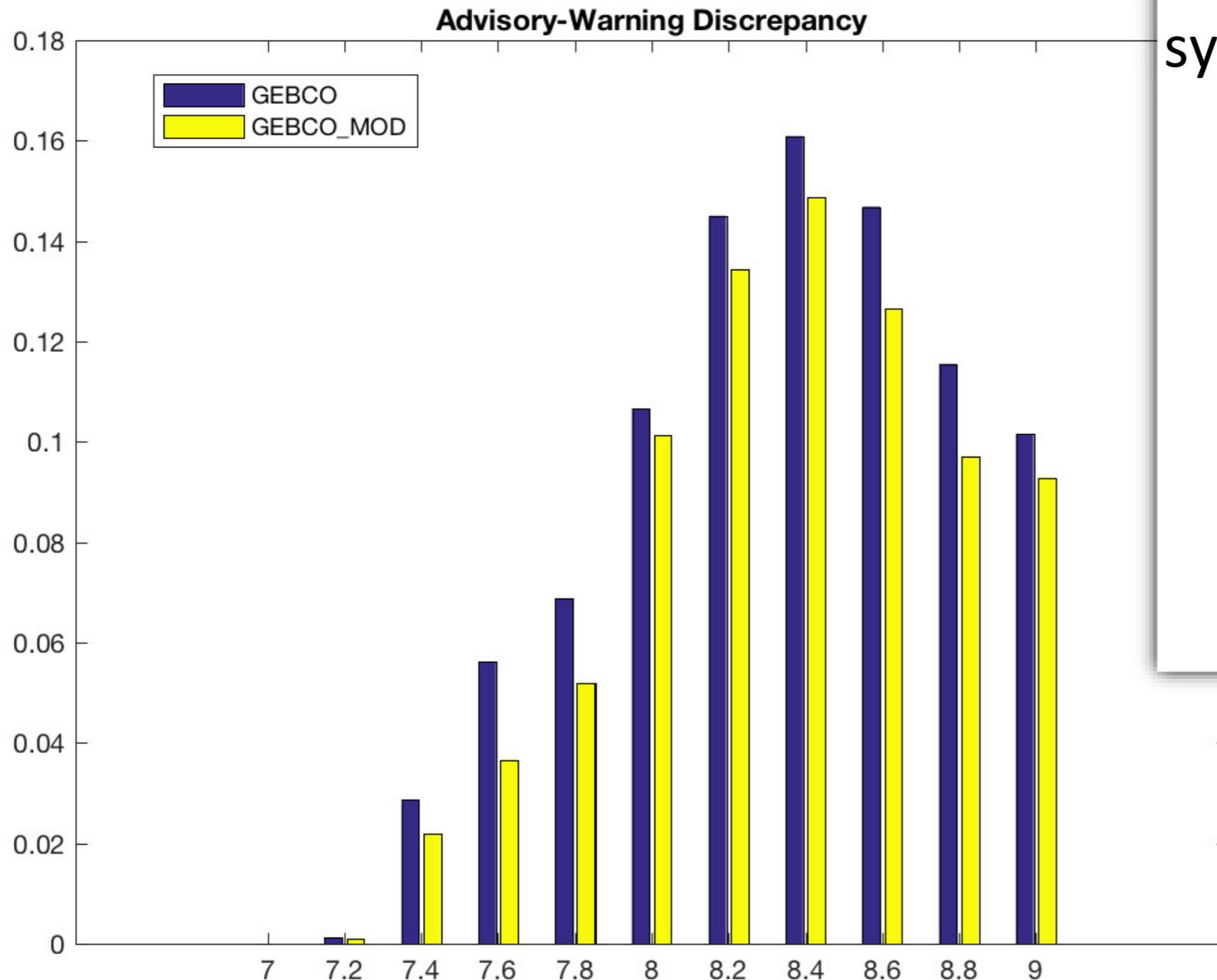
Indeed the EWH differences are reduced in the given location



## Absolute EWH differences Mw=8.40

However other areas do not behave as well due to other factors playing a larger part now





Nevertheless, the overall state of the system is improved

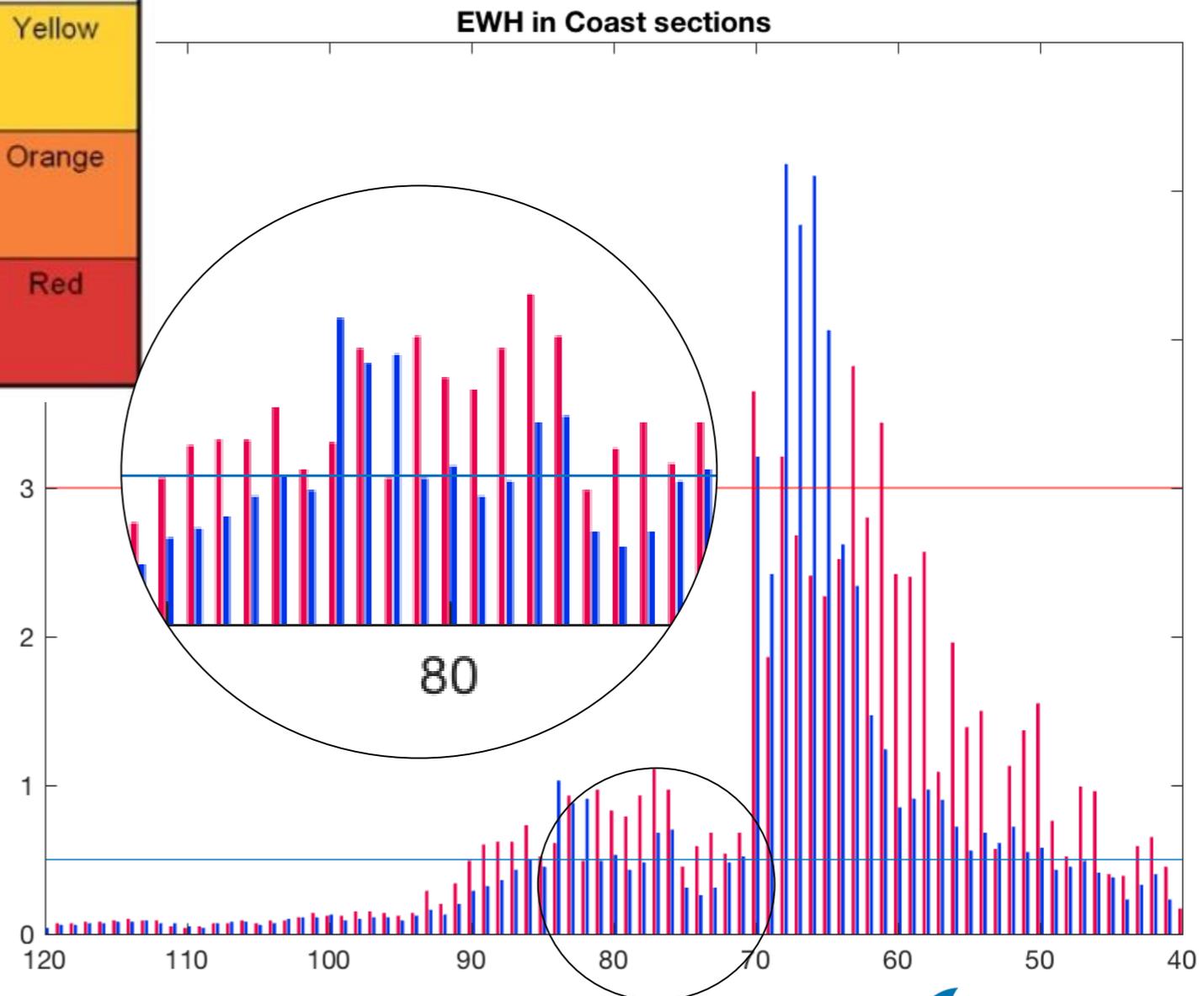
- The total number of mismatches is reduced
- The correlation between EWH results of both models grows

		G08 and Green's law	G08 coast calc	G08MOD coast calc
Magnitude 7.0	EWH correlation	0.81466	0.8576	0.91898
	ETA correlation	0.93576	0.9410	0.94768
Magnitude 8.0	EWH correlation	0.8096	0.89876	0.95222
	ETA correlation	0.91045	0.94236	0.95046
Magnitude 8.4	EWH correlation	0.74616	0.87141	0.95171
	ETA correlation	0.86683	0.91786	0.92824

## InaTEWS categories

Tsunami Category	Warning Level	Wave Height (WH) Range [m]	Color
<none>	<none>	$0,0 \leq WH < 0,1$ <b>&lt; 0.1m</b>	Gray
Minor Tsunami	Advisory	$0,1 \leq WH < 0,5$ <b>&lt; 0.5m</b>	Yellow
Tsunami	Warning	$0,5 \leq WH < 3,0$ <b>&lt; 3.0m</b>	Orange
Major Tsunami	Major Warning	$3,0 \leq WH$ <b>&gt; 3.0m</b>	Red

Small variations of the EWH can lead to a mismatch of the warning level - the quantity most visible in the warning system



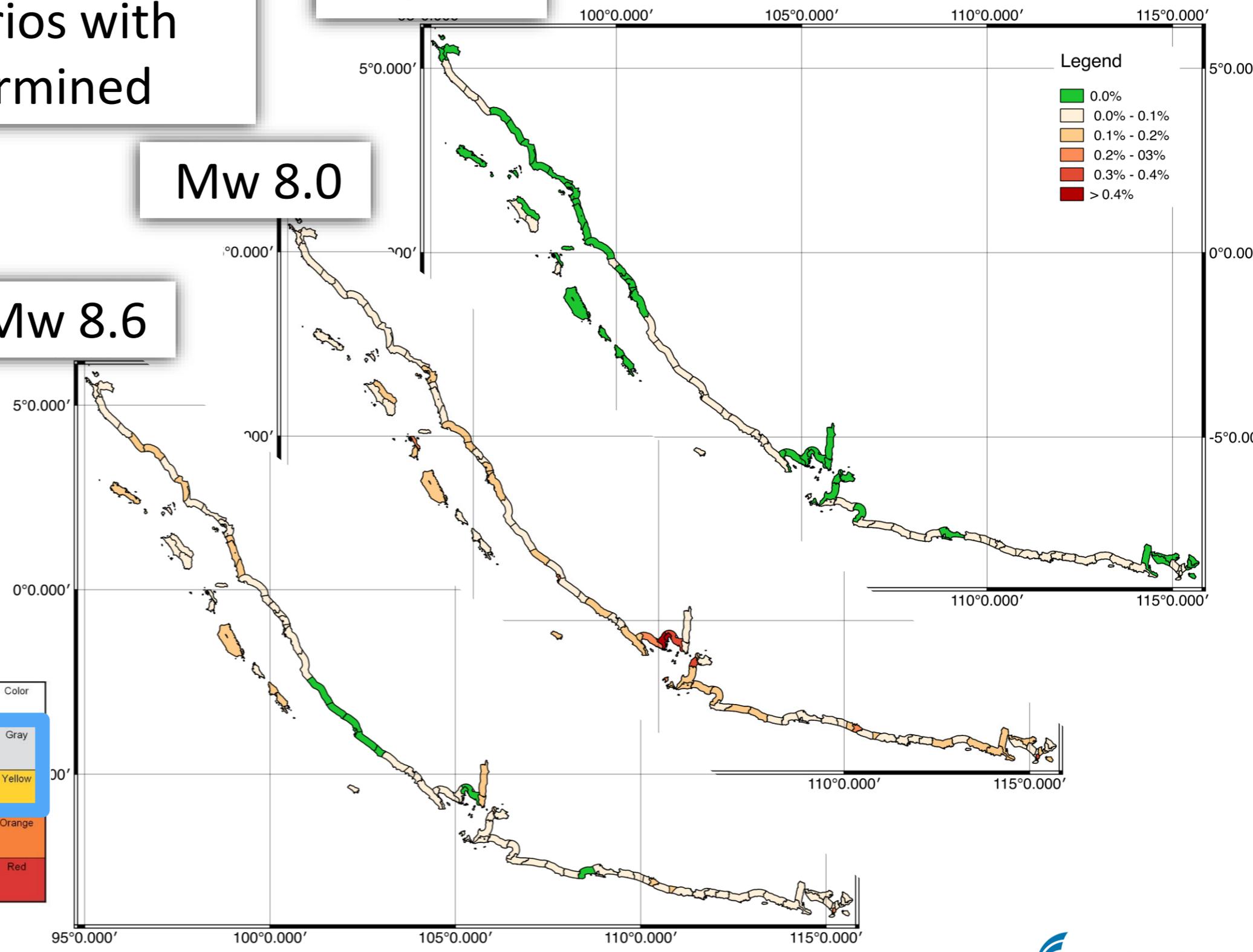
# None - Advisory mismatches

For each warning zone the fraction of scenarios with mismatch is determined

Mw 7.0

Mw 8.0

Mw 8.6



Tsunami Category	Warning Level	Wave Height (WH) Range [m]	Color
<none>	<none>	$0,0 \leq WH < 0,1$	Gray
Minor Tsunami	Advisory	$0,1 \leq WH < 0,5$	Yellow
Tsunami	Warning	$0,5 \leq WH < 3,0$	Orange
Major Tsunami	Major Warning	$3,0 \leq WH$	Red

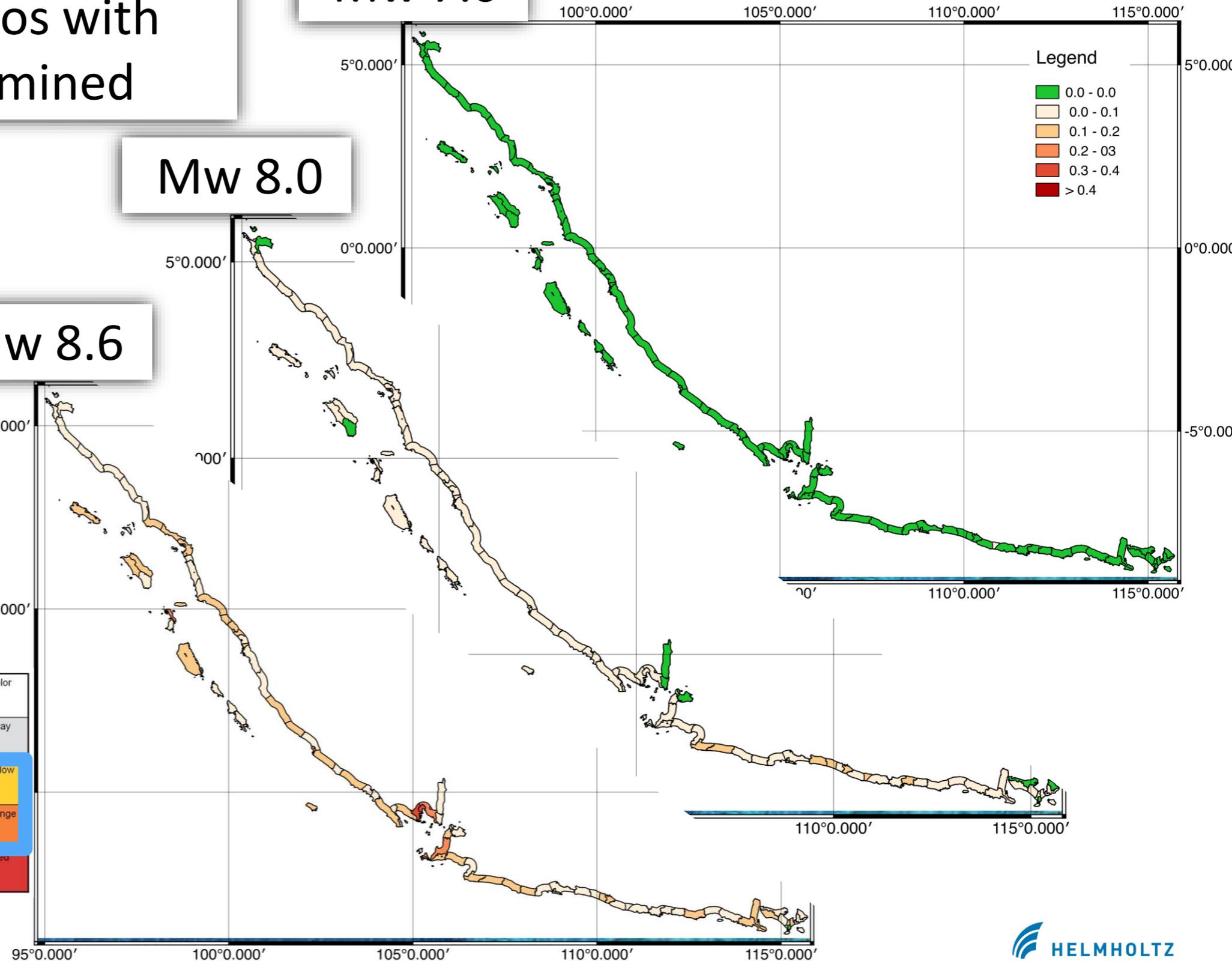
# Advisory - Warning mismatches

For each warning zone the fraction of scenarios with mismatch is determined

Mw 7.0

Mw 8.0

Mw 8.6



Tsunami Category	Warning Level	Wave Height (WH) Range [m]	Color
<none>	<none>	$0,0 \leq WH < 0,1$	Gray
Minor Tsunami	Advisory	$0,1 \leq WH < 0,5$	Yellow
tsunami	Warning	$0,5 \leq WH < 3,0$	Orange
Major Tsunami	Major Warning	$3,0 \geq WH$	Red

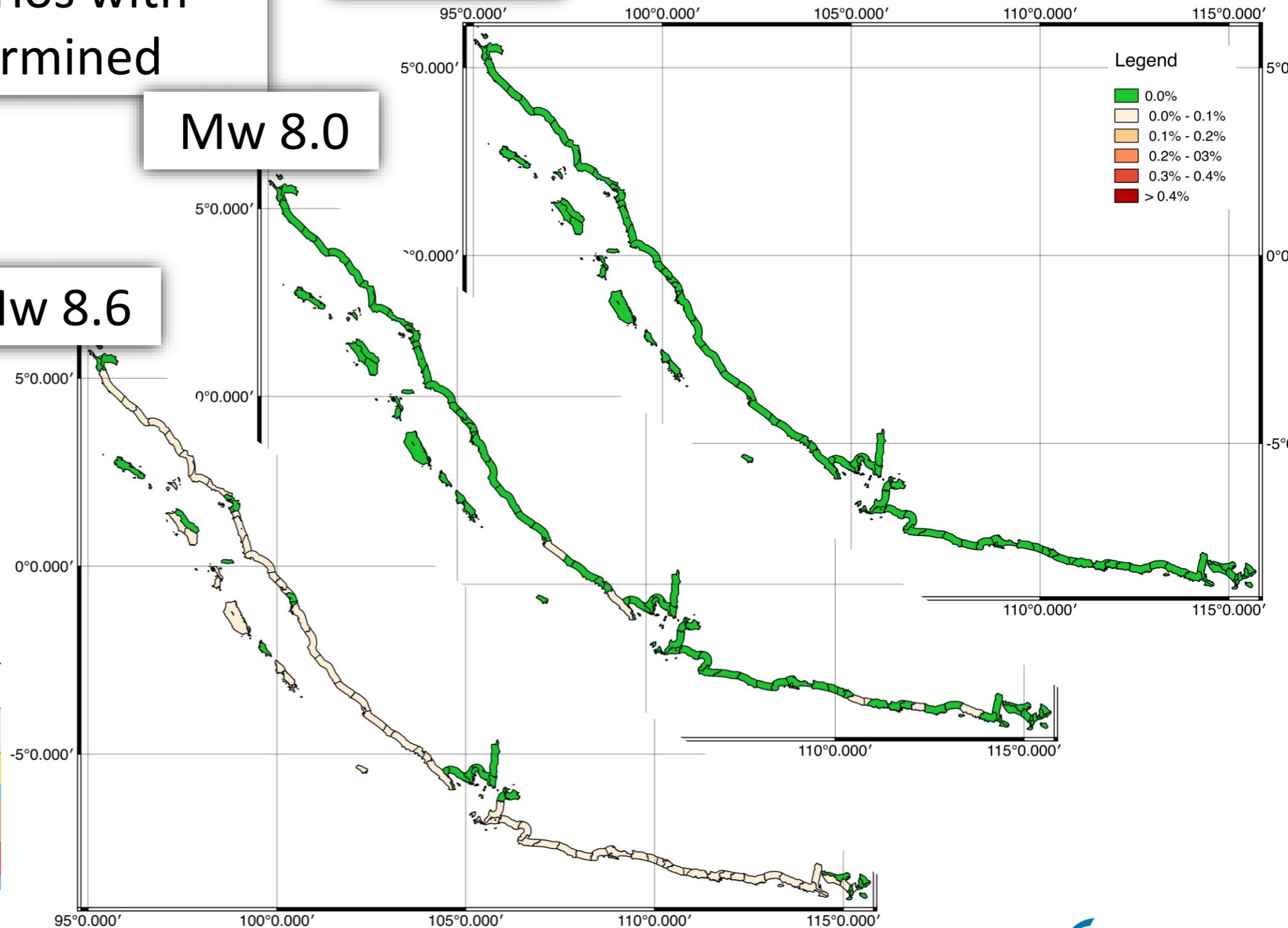
# Warning - Major Warning mismatches

For each warning zone the fraction of scenarios with mismatch is determined

Mw 7.0

Mw 8.0

Mw 8.6



Tsunami Category	Warning Level	Wave Height (WH) Range [m]
<none>	<none>	$0,0 \leq WH < 0,1$
Minor Tsunami	Advisory	$0,1 \leq WH < 0,5$
sunami	Warning	$0,5 \leq WH < 3,0$
Major Tsunami	Major Warning	$3,0 \leq WH$

- **Good overall consistency of warning products, in particular very little discrepancies for small magnitudes.**
- Improvements of the consistency in the system are possible.
- Due to the vast range of the topographical settings, implications of adjustments are diverse.
- Many factors involved in deviating results - improving one may increase the influence of another.
- Absolute agreement is not achievable by definition, nevertheless studies like this may help to reduce variations to the minimum.