



# Seismologische Analyse der jüngsten Erdbebenkatastrophen in Neuseeland und Japan: 10 Rückschlüsse für die Schweiz

**SED, 17. März 2011**

- Begriffserklärungen
- Das Christchurch-Erdbeben (22. Februar 2011, M6.3)
- Das Tohoku-Erdbeben (11. März 2011, M9.0)
- Vergleich der beiden Beben
- Folgen für Atomkraftwerke
- 10 Rückschlüsse für die Schweiz

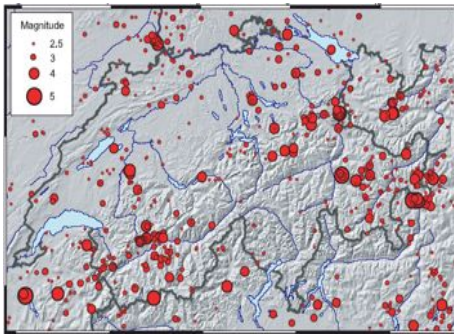
[www.seismo.ethz.ch](http://www.seismo.ethz.ch)



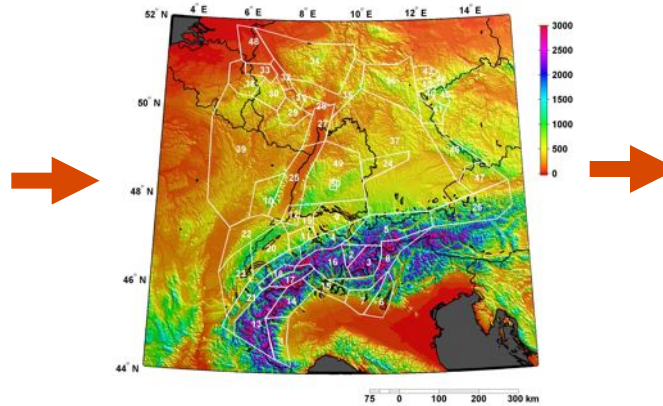
# Seismische Gefährdungsanalyse

Eckpunkte der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse (*engl.: PSHA*)

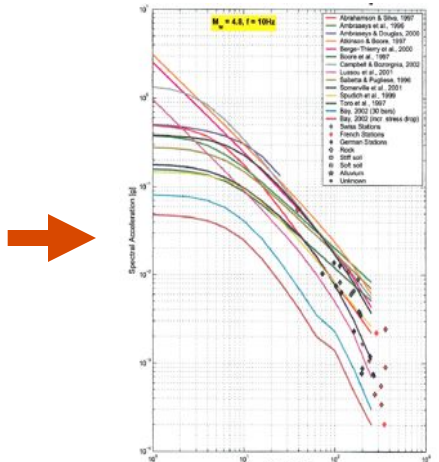
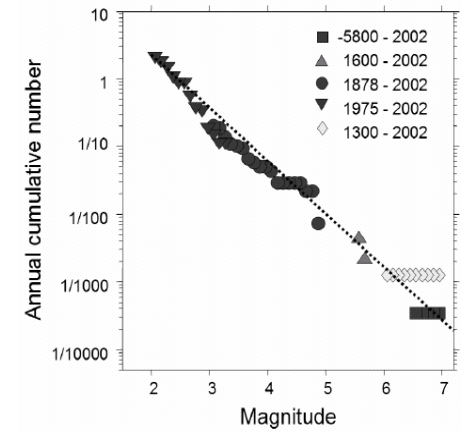
Erdbebenkatalog



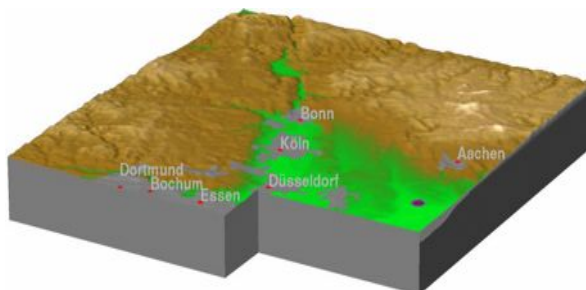
Seismotektonik und aktive Störungen



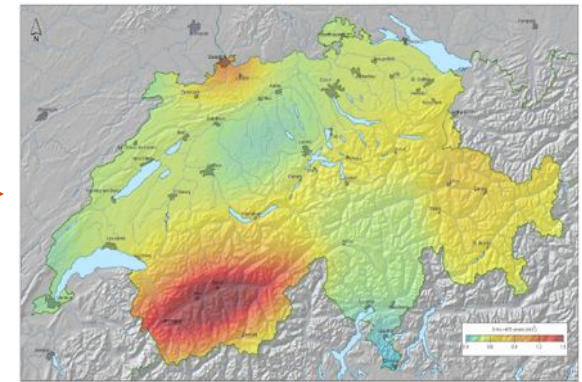
Erdbebenaktivitätsraten



Dämpfung seismischer Wellen



Erschütterungs-Szenario mit Standorteffekten

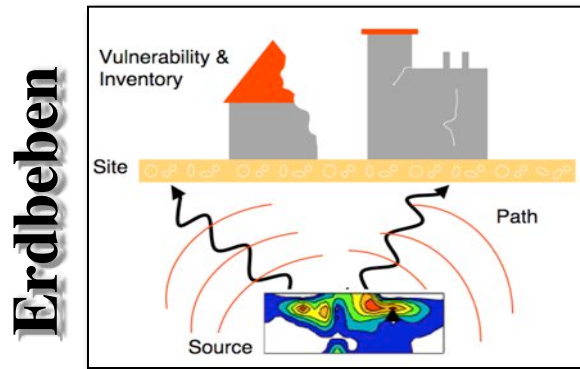


Gefährdung: erwartete Bodenbewegung mit 10%iger Wahrscheinlichkeit in 50 Jahren



# Seismische Gefährdungsabschätzung

Verschiedenartige Gefährdungen können berechnet werden (auf Grundlage von Langzeit – und Kurzzeitwahrscheinlichkeiten von Bodenbewegungen, sowie direkt nach dem Auftreten eines Erdbebens)



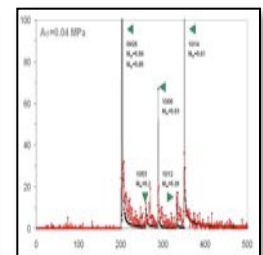
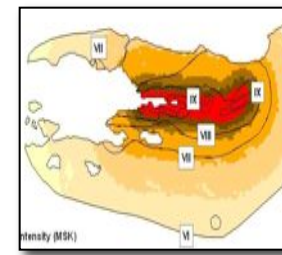
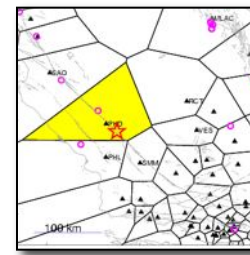
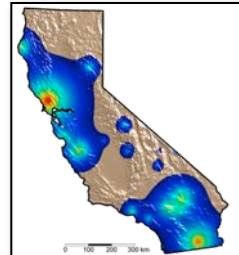
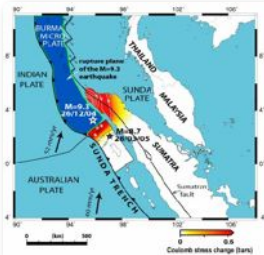
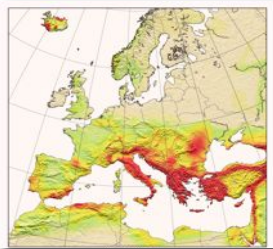
**Dekaden**

**Jahre**

**Tage/ Minuten**

**Sekunden**

**Minuten/ Stunden**



**Langzeit-  
gefährdungs-  
kartierung**

**Langzeit-  
vorhersage**

**Kurzzeit-  
vorhersage**

**Früh-  
warnung**

**"ShakeMaps" &  
"Rapid Loss"**

**Nachbeben-  
vorhersage**



# Von seismischer Gefährdung zu seismischem Risiko

**Seismische Gefährdung**



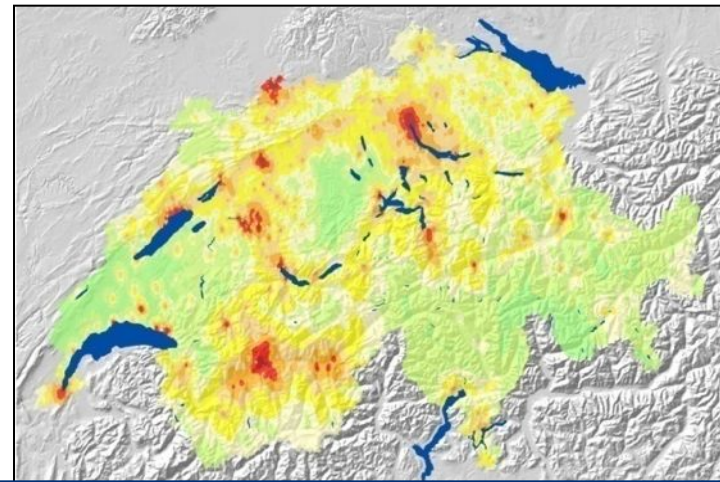
**Standorteffekte**



**Betroffene Werte**



**Verletzbarkeit**



Seismisches Risiko wird durch ökonomische Faktoren dominiert und ist in urbanen Gebieten am höchsten





## Das Christchurch-Erdbeben, 22. Februar 2011

- Magnitude: 6.3
- Tiefe: 5km
- Östlich des Darfield-Erdbebens (M7.1, 4. September 2010)
- Beide Beben fanden auf vorher unbekanntem Störungen statt, außerhalb der bekannten grossen seismischen Zonen von Neuseeland
- Erschütterungsintensität MMI IX im Zentrum von Christchurch (d=8km)
- Starke Standorteffekte durch lokale Bodeneigenschaften (Bodenklasse D)
- Erschütterung war in grossen Bereichen stärker als in den Baunormen angenommen
- Es wurde nicht vorhergesagt



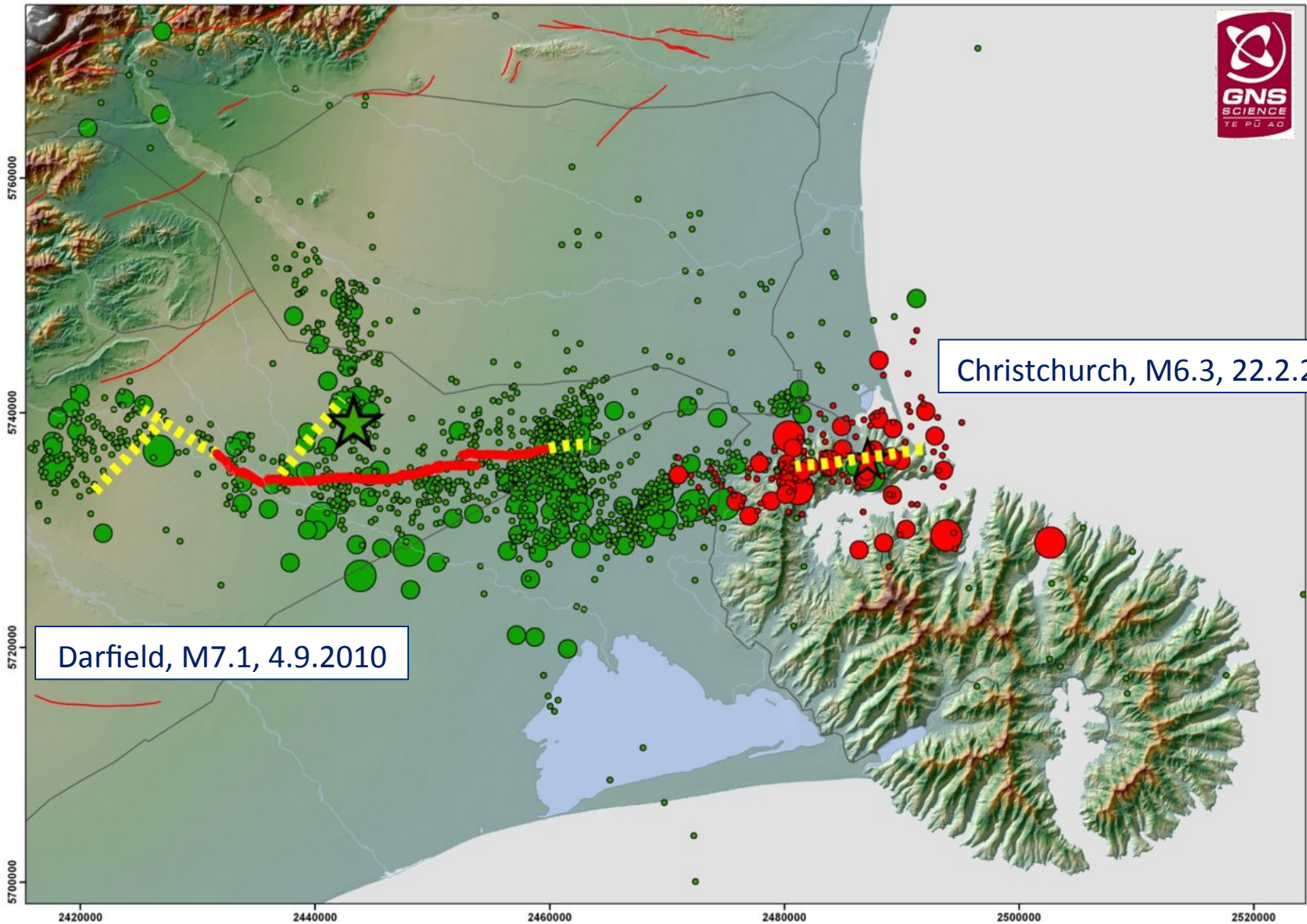
SED

Schweizerischer Erdbebendienst  
Swiss Seismological Service



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Christchurch, M6.3, 22.2.2011

Darfield, M7.1, 4.9.2010

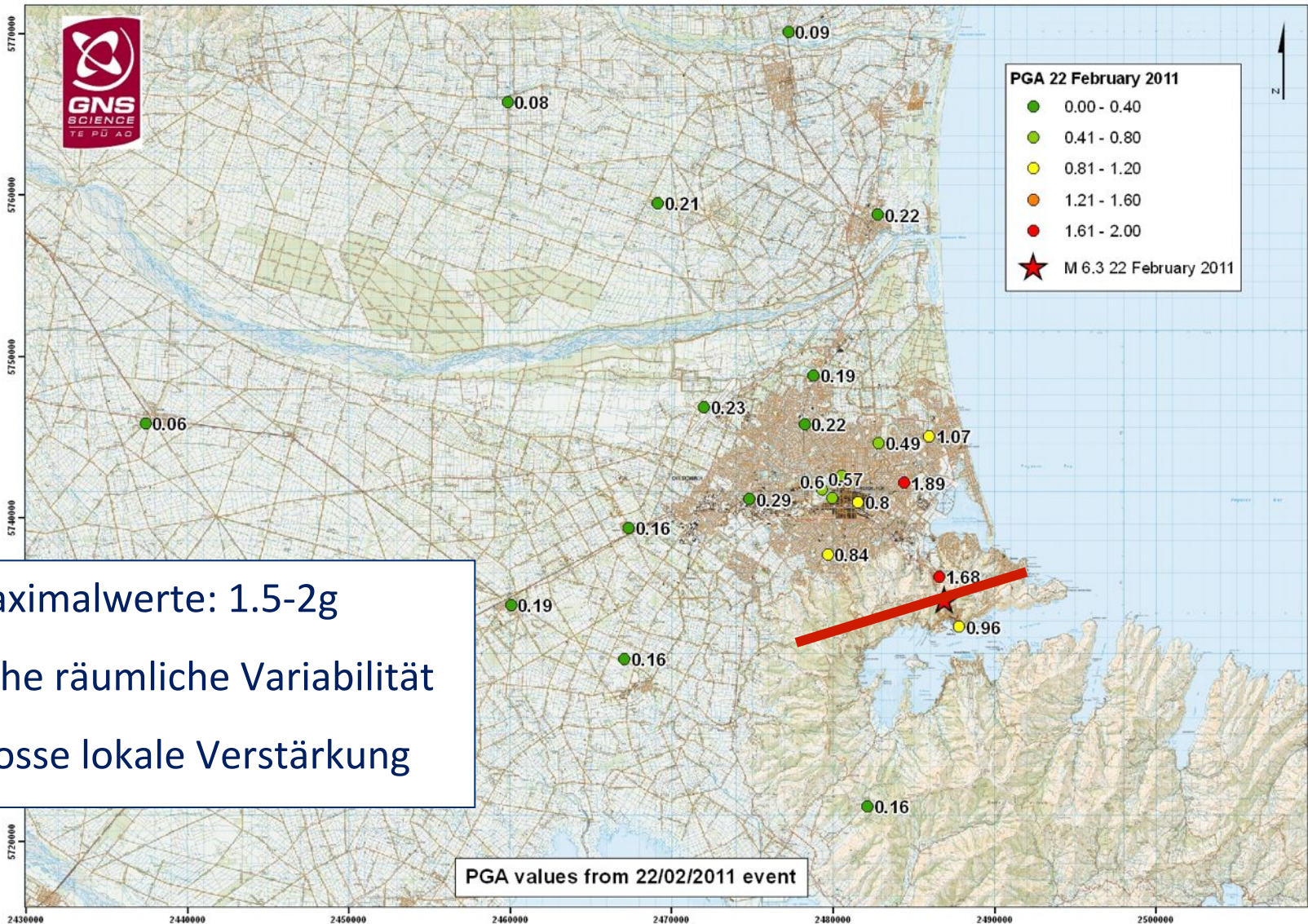


## Folgen

- 200+ Todesopfer
- ~5000 Häuser unbewohnbar
- 13 Milliarden\$ direkter Schaden
- grossräumige Bodenverflüssigung
- weit verbreitete Erdrutsche in den Port Hills
- Stromversorgung in der Stadt: anfangs 60% ohne Strom; nach 10 Tagen, 20% ohne Strom
- Wasserversorgung in der Stadt: anfangs 50% ohne Wasser; nach 10 Tagen, 15% ohne Wasser
- Abwasser: nicht behebbare, weit verbreitete Schäden an Kanalnetz und Kläranlage



# Aufgezeichnete maximale Bodenbeschleunigung (engl.: PGA)

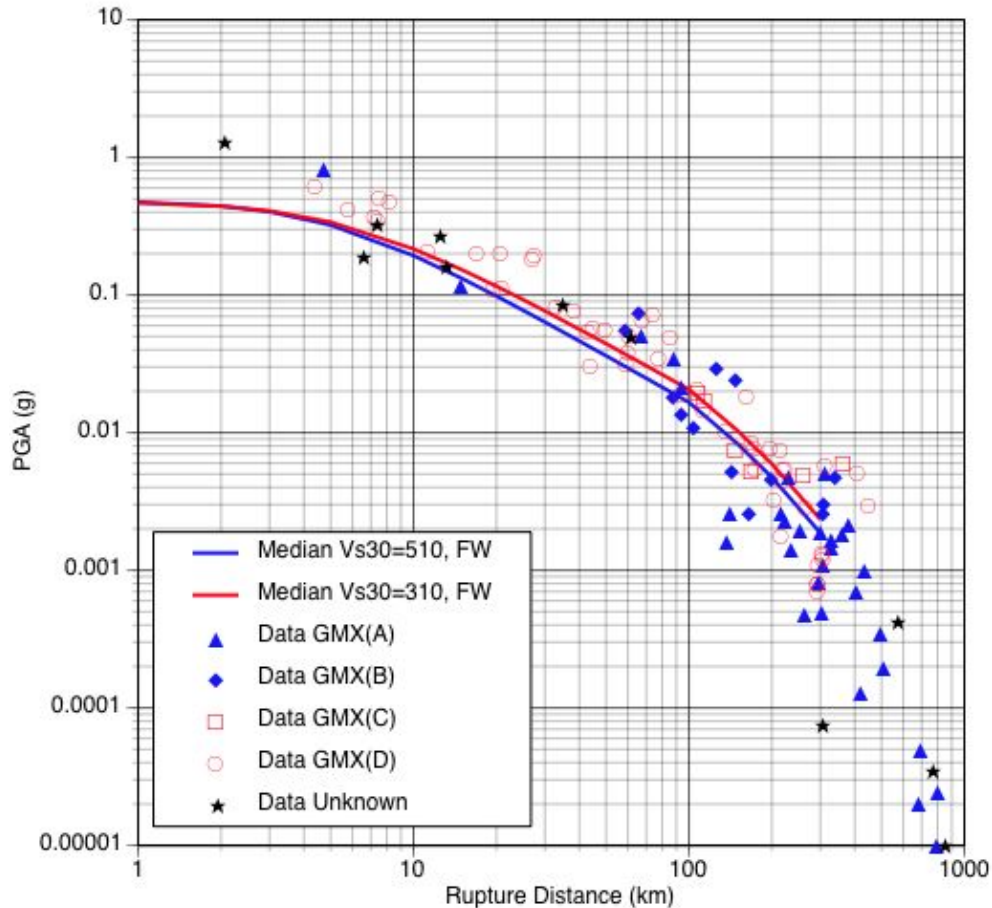


- Maximalwerte: 1.5-2g
- Hohe räumliche Variabilität
- Grosse lokale Verstärkung



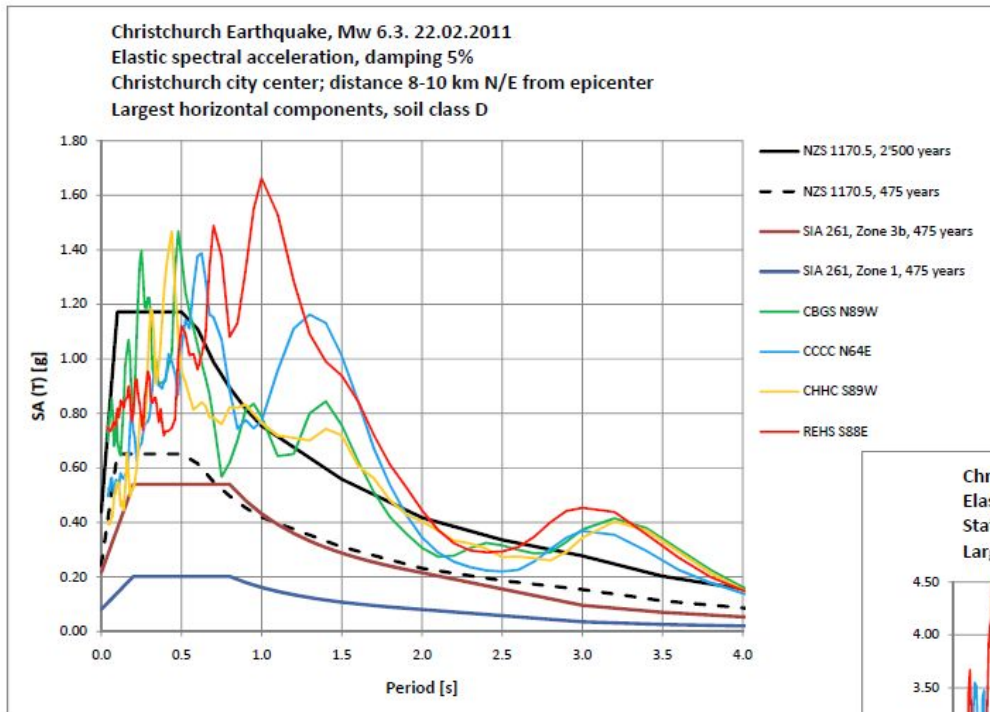
# Aufgezeichnete maximale Bodenbeschleunigung

Magnitude  $M_w=6.1$ , Reverse, Top of Rupture=2 km



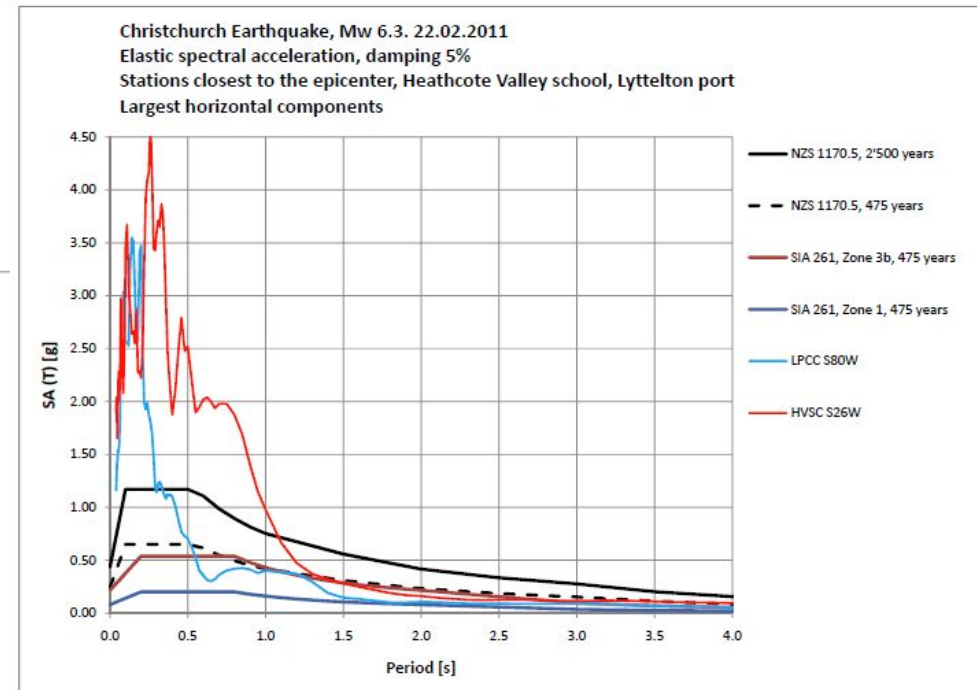
- Exzellente Datenabdeckung
- ~50 gute Standortbeschreibungen
- Maximalwerte und räumliche Verteilung stimmen mit vorhandenen Modellen überein

# Aufgezeichnete maximale Bodenbeschleunigung



## Bewegungen überschreiten NZ Baunormen

- 475 Jahre: Faktor 2-5
- 2500 Jahre: Faktor 1-3



## Bewegungen überschreiten CH Baunormen

- 475 Jahre - Zone 3b: Faktor 2-7
- 475 Jahre - Zone 1: Faktor 6-18



SED

Schweizerischer Erdbebendienst  
Swiss Seismological Service



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# Gebäudeschäden





# Durch Bodenverflüssigung und Rutschungen verursachte Schäden



Water damage in on the corner of Pages Rd and ANZAC Dr.

DON SCOTT/The Press



Photo 17. GTH\_5787 - House destroyed by rock fall at 54 Raekura Place, Redcliffs (reported fatality site).



Photo 6. GTH\_5708 (Rock falls RSA Building in Wakefield Ave Sumner (rock fall fatality reported at building site left).



## Rückschlüsse

- Bodenerschütterung für derzeitige Baunormen zu stark
- Signifikante Verluste durch Bodenverformungen
  - Bodenverflüssigung – Häuser & Infrastruktur
  - Hangrutschungen – Häuser
- Schäden an Wohngebäuden
  - Schäden an Hang-Standorten > Durchschnitt
  - Erschütterungsschäden an modernen Gebäuden < Durchschnitt
- Schäden an Nicht-Wohngebäuden
  - Schäden an Gebäuden mit älterer Bauordnung
  - Moderne Gebäude (nach 1980) haben gut standgehalten
  - Weit verbreiteter Schaden an unverstärkten Mauerwerksbauten



SED

Schweizerischer Erdbebendienst  
Swiss Seismological Service



**ETH**

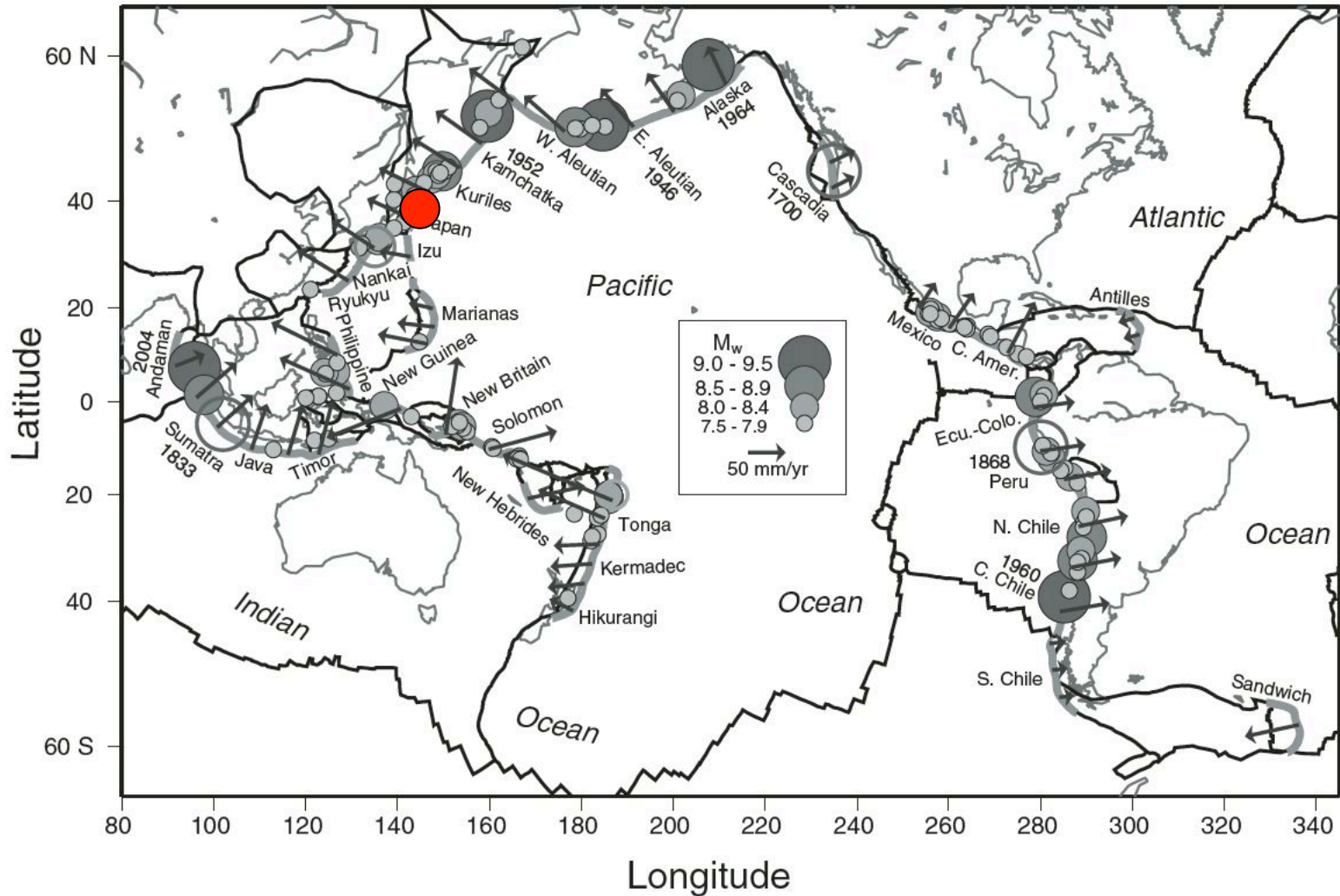
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# Tohoku-Erdbeben, 11. März 2011, Magnitude 9



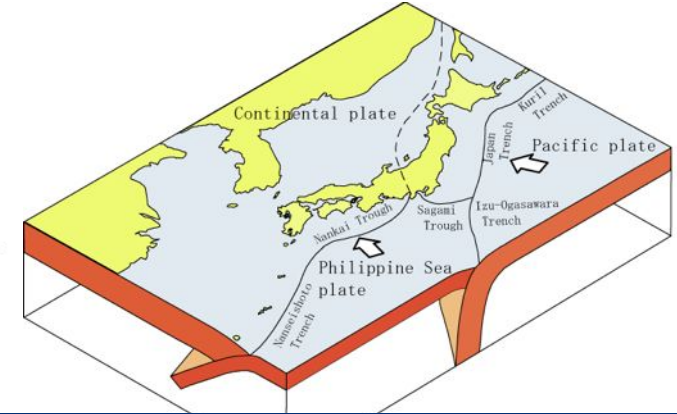
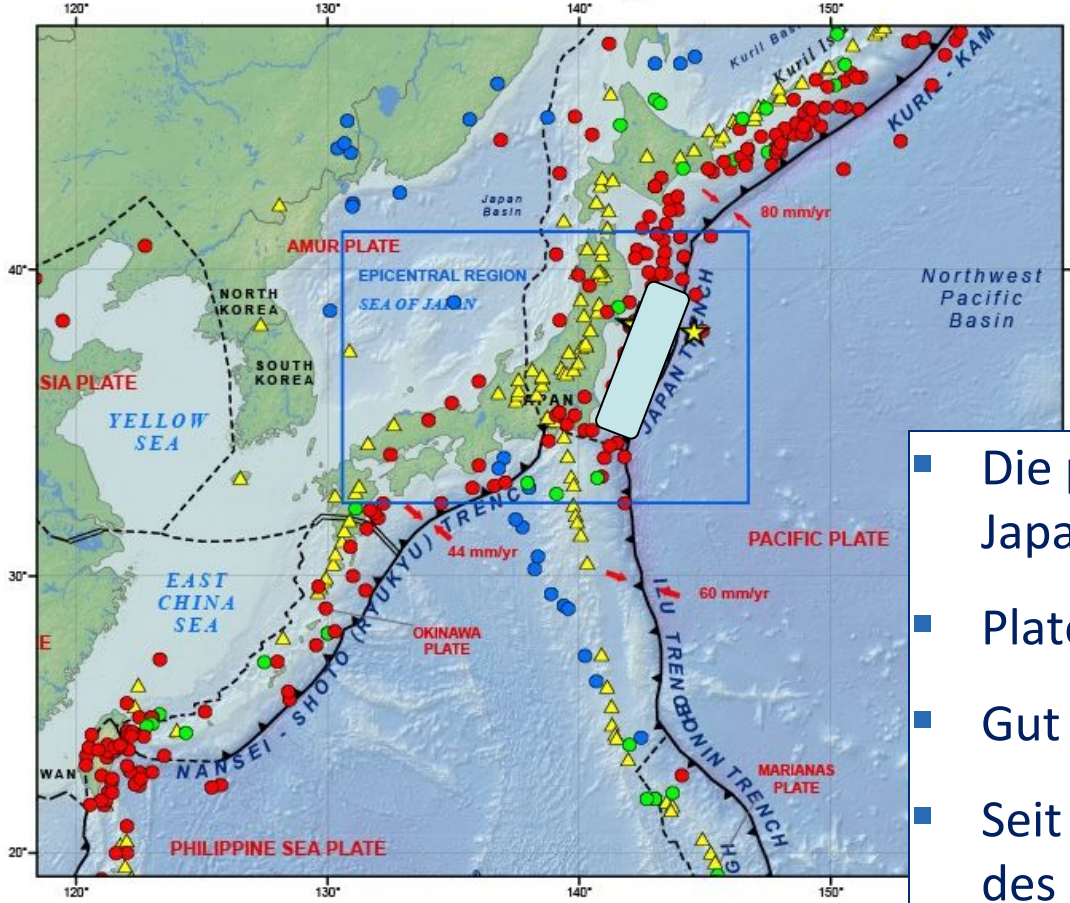


# Tektonik: Magnitude 9 am pazifischen “Feuerring”





# Tektonik: Subduktion der pazifischen Platte unter Honshu



- Die pazifische Platte taucht am Japanischen Graben tief in den Mantel
- Platenkonvergenz von 8-10 cm/Jahr
- Gut bekannte seismische Geschichte
- Seit 1910: 25  $M > 7$  Erdbeben im Bereich des Honshu-Abschnittes des Japanischen Grabens
- Das  $M_9$  Erdbeben füllte eine "Lücke" am westpazifischen Rand

## RELATIVE PLATE MOTIONS

The red vectors represents the motion of the Pacific Plate relative to the Philippine Plate, and the Philippine Plate relative to the Eurasia Plate in the region. The motion of the Pacific Plate is generally 60 mm/yr north westward with respect to the Philippine Plate. The motion of the Philippine Plate is generally 44 mm/yr north westward with respect to the Eurasia Plate.

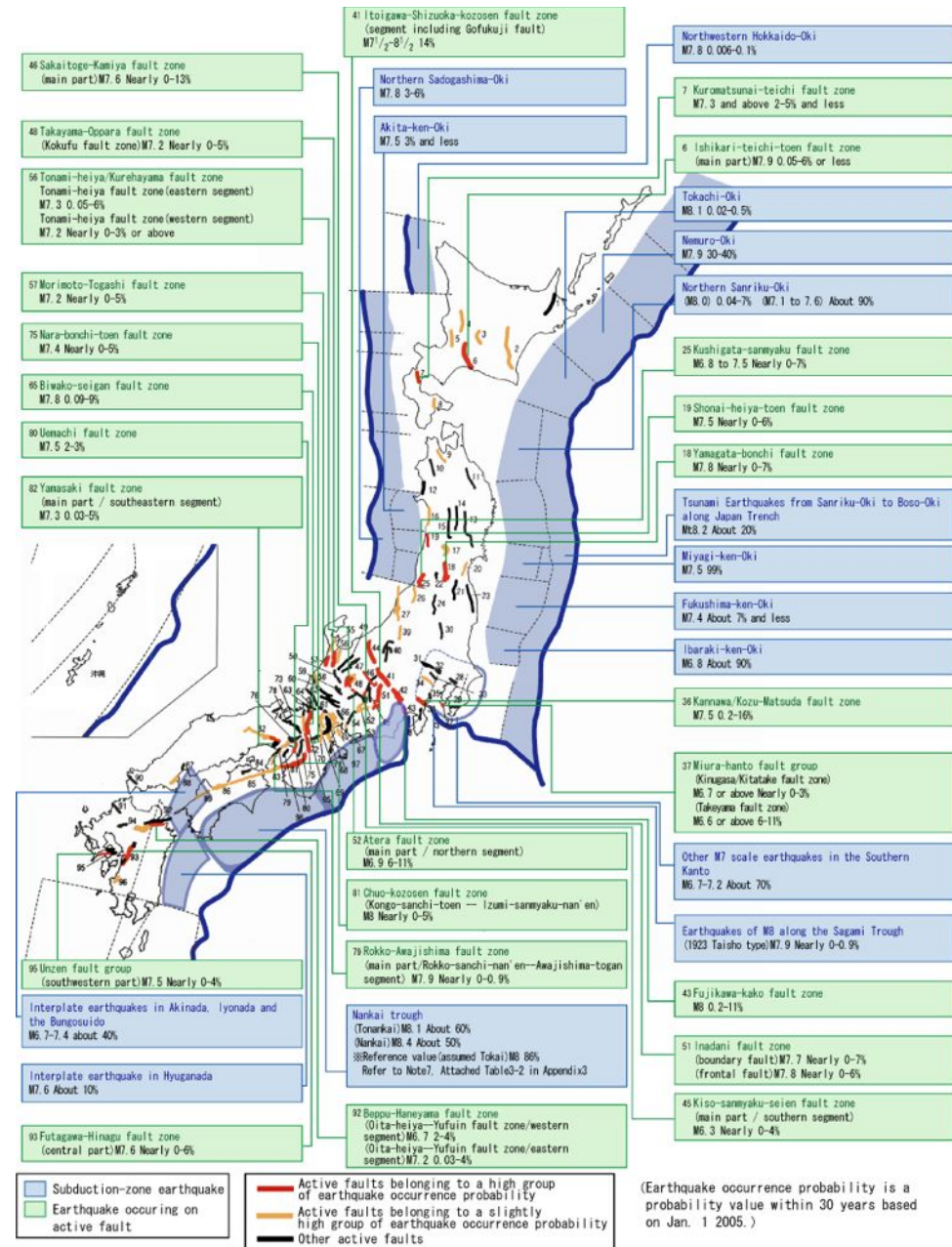
Scale 1:20,000,000





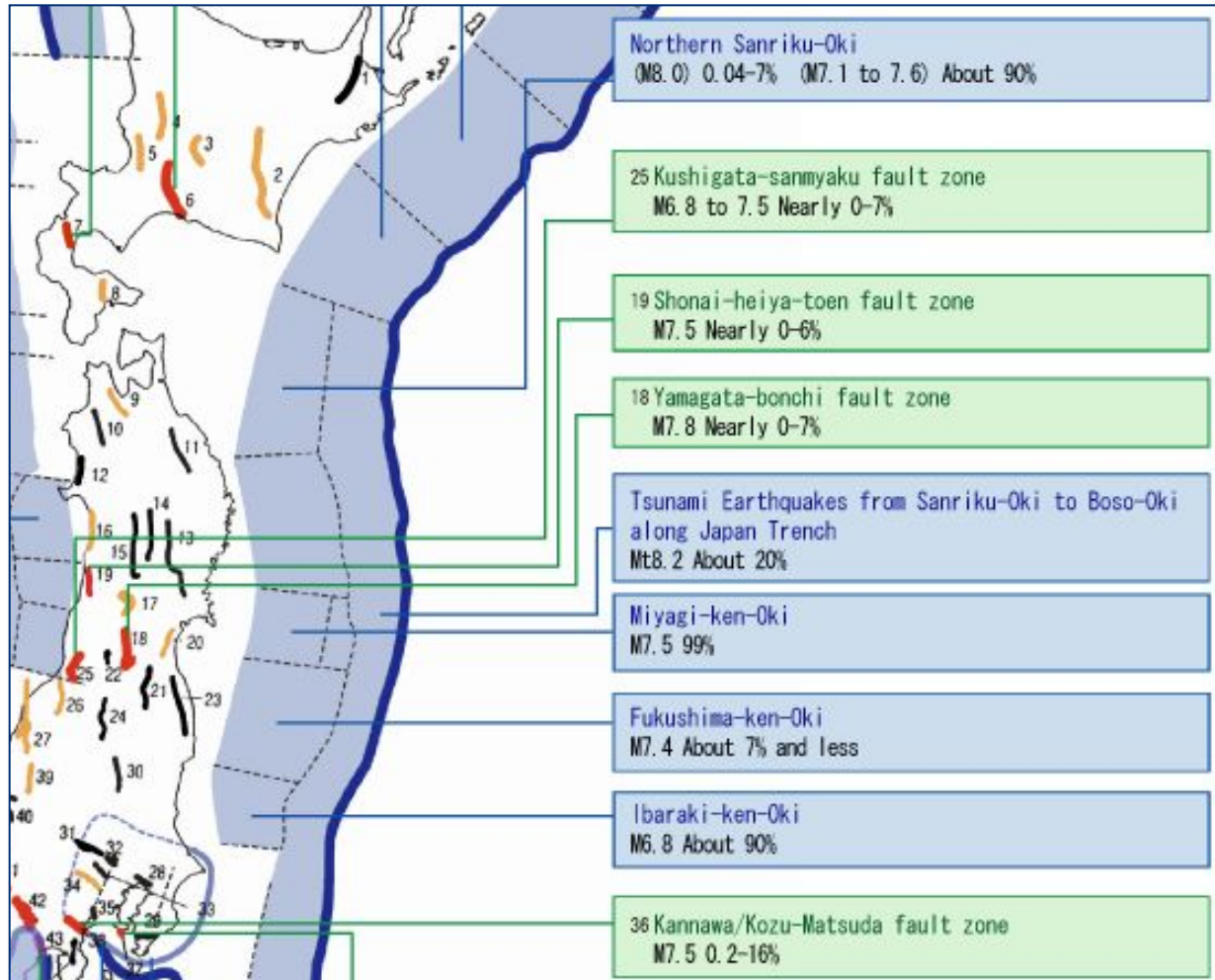
# Aktive Störungen in Japan

- Sehr detaillierte Beschreibung, die beste weltweit
- Maximalmagnitudo und Auftretenswahrscheinlichkeit für jedes Störungssegment bestimmt
- Subduktions- und Krustenstörungen werden verschiedenartig behandelt



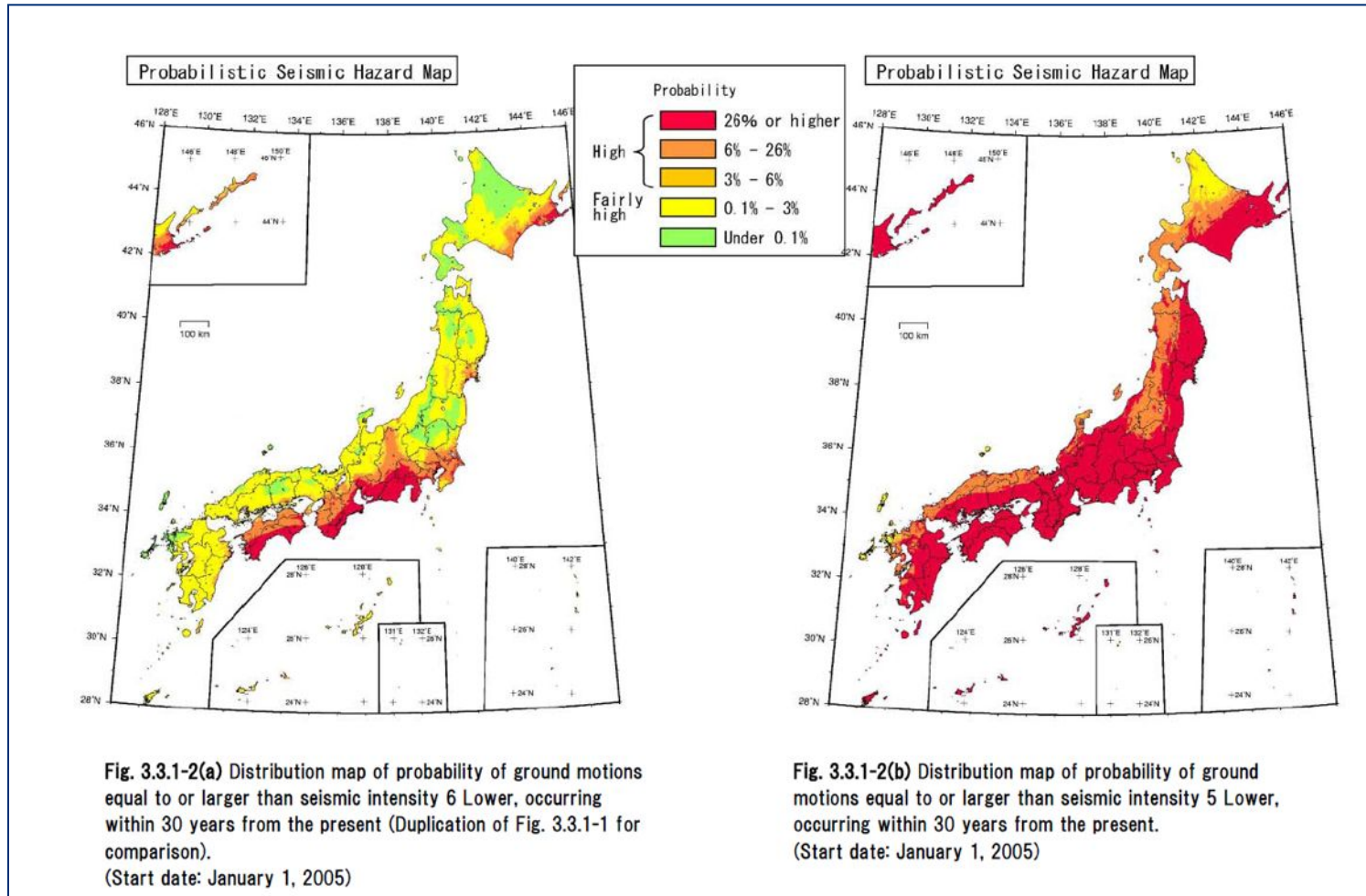


## Aktive Störungen in Japan: Pazifische Subduktion



Mmax 6.8-8.2 an verschiedenen Subduktionssegmenten,  
M9 allerdings nicht in Betracht gezogen

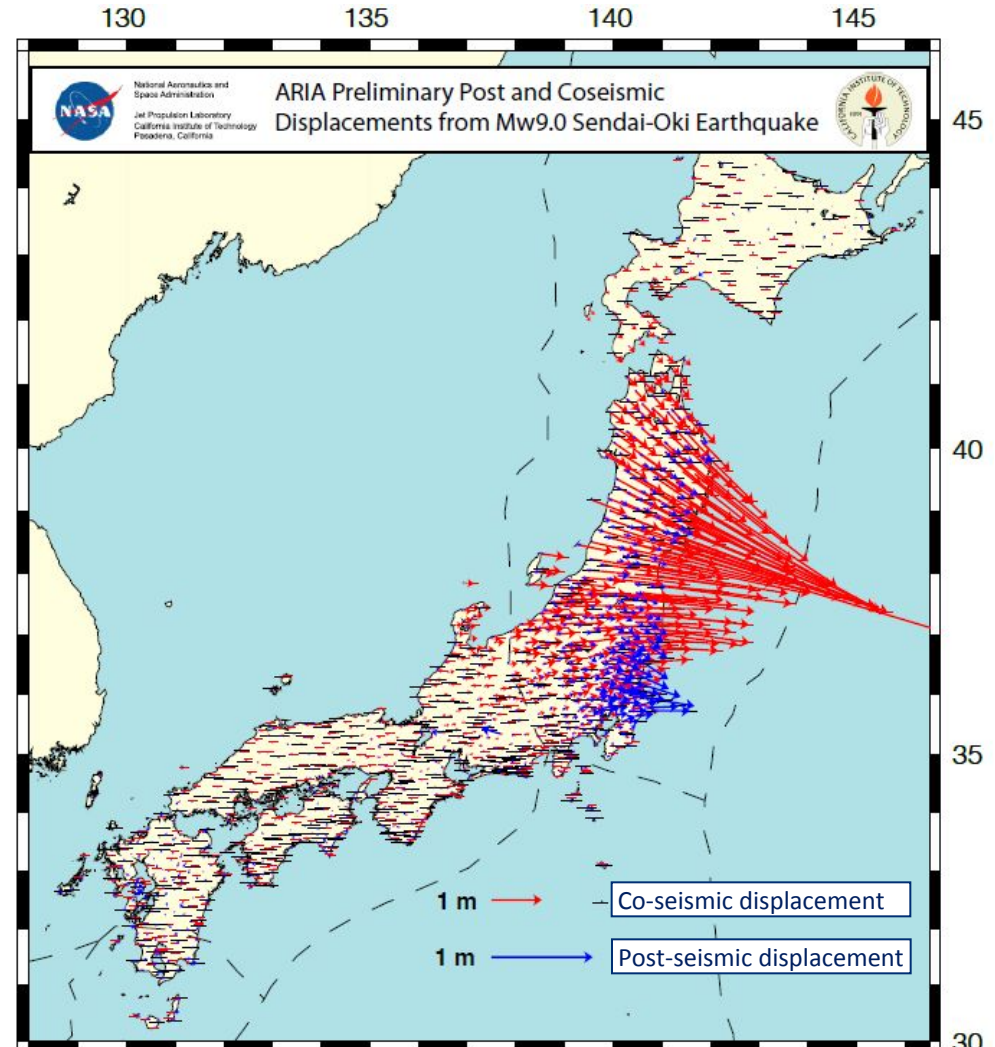
# Seismische Gefährdung in Japan



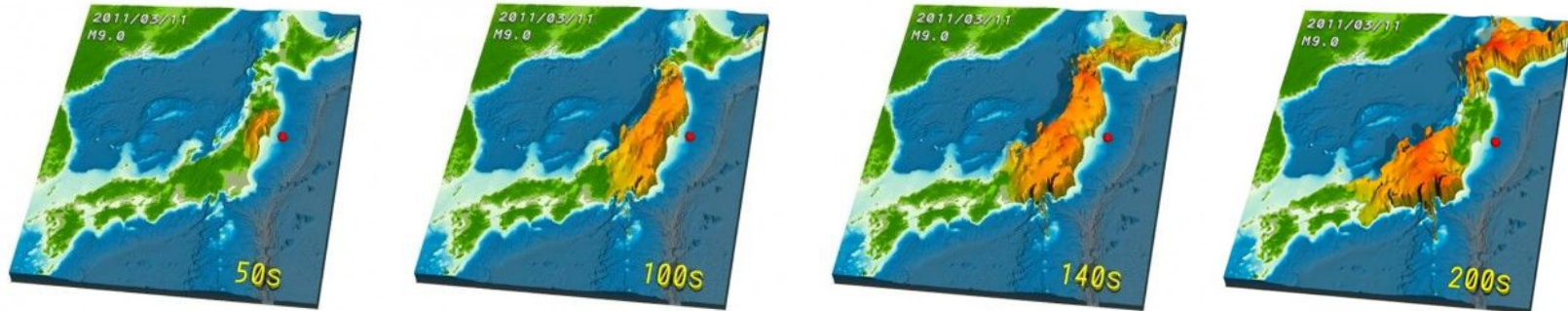
- Von der pazifischen Subduktion wird nicht erwartet, starke Erschütterungen (JSI 6-) zu verursachen (>80km Distanz zur Küste und Beschränkung von Mmax)

## Wie viel hat sich Japan verschoben?

- Seismische Verschiebung auf der Störung von bis zu 18 m
- Nord-Honshu bewegte sich während des Bebens um ca. 5 m in östliche Richtung, und nach dem Beben um weitere 0.5 m
- Die Rotationsachse der Erde verschob sich um ca. 10 cm

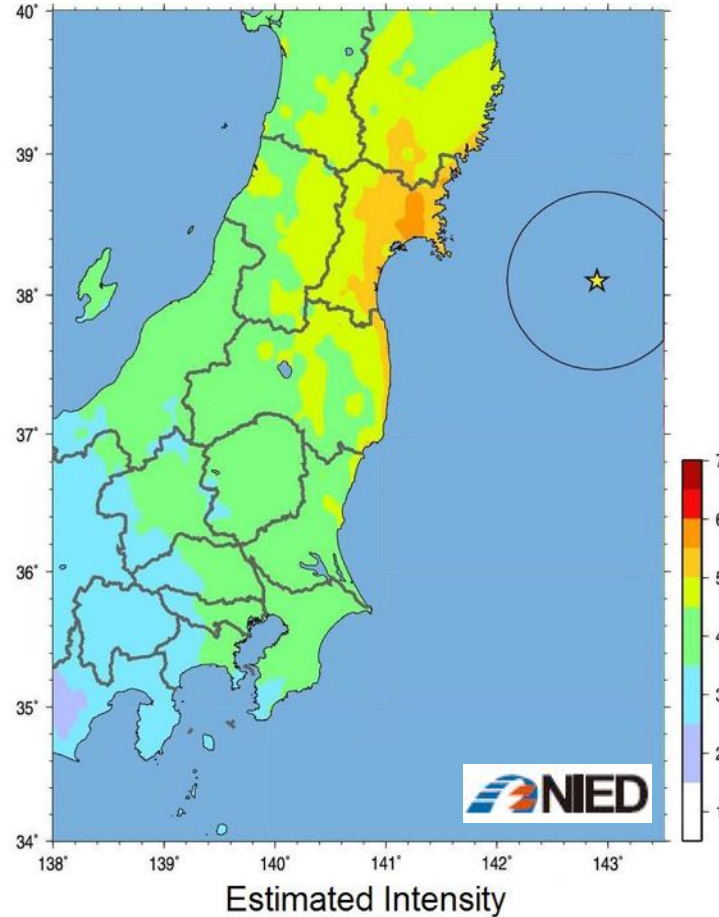
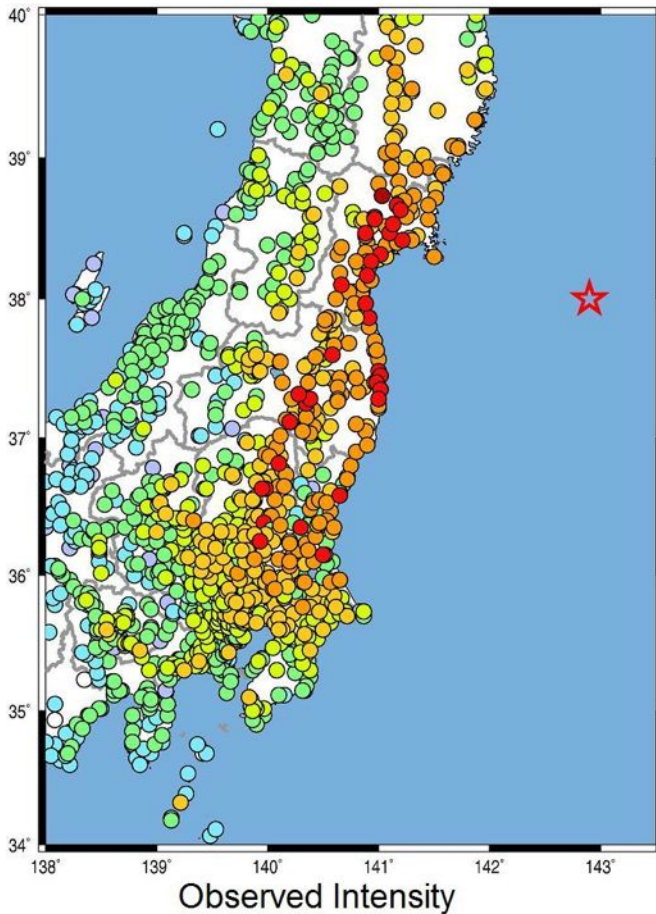


## Seismische Erschütterung



- Erdbebenbruch propagierte entlang des japanischen Grabens in Richtung Süden und dauerte ca. 150 Sekunden
- Die ersten seismischen Wellen erreichten die Küste nach ca. 20 Sekunden
- Starke Bodenerschütterungen dauerten bis zu 120 Sekunden
- Nach 100 Sekunden war ganz Nord-Honshu am beben
- Nach 200 Sekunden waren die starken Bodenbewegungen in Nord-Honshu beendet und die Erschütterungen breiteten sich Richtung Hokkaido und Süd-Honshu aus

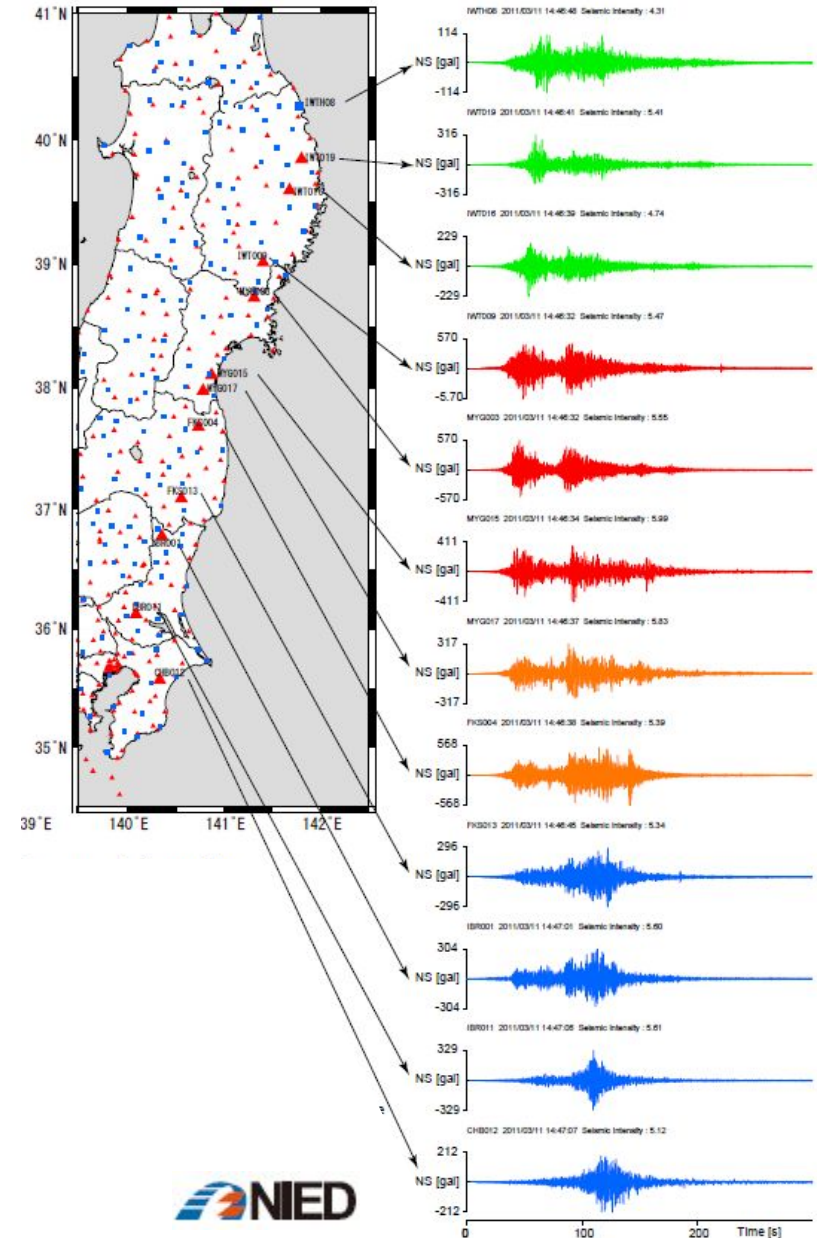
## “Strong motion” – Intensität (JSI)



- Beobachtete Werte von mehr als JSI 6 vor allem in küstennahen Gebieten, aber Rolle von Sekundäreffekten (Tsunami) sind noch unklar

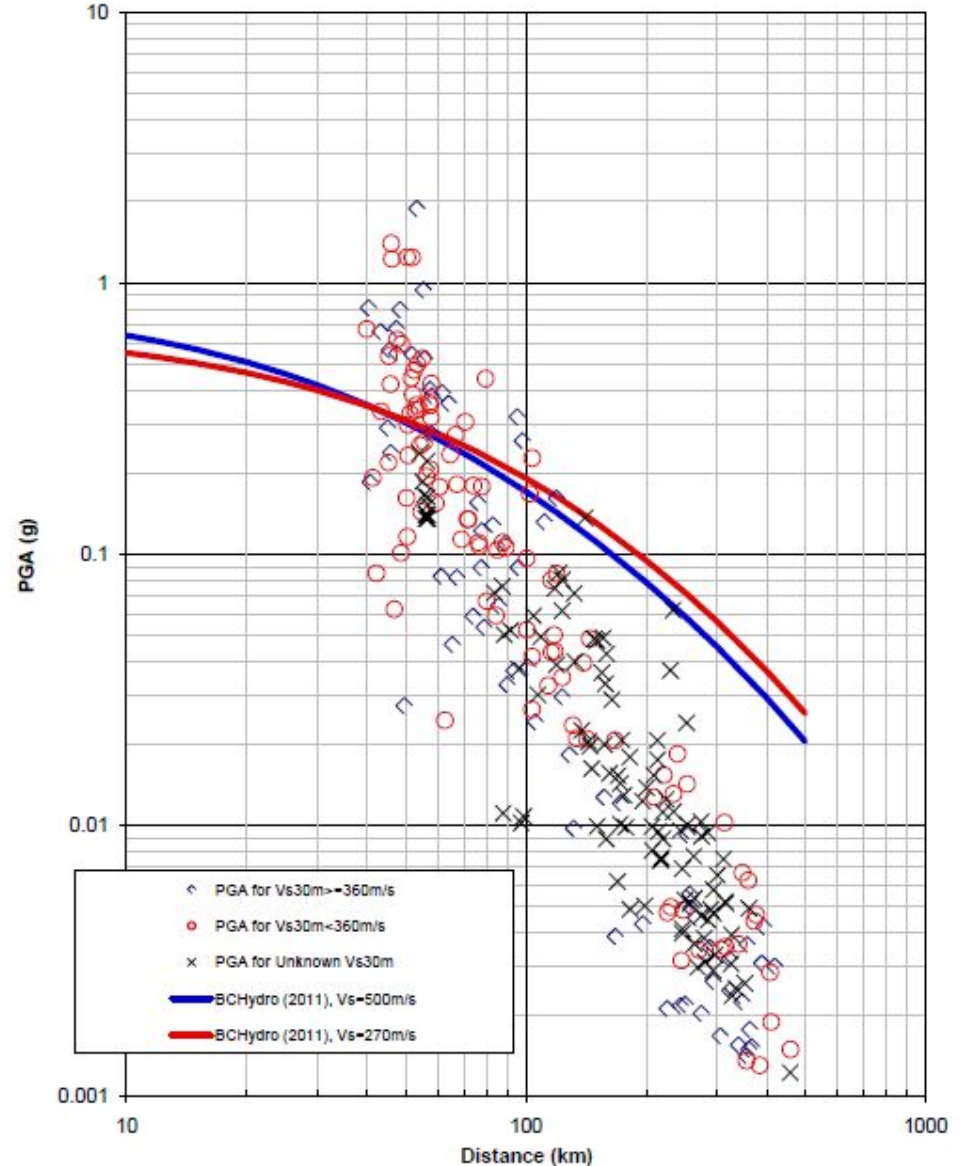
# Aufgezeichnete Bodenbewegungen

- Außergewöhnliche Datenabdeckung
- Konsistente Signale entlang von Honshu
- Maximalwerte im Bereich von 0.2-1.5g (für die nächstgelegene Station in 60-100 km Entfernung von der Störung)
- Sehr lange Dauer der starken Bodenbewegungen (bis zu 120 Sekunden)



# War die Erschütterung zu stark?

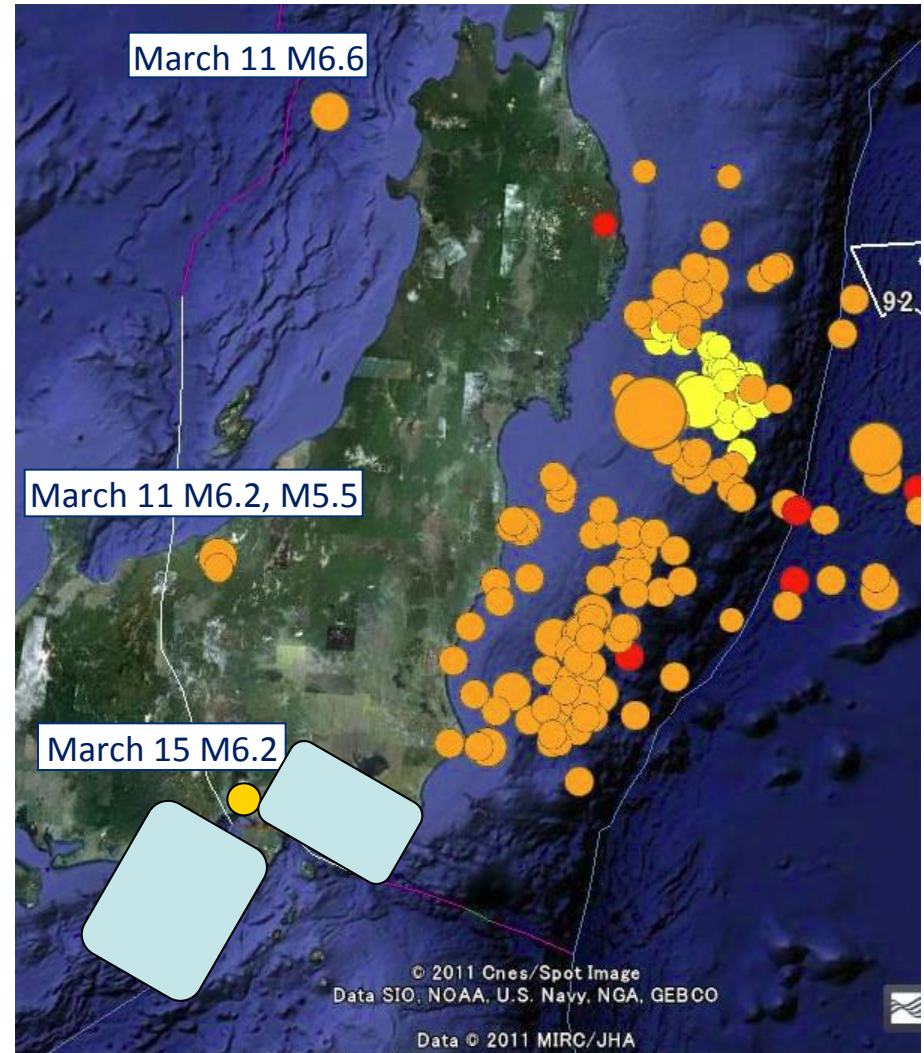
- Kleinste Distanz zur Störung:  
50-60km
- Maximalwerte im Bereich von  
0.06-1.2g
- Maximalwerte stimmen mit  
dem Modell eines M9  
Subduktionsbebens mit 60-100  
km Entfernung zur Bruchfläche  
überein
- Maximalwerte sind kleiner als  
Modellwerte für größere  
Entfernungen
- Räumliche Variabilität der  
Maximalwerte ist hoch (Faktor  
20), aber nicht unerwartet



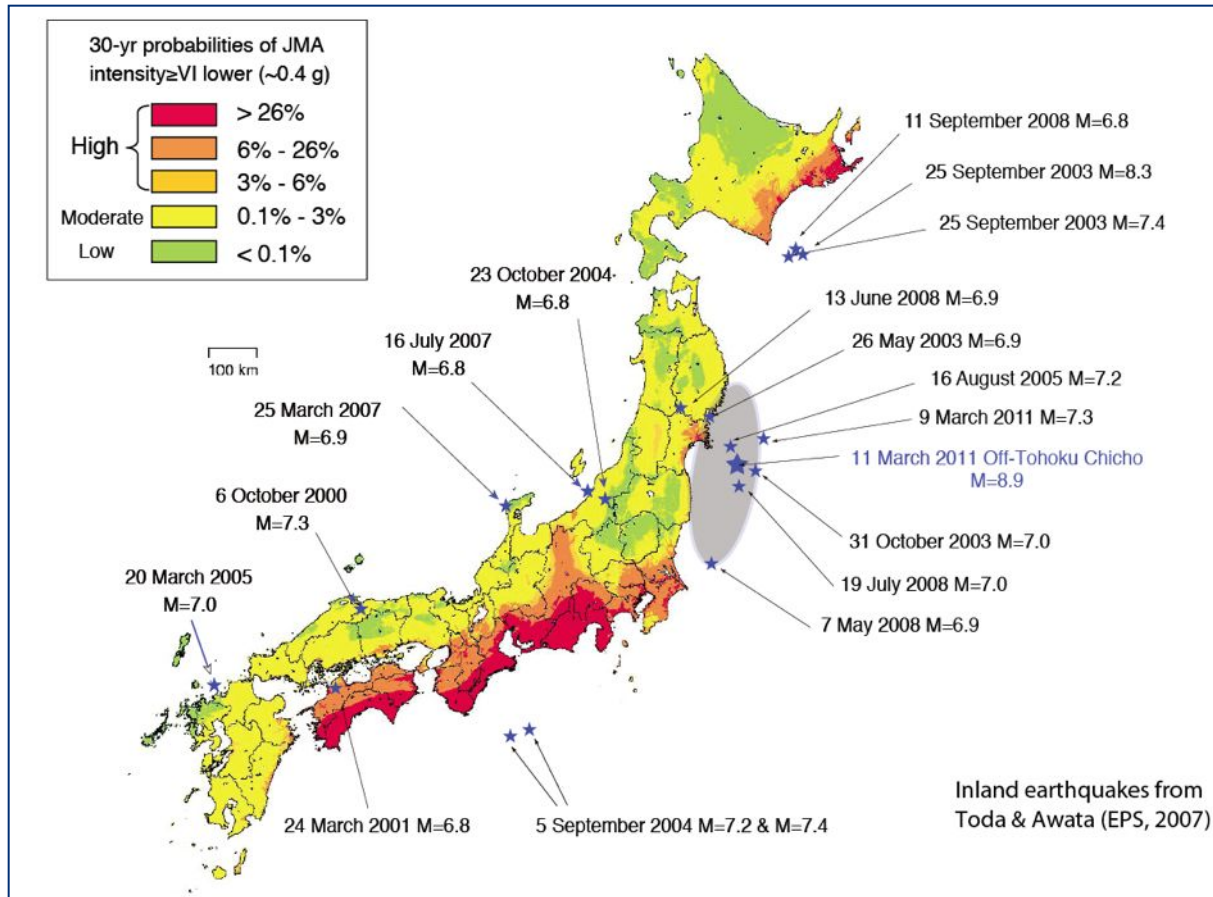


## Gefahr durch Nachbeben und ausgelöste Erdbeben

- Nachbeben in der gesamten Störungszone, das bisher stärkste mit M7.9
- Nachbeben werden weiterhin auftreten, M8+ in der Subduktionszone ist möglich, allerdings sollten von diese keine weitere Gefahr ausgehen
- Diverse Festland – Störungzonen wurden aktiviert, mit einem M6.6 Beben in Niigata (mit Tsunami-Alarm) und einem M6.2 Beben in Shizuoka (mit Alarm in Tokyo)
- Die Tokai und Nankai-Zonen haben sich noch nicht bewegt und stellen die größte Gefahr dar (Mmax 7.9 und 8.2, in der Nähe von Tokyo)



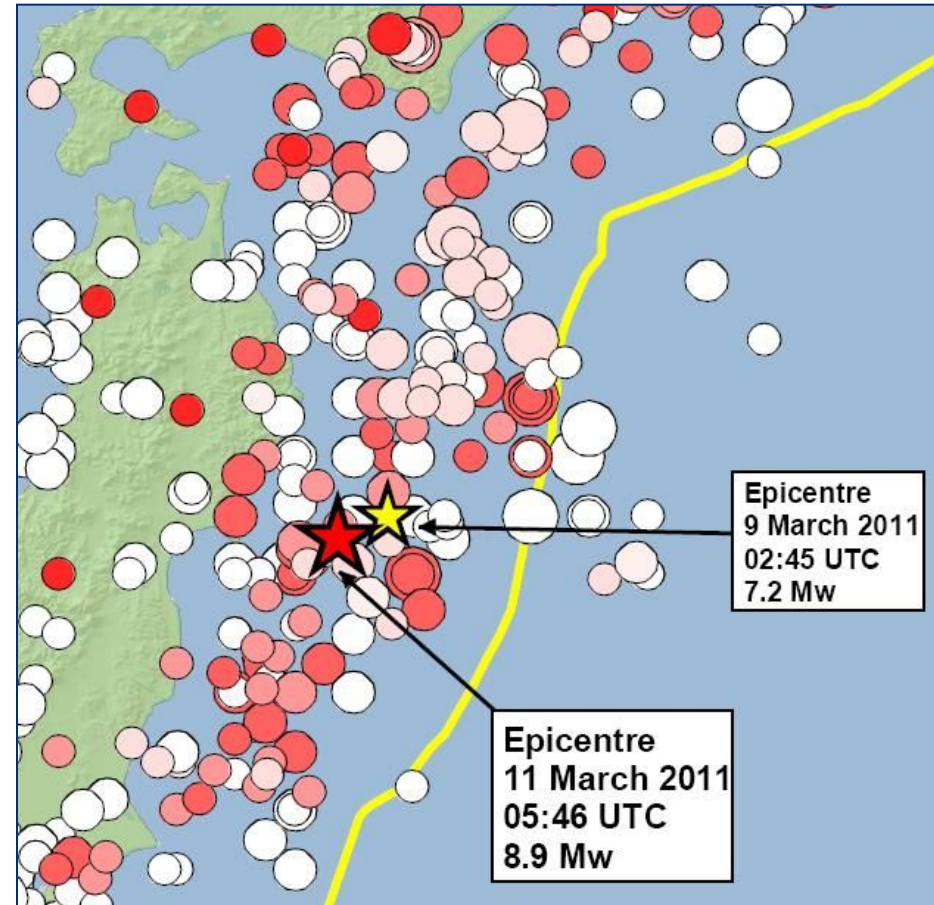
# War das Tohoku-Erdbeben zu erwarten?



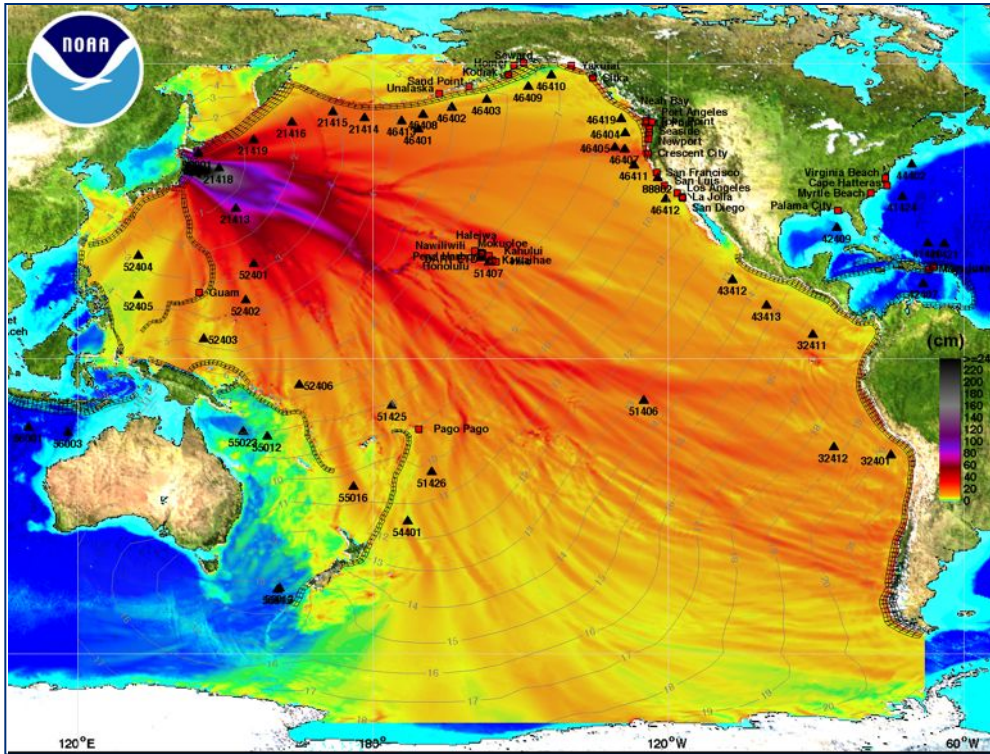
- Die meisten der M7+ Erdbeben der letzten 10 Jahre, das Tohoku M9-Beben eingeschlossen, lagen außerhalb der aktivsten Zonen
- Neben dem M9 Tohoku-Beben ereigneten sich in den letzten 10 Jahren zwei große Subduktionsbeben in Hokkaido (M8.3) und Nankai (7.4)

## War das Tohoku-Erdbeben vorhersagbar?

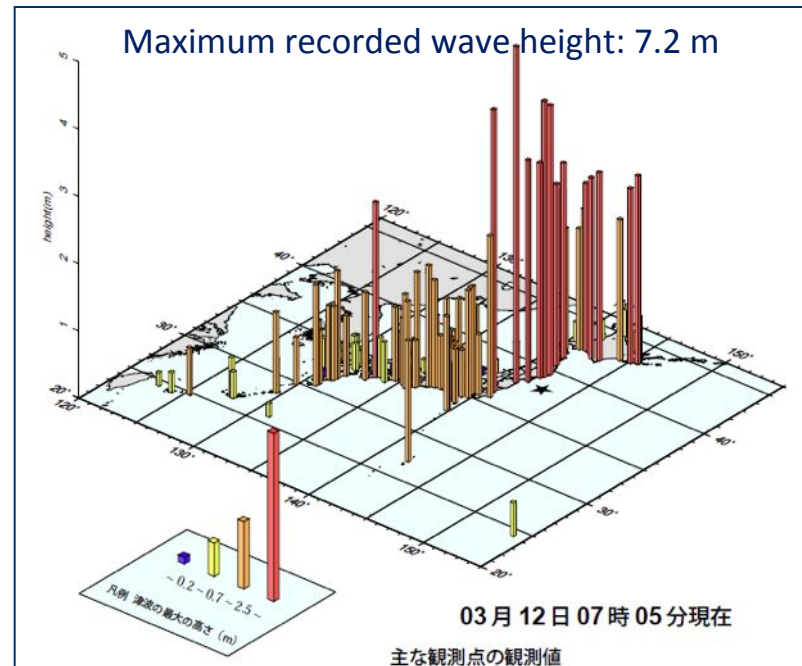
- zu früh für eine Antwort, es benötigt Zeit, die Daten zu analysieren
- Dem M9-Beben ging am 9. März ein M7.2-Beben voraus (in der Umgebung des Hypozentrums vom 11. März)
- Das M7.2 Beben wurde nicht als “Vorbeben” identifiziert, allerdings wurden 24 vergleichbare M7+ Beben am japanischen Graben im letzten Jahrhundert aufgezeichnet (eines alle 4 Jahre im Durchschnitt)
- Als Vorsichtsmaßnahme hätte das M7.2 Beben dazu genutzt werden können, kritische Infrastrukturen auf erhöhte Alarmbereitschaft zu setzen



# Tsunami

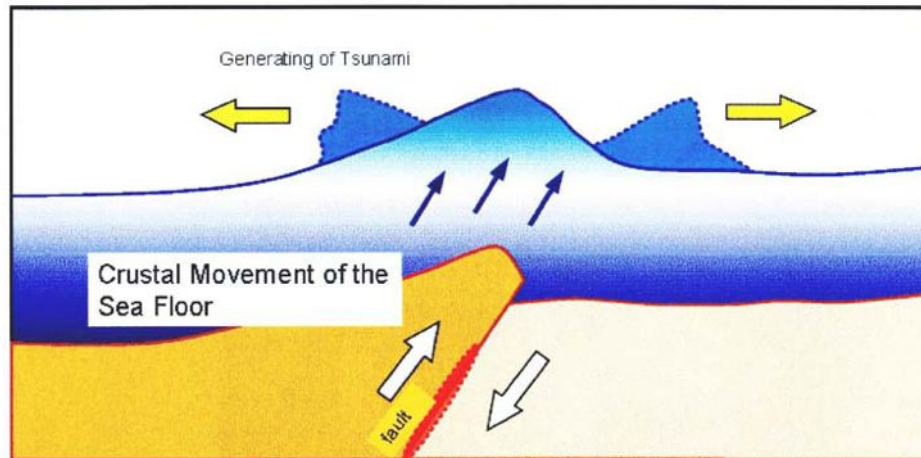


- Jedes bekannte M9 Subduktionsbeben verursachte einen starken Tsunami aber nur wenige M8 Beben produzieren einen signifikanten Tsunami
- Höhe und Ausdehnung des Tsunamis war für ein M9 Beben nicht außergewöhnlich

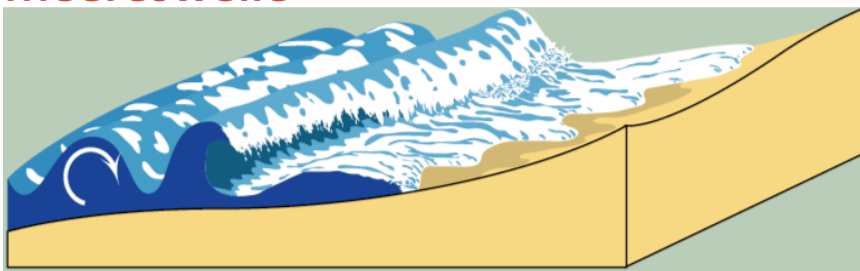


# Tsunami-Entstehung

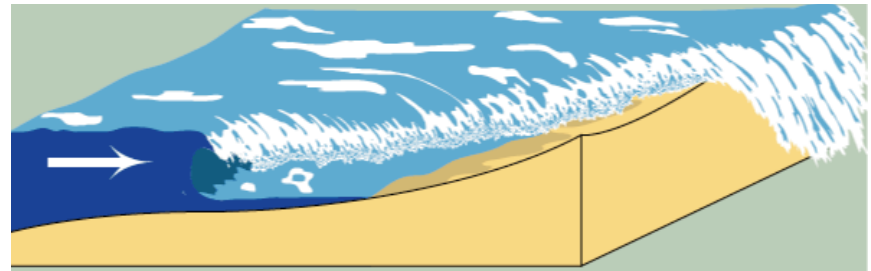
- Der Tsunami wird durch die durch ein Erdbeben bedingte Verschiebung des Ozeanbodens erzeugt
- Dem Tsunami gehen Wellen voraus, er wirkt allerdings eher wie eine Tide; der Wasserstand bleibt für 15-20 Minuten sehr hoch und das Wasser dringt tief ins Landesinnere vor



Meereswelle



Tsunami

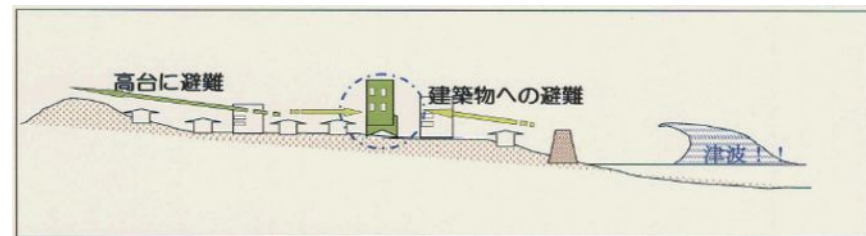




# Tsunami –Geschichte und Vorsichtsmaßnahmen in Japan

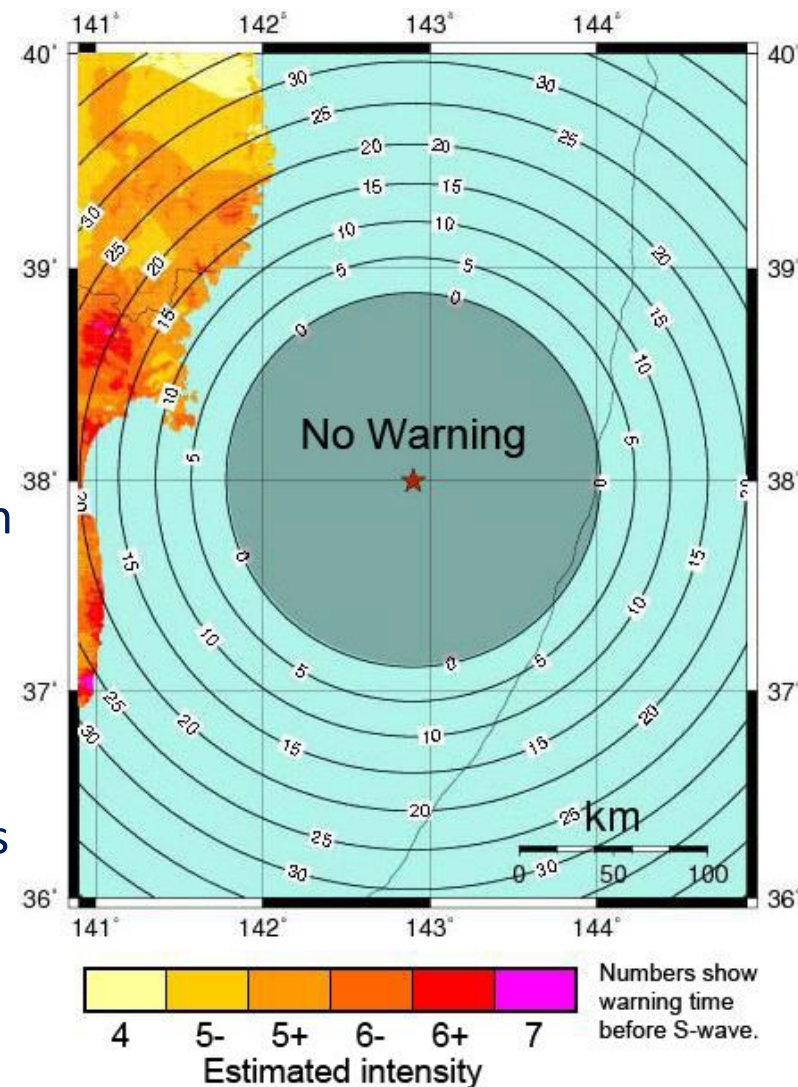
Wissenschaft und Ingenieurkunst für Tsunami-Schutzmaßnahmen sind in Japan entstanden und sind in einem Maße umgesetzt wie nirgendwo sonst weltweit

Year	Name of Earthquake	Max Wave Height (m)	Dead and Missing
684	Nankai	-	Many
1896	Meiji Sanriku	38.2	22,000
1933	Sanriku	28.7	3,064
1944	Tonankai	9	1,223
1946	Nankai	6.5	1,432
1960	Chile	8.1	142
1964	Niigata	4.9	26
1983	Nihonkai Chubu	13	104
1993	Hokkaido Nansei-oki	31.7	230



## Frühwarnung und Alarmierung

- Warnung und Alarmierung haben gut funktioniert
- Eine Erdbeben-Frühwarnung wurde 8 Sekunden nachdem die ersten Erdbebenwellen die Küste erreichten an Infrastrukturen (AKWs, Shinkansen, Tsunami-Hafenschutz, ...) weitergegeben; 20-60 Sekunden Vorwarnzeit waren möglich
- Tsunami-Wellen trafen erst 30-50 Minuten nach dem Erdbeben und dem Alarm an der Küste ein
- Direkte Erdbebenschäden waren nicht gross und behinderten die Tsunami-Evakuierungen nicht
- Zu viele Tsunami-Warnungen in den letzten Jahren haben eventuell ein falsches Sicherheitsgefühl verursacht





## Erkenntnisse aus dem Tohoku-Erdbeben

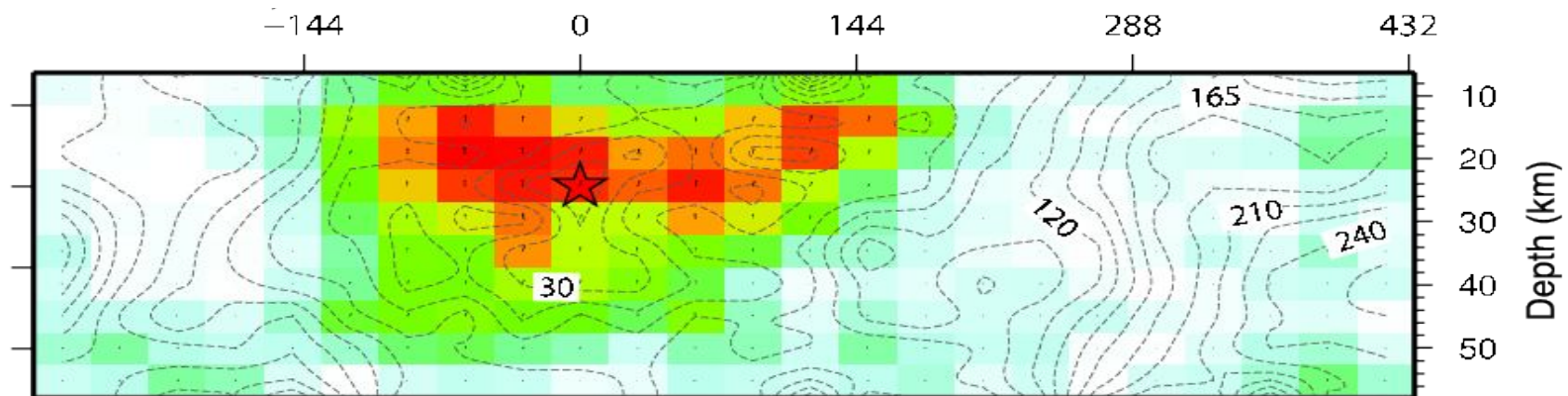
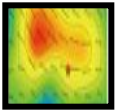
- Die Maximalmagnitude der Erdbeben am japanischen Graben wurde von japanischen Wissenschaftler unterschätzt; ein M9 Beben kann am japanischen Graben bei einer Plattenkonvergenz von 8 cm/Jahr nicht als Ausnahme angesehen werden; ein M9 Beben mit Verschiebungen von 18m ist alle paar Jahrhunderte zu erwarten.
- Die durch das Beben verursachte Erschütterung stimmt mit den Erwartungen für ein M9 Beben überein, und ist nicht viel stärker als im Falle eines M8 Bebens.
- Die Amplitude und Ausdehnung der Tsunami-Welle waren für ein M9 Beben nicht überraschend.
- Die seismischen Erschütterungen haben keine großen Schäden verursacht (gute Baunormen, gute Vorbereitung, gegebene Distanz zur Störung). Die Schäden kamen durch den Tsunami, welcher die erwartete Höhe und die Vorsichtsmaßnahmen entlang der langen Küstenlinie überschritt.



# Vergleich der beiden Beben: seismische Quelle

Ein M9 Beben setzt das 20.000-fache an Energie frei als ein M6.3 Beben. Das hängt von der Größe der Störung und von der Stärke der Verschiebung ab.

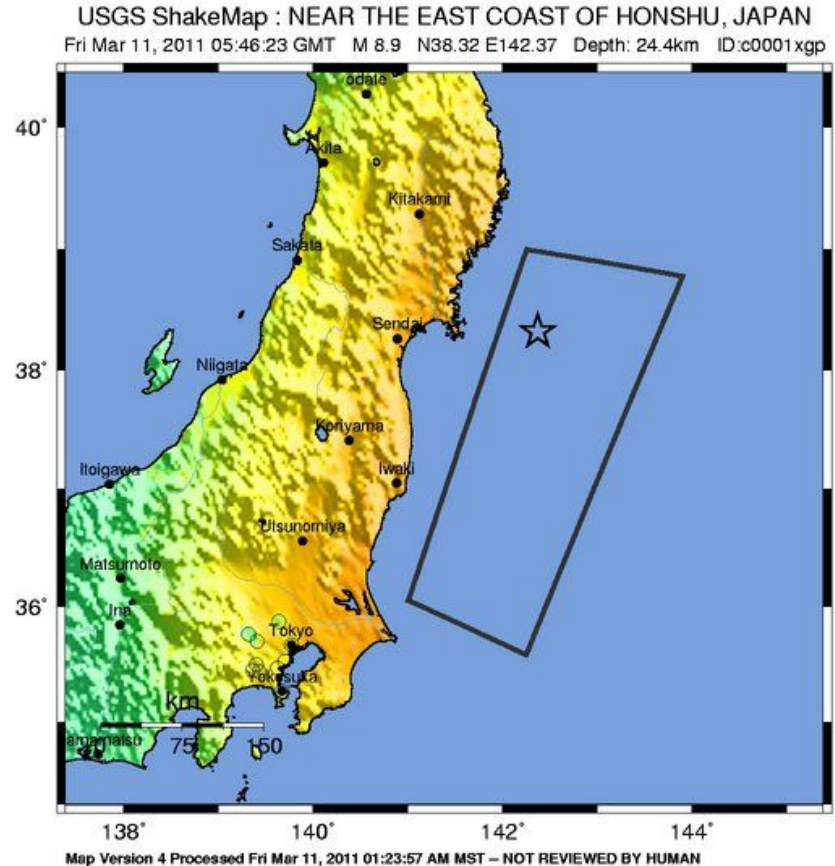
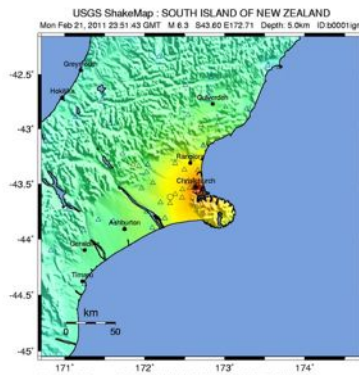
Christchurch: M6.3, Verschiebung 1m, Quellregion 30\*10km



Tohoku: M9, Verschiebung bis zu 18m, Quellregion 300\*40km

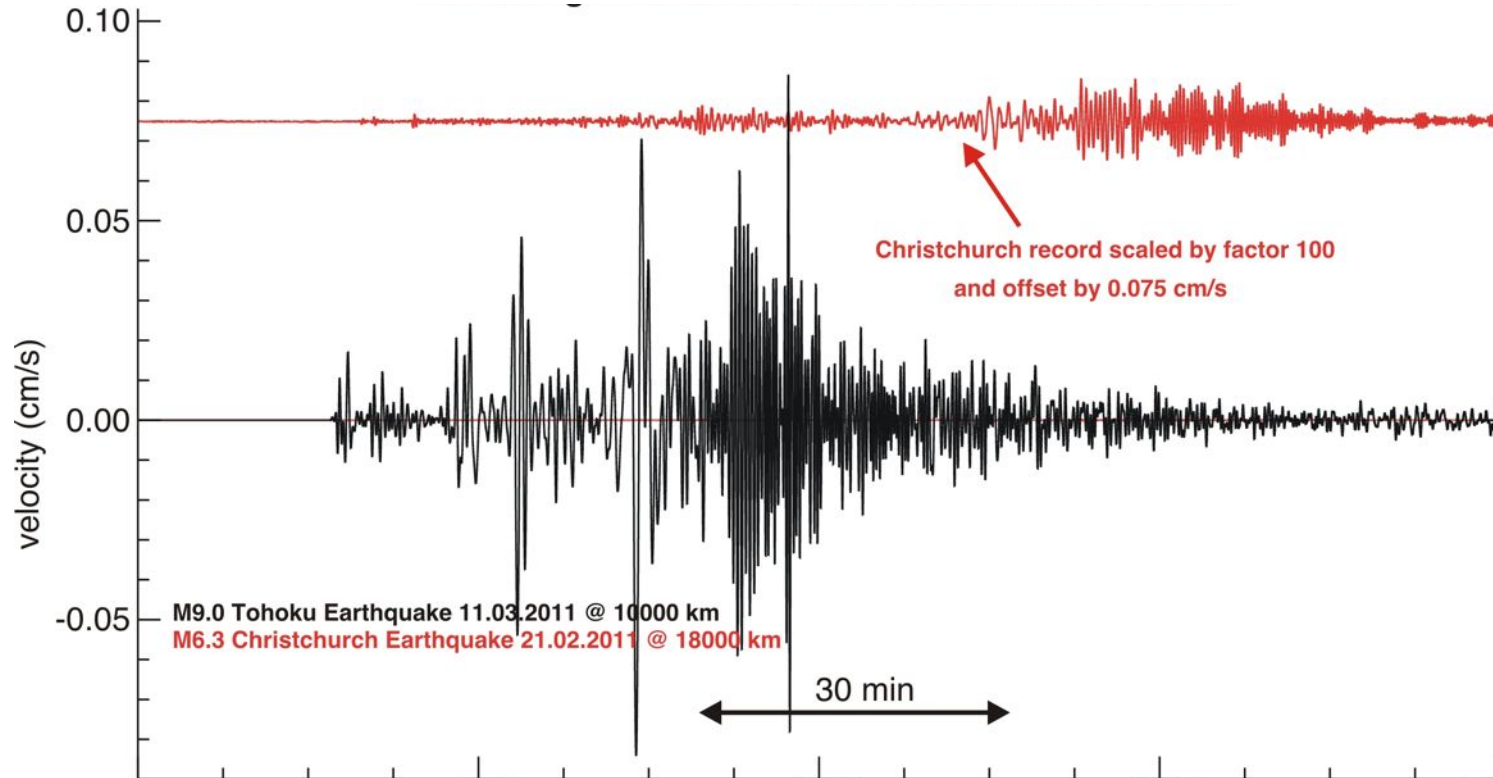
# Vergleich der beiden Beben: betroffene Oberfläche

- Das Gebiet starker Erschütterungen war  $\sim 5 \times 5 \text{ km}^2$  für das M6.3 Christchurch-Erdbeben und ca.  $400 \times 100 \text{ km}^2$  für das M9 Tohoku-Erdbeben (1600-mal größer)



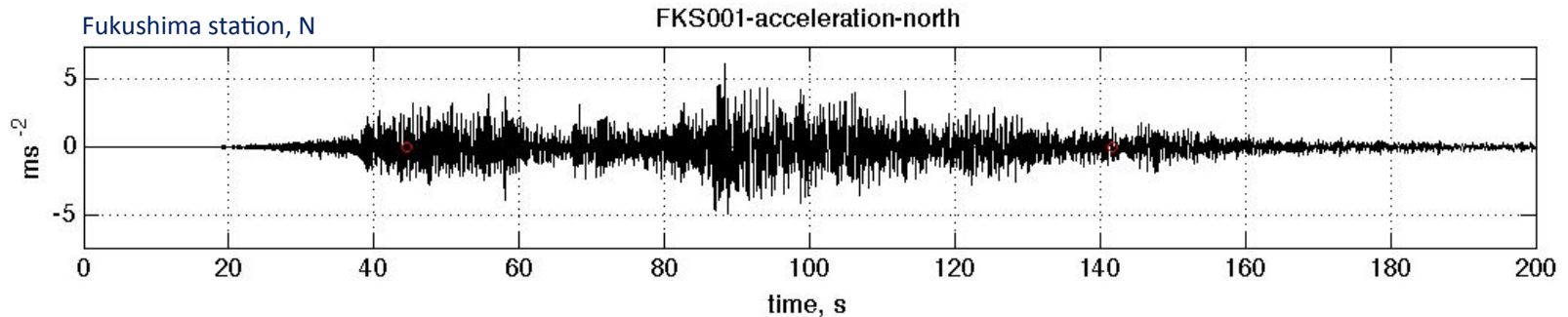
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	< 0.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

## Vergleich der beiden Beben: seismische Signale in Zürich

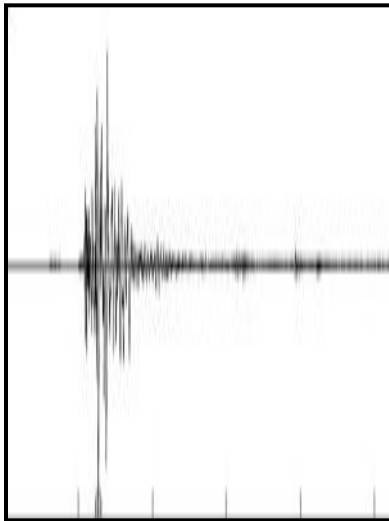


- Beide Beben wurden gut in der Schweiz aufgezeichnet; im Falle des Tohoku-Bebens bewegte sich die Schweiz für mehr als eine Stunde um 2 cm nach oben und unten
- Die seismischen Wellen des M9 Tohoku-Bebens werden noch Wochen um die Erde wandern

# Vergleich der beiden Beben: seismische Signale aus naher Distanz



Heathcote school, Z



- Tohoku M9: 70 km Distanz, Maximalbeschleunigung 0.4g, 120 Sekunden Dauer
- Christchurch M6.3: 2km Distanz, Maximalbeschleunigung 1.5g, 8 Sekunden Dauer
- Obwohl die Magnitude viel geringer war, waren die maximalen Bodenbeschleunigungen in Christchurch höher als beim Tohoku-Beben (bedingt durch die geringe Distanz)



# AKW-Sicherheit in Japan: das M6.6 Niigata-Erdbeben von 2007

- Im Jahr 2007 beschädigte das M6.6 Niigata-Beben das Kashiwasaki-Kariwa TEPCO AKW, das größte Kraftwerk der Welt
- Das Beben verursachte maximale Bodenbeschleunigungen von 0.67 g und weiträumige Deformationen, zerstörte Straßen und Wasserleitungen
- 5 der 7 Reaktoren sind immer noch nicht am Netz und müssen höchstwahrscheinlich ersetzt werden
- Die Reaktorkerne wurden durch die Erschütterung nicht beschädigt, allerdings waren die Schäden in der Umgebung des AKWs so stark, dass das Kraftwerk nicht weiter einsatzbereit war
- Nach diesem Beben erhöhte die japanische Regierung den Referenzwert für den Bau Nuklearanlagen von 0.25g auf 2g
- Im Jahr 2008 wurden in Zentraljapan zwei kleinere AKWs durch Erdbeben beschädigt.



# AKW-Sicherheit in Japan: das Tohoku M9-Erdbeben 2011

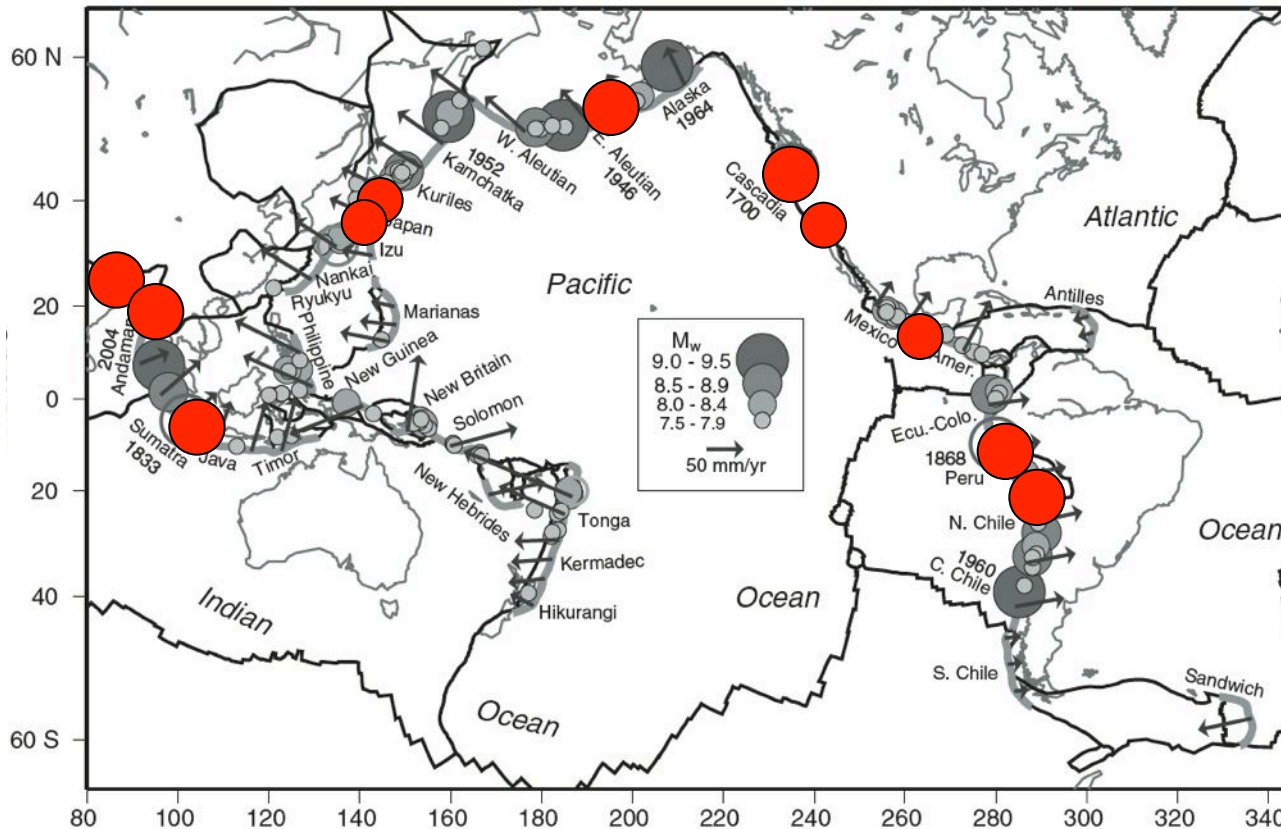


- Die katastrophalen Folgen des Tohoku-Erdbebens dauern noch immer an, und Informationen fließen nur spärlich
- Das Beben verursachte maximale Bodenbeschleunigungen von 0.3-0.5 g in den AKWs; diese Werte liegen innerhalb der Spezifikationen; es wird davon ausgegangen, dass es dadurch keine oder nur minimale Schäden gegeben hat
- In allen AKWs (11 Reaktoren) hat die Notabschaltung erfolgreich rechtzeitig funktioniert
- Das Kraftwerk war gegen Tsunamis geschützt; dennoch wurde der Notfalldieselmotor überflutet und der Hauptdieseltank des Notfallgenerators weggespült (befand sich außerhalb des geschützten Gebietes)
- Das Daiichi-Kraftwerk ist nach 6 Tagen immer noch ohne Strom und entsprechendem Kühlungssystem (aufgrund der grossen Tsunami-Schäden)



# Erwartete zukünftige starke Erdbeben

Erdbebenvorhersage ist noch nicht möglich, aber die Aufmerksamkeit konzentriert sich in Regionen, in denen “seismische Lücken” identifiziert wurden (Costarica, Nankai, Peru, California, Aleutians, Cascadia), oder die durch kürzliche starke Erdbeben “aktiviert” wurden (SE Sumatra, Burma und Assam nach dem Andaman-Seebeben 2004; Tokai nach dem Tohoku-Beben 2011)





## 10 Rückschlüsse für die Schweiz

1. M9-Beben oder die Art starker Bodenbewegungen wie sie das Tohoku-Beben verursacht hat sind in der Schweiz nicht möglich.
2. M6.3-Beben wie das Christchurch-Erdbeben sind möglich und werden in der Schweiz alle 80-100 Jahre erwartet. M6-Beben sind die Hauptbeiträge für schweizer Gefährdungskarten für normale Gebäude; M6.5-7 - Beben sind die Hauptbeiträge für die Gefährdung von kritischen Infrastrukturen.
3. Die Bewegungen, die während des Christchurch-Erdbebens auftraten, überstiegen zum grossen Teil die Parameter der schweizer Baunormen. Wir sollten eine Erhöhung der Sicherheitsniveaus in den Baunormen von 475 auf 1000 Jahre Wiederkehrperiode in Betracht ziehen, zumindestens für urbane Gebiet.
4. Die Erdbeben-Baunormen in Japan und Neuseeland haben sich gut bewährt, mit minimalen Schäden an neuen Gebäuden; der "Swisscode SIA261" sollte dringend für alle schweizer Kantone bindend werden (mit entsprechender Überprüfung).
5. Die freie Verfügbarkeit von Daten hoher Qualität und Dichte ist der Schlüssel für das Verständnis komplexer Ereignisse wie z.B. den Christchurch- und Tohoku-Erdbeben; die Schweiz sollte aktiv die Installation von Messstationen und Frühwarnsystemen in Städten und in der Nähe von kritischen Infrakstrukturen (AKWs, Dämme, Geothermie-Projekte, Gebäude) vorantreiben.





## 10 Rückschlüsse für die Schweiz

6. Wir sollten eine konservativere Herangehensweise im Falle seltener, extremer Erdbeben wählen; auf Grundlage von Rückschlüssen aus Neuseeland (unidentifizierte Störung) und Japan (unidentifiziertes Potenzial eines M9-Bebens).
7. Schweizer Seen haben eine Geschichte zerstörerischer Tsunamis (z.B. Luzern 1601), welche nie angemessen in Betracht gezogen wurde; eine umfassende Gefährdungs- und Risikoanalyse für städtische Gebiete an schweizer Seen ist erforderlich.
8. Das von Durchbrüchen an die Oberfläche und möglichen tiefen Scherzonen ausgehende Risiko muss noch bewertet werden.
9. Die großen Schäden an wichtigen japanischen Infrastrukturen (AKWs, Dämme, Häfen, Kommunikation, ...) bestätigen die intrinsische Verwundbarkeit moderner Gesellschaften; umfassende “end-to-end” Risikoabschätzungen sind erforderlich um das Niveau des seismischen Risikos für kritische Infrastrukturen in der Schweiz zu verifizieren.
10. Der wirtschaftliche Schaden von 13 Milliarden\$, der durch das M6.3 Christchurch-Erdbeben entstanden ist, verdeutlicht die dringende Notwendigkeit, das wirtschaftliche Risiko zu bewerten, und die Installation geeigneter finanzieller Mechanismen voranzutreiben (z.B. obligatorische Versicherungen), um seltene katastrophale Ereignisse in der Schweiz abzudecken.