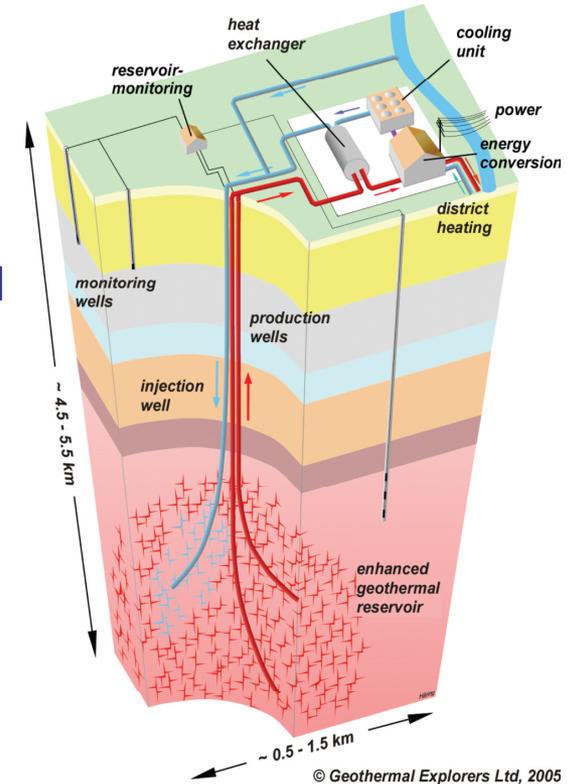


Abschluss-Workshop MAGS-Projekt 17.9.2013

**Einzelprojekt EP 4:**

**Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung**



Jürgen Kopera, Wilhelm Morales-Avilés,  
Jörg Schlittenhardt & Thomas Spies

BGR Fachbereich B4.4

Arbeitsbereich: Ingenieurseismologische Gefährdungsanalysen

## Ziele von EP 4

- Bewertung der seismischen Gefährdung an Geothermie-Standorten aufgrund der natürlichen (tektonischen) Seismizität
- Ermittlung und Bereitstellung von Abnahmebeziehungen für seismische Amplituden bei sehr flachen seismischen Quellen in der Nähe von Geothermiebohrungen
- Entwicklung und Bereitstellung von Verfahren für probabilistische Gefährdungsanalysen im Fall induzierter Seismizität
- Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität und der möglichen Erhöhung der gesamten seismischen Gefährdung aus natürlicher und induzierter Seismizität
- Schlussfolgerungen für die Erstellung einer Richtlinie für die Bewertung induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung

## Die Arbeitspakete (AP) von EP 4

- AP 1: Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund natürlicher Seismizität, Literaturrecherche
- AP 2: Ableitung von Abnahmebeziehungen für seismische Amplituden und Intensitäten
- AP 3: Zusammenstellung der Seismizitätsparameter für induzierte Ereignisse
- AP 4: Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse (PSHA) für induzierte Seismizität
- AP 5: Vergleich der Gefährdung natürlicher und induzierter Seismizität

## Die ausgewählten Pilot-Standorte

- Basel – Oberrheingraben: Daten aus Literatur
- Landau – Oberrheingraben: Daten von EP1
- Unterhaching – Bayrische Molasse: Daten von EP2

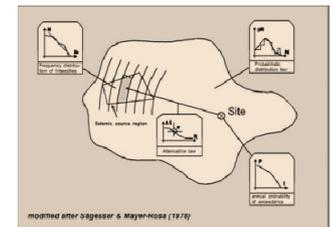
## Vertiefte Zusammenarbeiten von EP 4 mit anderen EPs in MAGS

- EP 1 – Seismischer Katalog seismisches Netzwerk Landau, Auswertung der Amplituden- und Magnitudeninformationen
- EP 2 - Seismischer Katalog seismisches Netzwerk Unterhaching, Auswertung der Amplituden- und Magnitudeninformationen
- EP 6 – Zusammenarbeit bei der Bewertung von Ergebnissen numerischer Modellberechnungen, insbesondere Magnitudenberechnungen

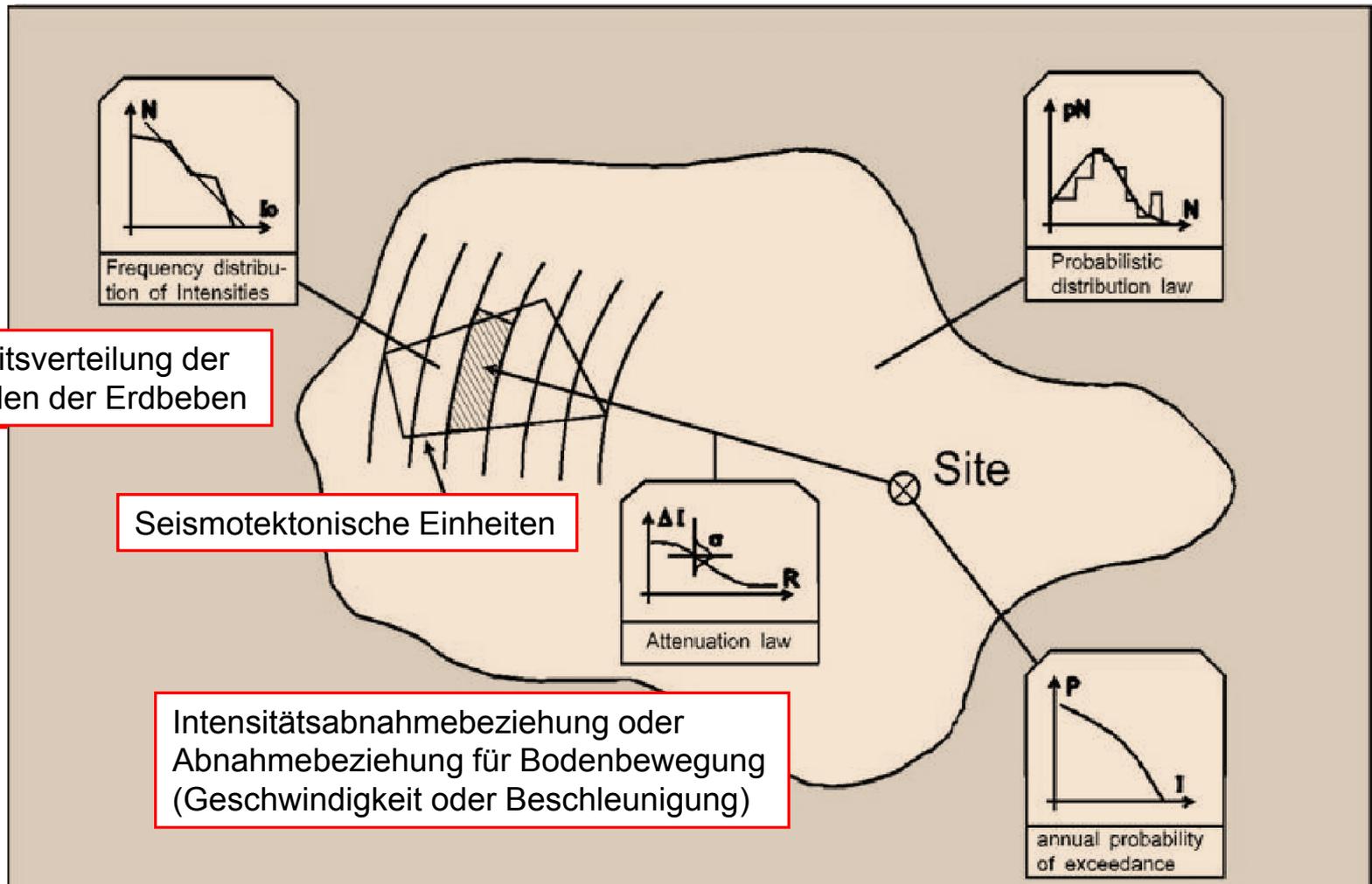
# Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse

Einsatz der Methode war Schwerpunkt der Arbeiten in EP4,

- da Bedeutung der Methode im Vergleich mit deterministischen Methoden heute weitaus höher
- mit der Methode die Vorgehensweisen einschlägiger Regelwerke bei dynamischen Beanspruchungen im Bauwesen übertragen und kombiniert werden können:
  - DIN 4149 ‚Bauen in Erdbebengebieten‘ enthält eine Erdbebenzonenkarte als Ergebnis einer probabilistischen Analyse für Überschreitenswahrscheinlichkeiten von rund 0.002 /a und
  - DIN 4150 ‚Erschütterungsmessungen‘ enthält Grenzwerte für Eintreten von Bauschäden und Angaben zur Fühlbarkeit



# Folie vom MAGS Kickoff Workshop 2010: Prinzip der probabilistischen Gefährdungsanalyse für natürliche Seismizität



modified after Sägesser & Mayer-Rosa (1978)

**Ergebnis, hier für Intensitäten: Anzahl von Ereignissen  $> I$  pro Jahr als Funktion der Standortintensität  $I$**

# Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse für induzierte Seismizität bei tiefer Geothermie (AP2, AP3, AP4)

## Skizze

Geothermisches Kraftwerk und Tiefbohrung(en)

Ort der Einwirkung

Abnahmebeziehung für die seismischen Amplituden, hier maximale Bodenschwinggeschwindigkeit (,PGV')

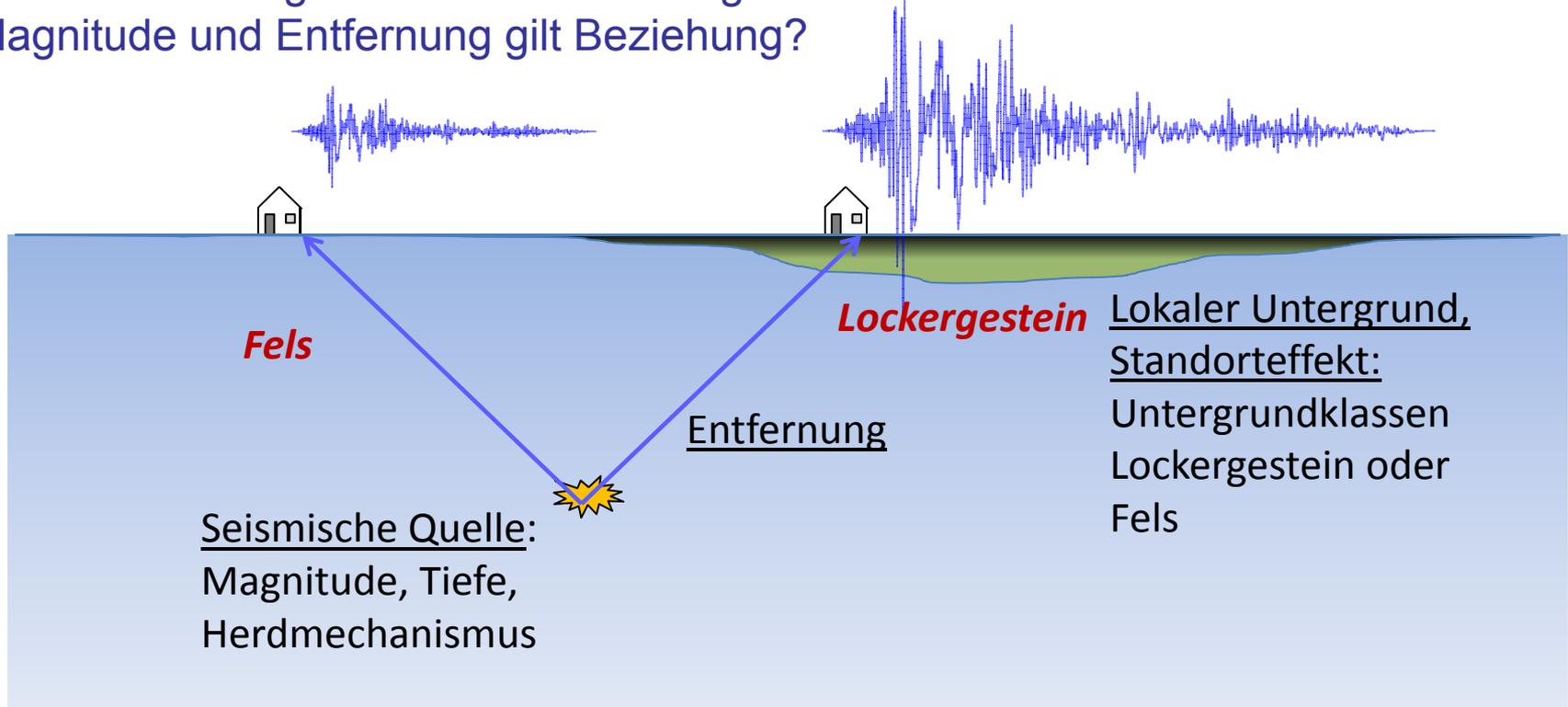
Seismisch Quellzone(n): räumlich homogen verteilte Aktivität(en) in quaderförmigen Volumina, um Bohrloch oder/und in Entfernung vom Bohrloch

## Verfahren

- Quaderförmige seismische Quellvolumina an Bohrung und/oder entfernt von Bohrung(en) (Input für Berechnung)
- Seismische Aktivitätsparameter aus seismischen Katalogen aus Standortüberwachung, evtl. aus Literatur (Input für Berechnung)
- Verwendung von Abnahmebeziehungen der Amplituden der Bodenschwinggeschwindigkeit PGV, siehe DIN4150 (Input für Berechnung)
- Berechnung mit Programm EZFRISK: am Markt verfügbar, geprüft, eigener Benchmark

# Auswahl und Test geeigneter Abnahmbeziehungen der Amplituden der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit – AP2

- Relation zwischen den seismischen Amplituden und den Eigenschaften der seismischen Quelle, der Entfernung und dem Einfluss des Standorteffekts
- Überwiegend empirisch ermittelt aus Strong-Motion-Seismogrammen
- Für Anwendungen ist zu berücksichtigen: Für welche Bereiche von Magnitude und Entfernung gilt Beziehung?



## Auswahl und Test geeigneter Abnahmbeziehungen der Amplituden der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit PGV – AP2

- Typische funktionale Form einer Abnahmebeziehung:  
$$\log \text{PGV [m/s]} = a + b \cdot M - c \cdot M^2 - d \cdot \log(R) + e \cdot S \pm \sigma$$

PGV - Peak Ground Velocity, max. Schwinggeschwindigkeit, siehe DIN 4150!

M - Magnitude

R - Entfernung [km]

a, b, c, d, e – Koeffizienten

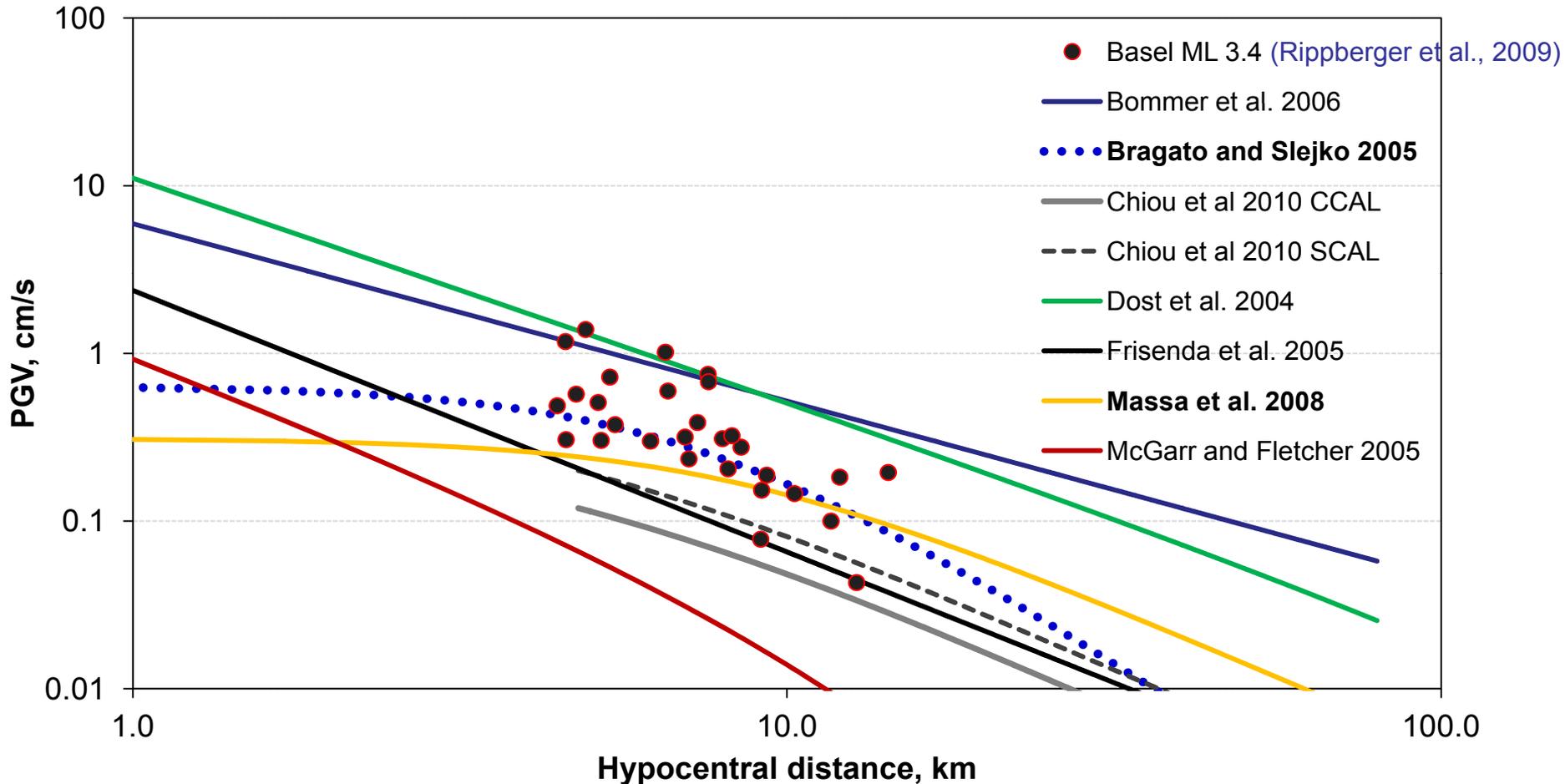
S - Parameter für Untergrundklasse

$\sigma$  - Standardabweichung

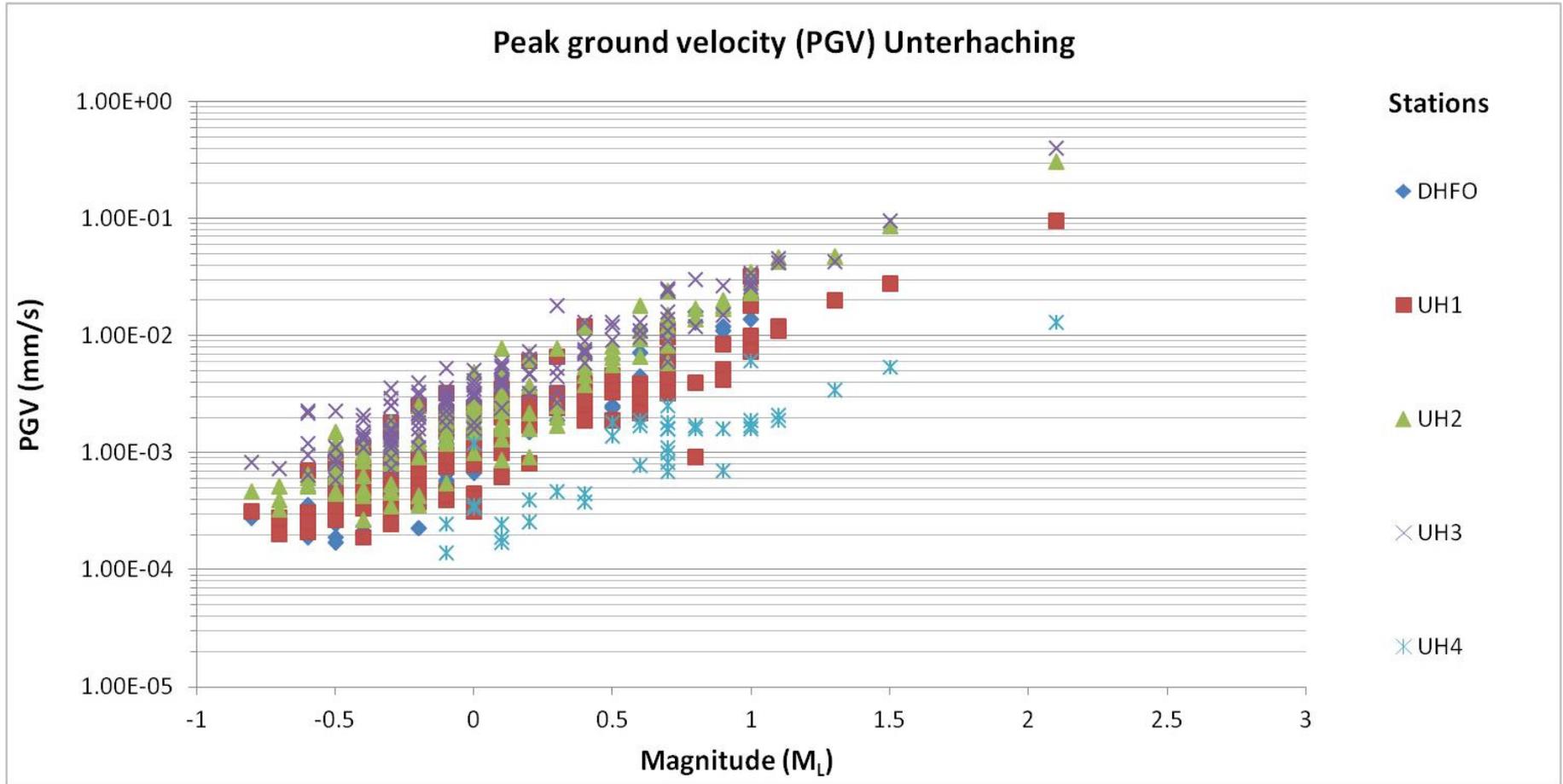
- Auswahl von 8 Beziehungen aus der Literatur für den Bereich kleiner Magnituden von -1 bis 3 und kleiner Entfernungen von 0 bis 10 km, teilweise bis 100 km
- Test: Vergleich mit gemessenen PGV-Werten aus Literatur (Standort Basel) und aus seismischen Katalogen sowie Identifikation der am besten passenden Beziehungen für Standort.

# Auswahl und Test geeigneter Abnahmbeziehungen der Amplituden der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit PGV – AP2

Beispiel 1: Vergleich mit Registrierungen **Netzwerk Basel** für Event mit **ML=3.4**



## Beispiel 2: Vergleich mit Registrierungen **Netzwerk Unterhaching (EP 2)**

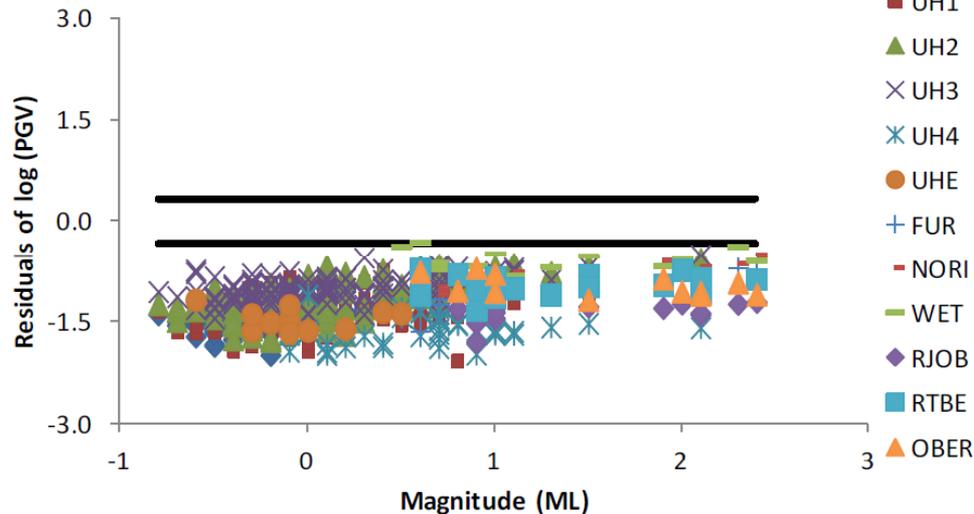


5 Stationen im Epizentralentfernungsbereich bis 10 km, Ereignisse aus [Katalog von EP 2](#)

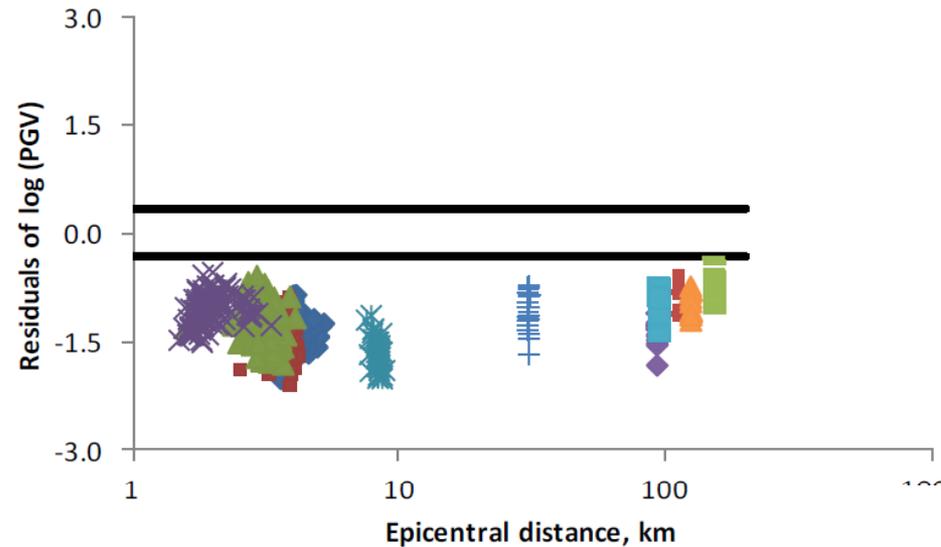
# Vergleich der Messwerte am Standort Unterhaching mit Prognosen der Abnahmebeziehungen:

Residuen für Abnahme-Beziehungen aus der Literatur mit Markierung der Standardabweichung: hier aus Dost et al. (2004)

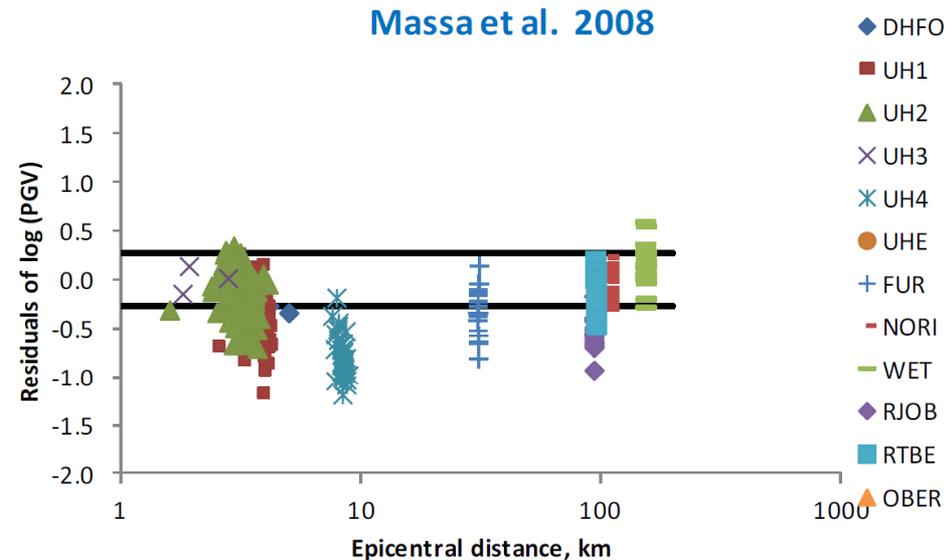
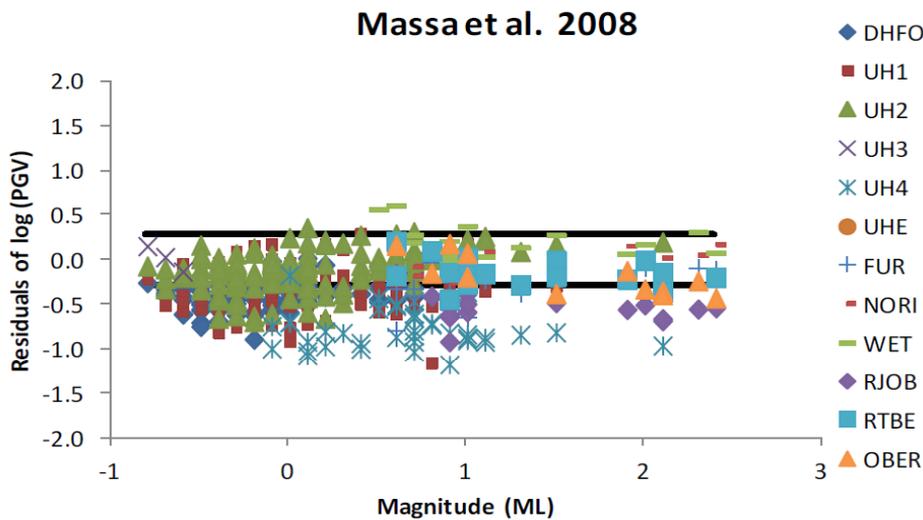
Dost et al. 2004



Dost et al. 2004



# Vergleich der Messwerte am Standort Unterhaching mit Prognosen: Residuen für Abnahme-Beziehungen aus der Literatur mit Markierung der Standardabweichung: hier aus Massa et al. (2008)



In der probabilistischen Analyse können mehrere Abnahmebeziehungen nebeneinander berücksichtigt werden:  
 Berücksichtigung der Unsicherheiten bei Verwendung eines logischen Baums oder in Sensitivitätsanalyse

# Ermittlung der Seismizitätsparameter – AP3

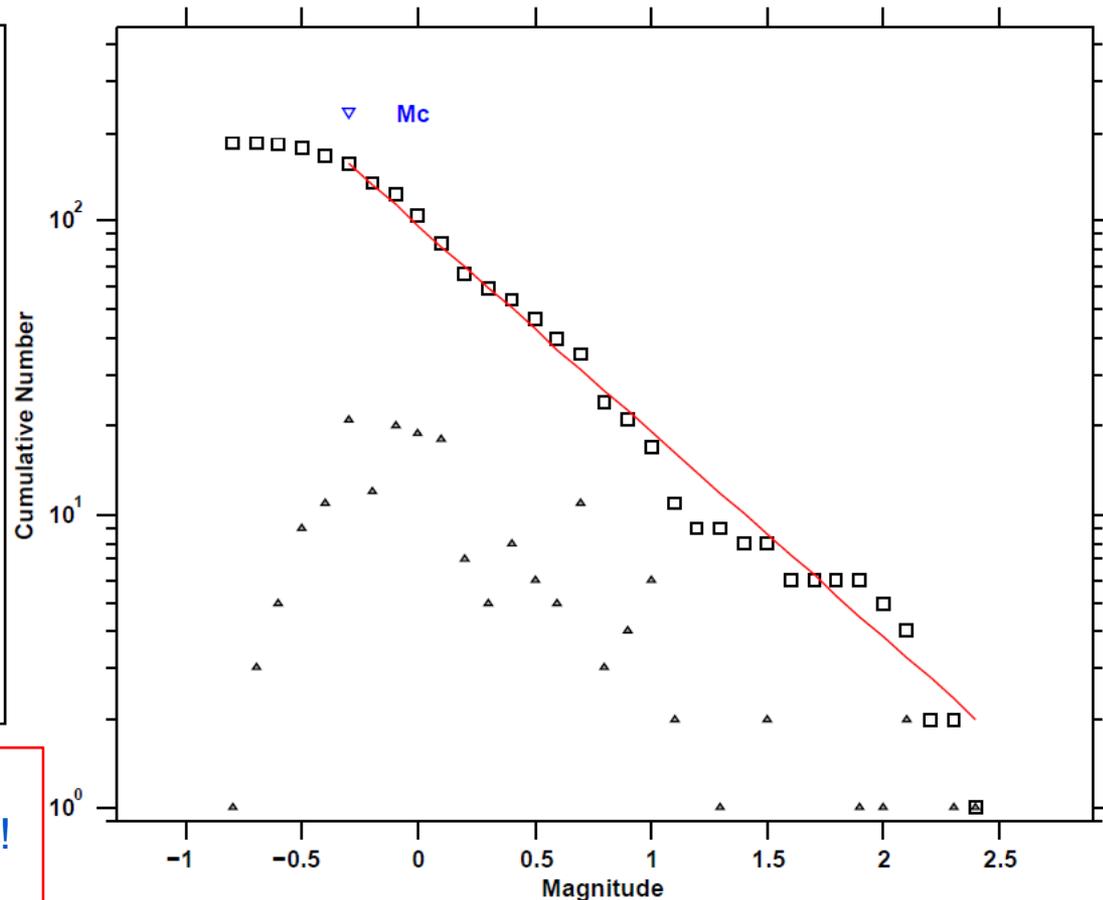
Beispiel Netzwerk Unterhaching: Kumulative Häufigkeitsverteilung der Magnituden  
ML, bestimmt aus Katalog von EP 2 (Stand 9/2012, Zeitraum 4.25 Jahre)

## Auswertung der Verteilung:

- Magnitude der Vollständigkeit  $M_c$ :  
 $M_c = -0.3$
- Steigung des linearen Abfalls, der b-Wert:  $b = 0.7 \pm 0.05$
- Achsenabschnitt  $a \approx 2$  ( $M_L = 0$ ),  
Aktivitätswert  $\lambda = 22.4$  pro Jahr

$\lambda$  und  $b$  sind Input-Daten für  
probabilistische Berechnung!

Weiterer wichtiger  
Seismizitätsparameter für Input:  $M_{max}$ !  
Bestimmung aus Literaturangaben

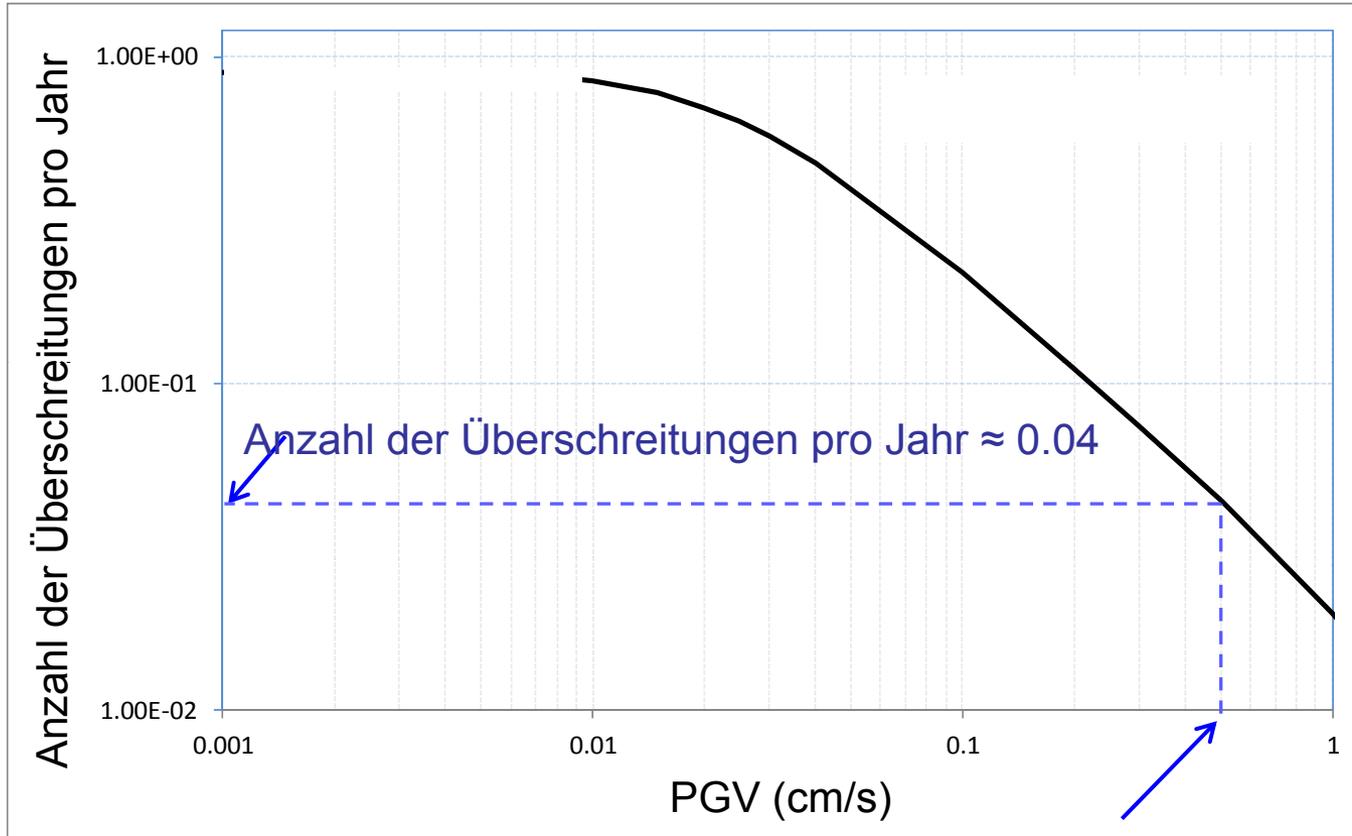


## Probabilistische Gefährdungsanalyse: Input-Daten für Unterhaching (AP 4)

Daten Unterhaching: Nutzung für methodische Entwicklung, nicht als Grundlage für die Bewertung der seismischen Gefährdung am Standort anzusehen!

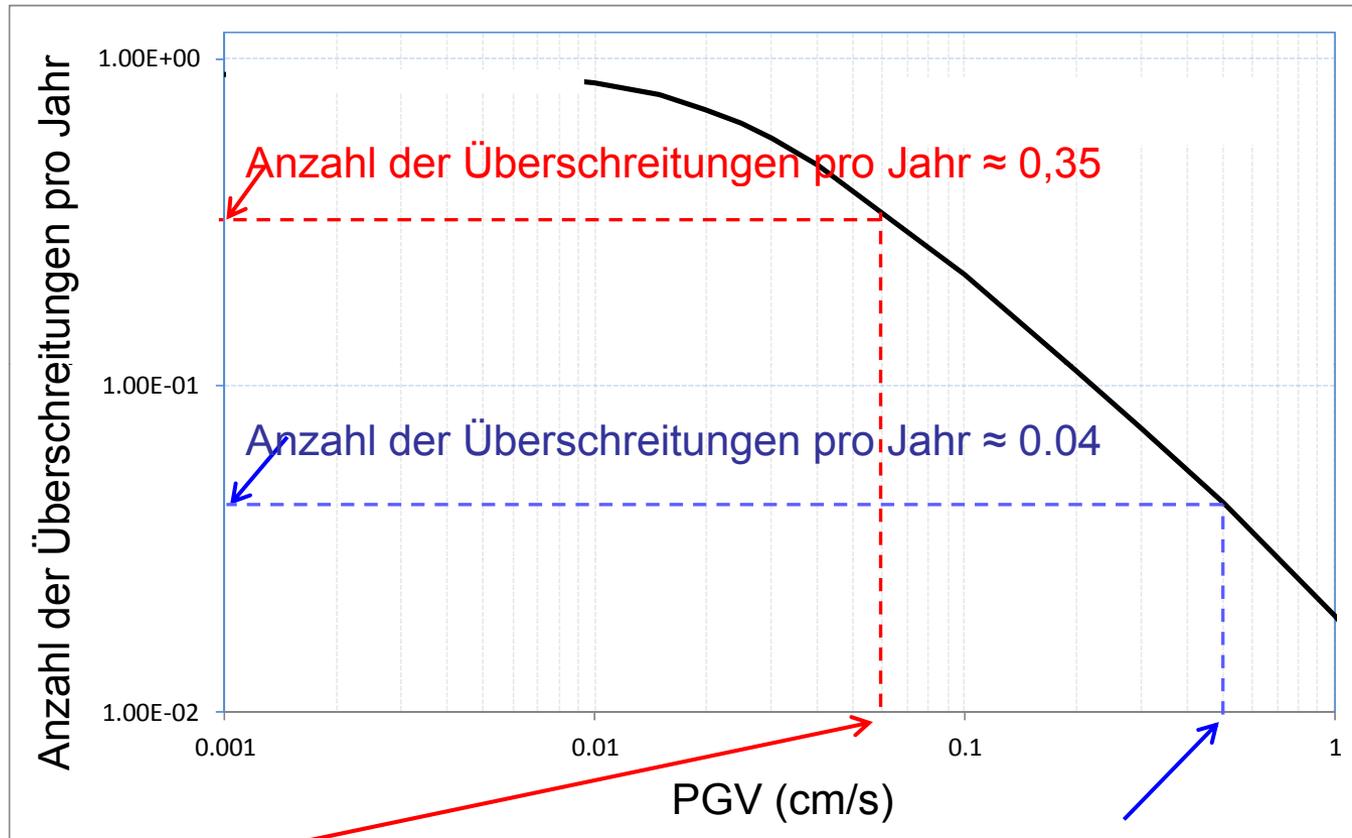
| Aktivitätswert für $M_{\min}$ [1/a] | b-Wert  | Minimale Magnitude | Maximale Magnitude | Herdtiefe [km] | Abnahmebeziehung   | Untergrundklasse |
|-------------------------------------|---------|--------------------|--------------------|----------------|--|------------------|
| $\lambda = 22.4$                    | $b=0,7$ | $M_{\min} = 0$     | $M_{\max} = 5$     | 4,9 – 5,2      | <ul style="list-style-type: none"><li>• Massa et al. (2008), <math>w=0,5</math></li><li>• Frisenda et al. (2005), <math>w=0,5</math></li></ul> | Steife Sedimente |

Probabilistische Gefährdungsanalyse mit Input-Daten für Unterhaching (AP 4):  
Resultat ist die Gefährdungskurve am Standort



PGV = 0.5 cm/s:  
Schwellenwert für Schäden an  
Wohngebäuden nach DIN 4150

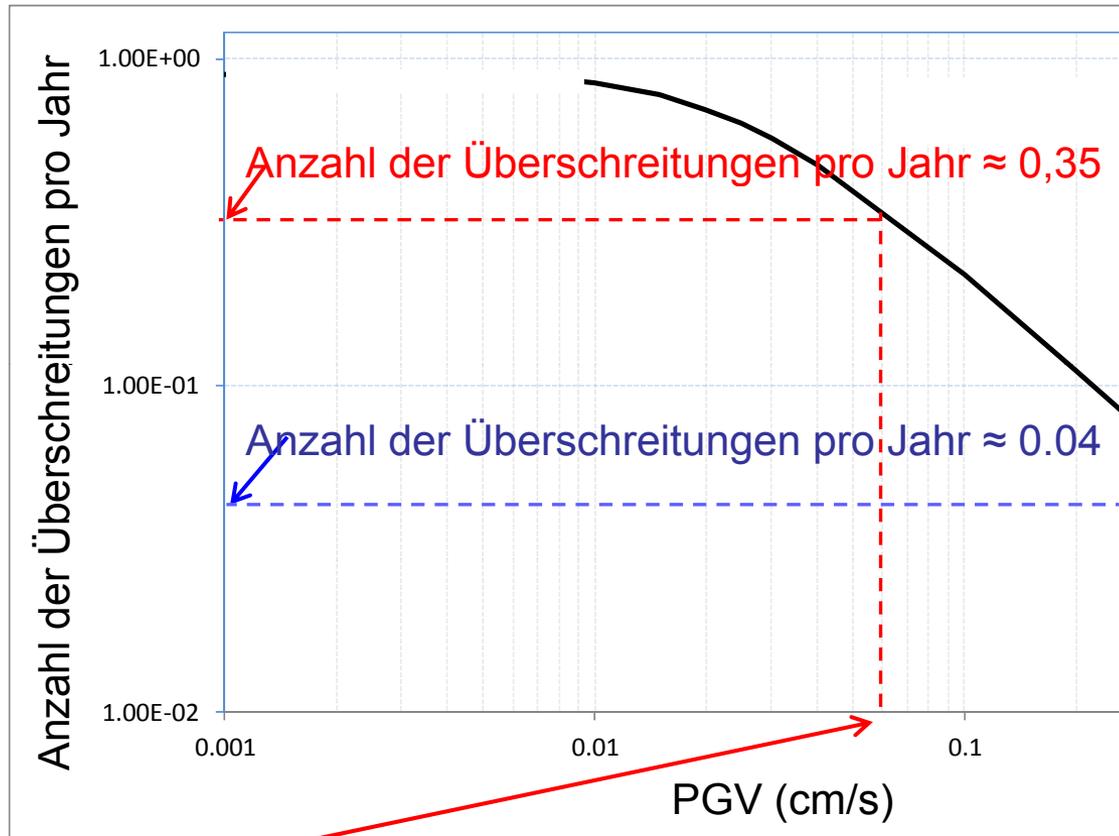
Probabilistische Gefährdungsanalyse mit Input-Daten für Unterhaching (AP 4):  
Resultat ist die Gefährdungskurve am Standort



PGV = 0.05 cm/s:  
Schwellenwert für Spürbarkeit,  
siehe Groos et al. (2013) bzw. DIN 4150

PGV = 0.5 cm/s:  
Schwellenwert für Schäden an  
Wohngebäuden nach DIN 4150

Probabilistische Gefährdungsanalyse mit Input-Daten für Unterhaching (AP 4):  
Resultat ist die Gefährdungskurve am Standort

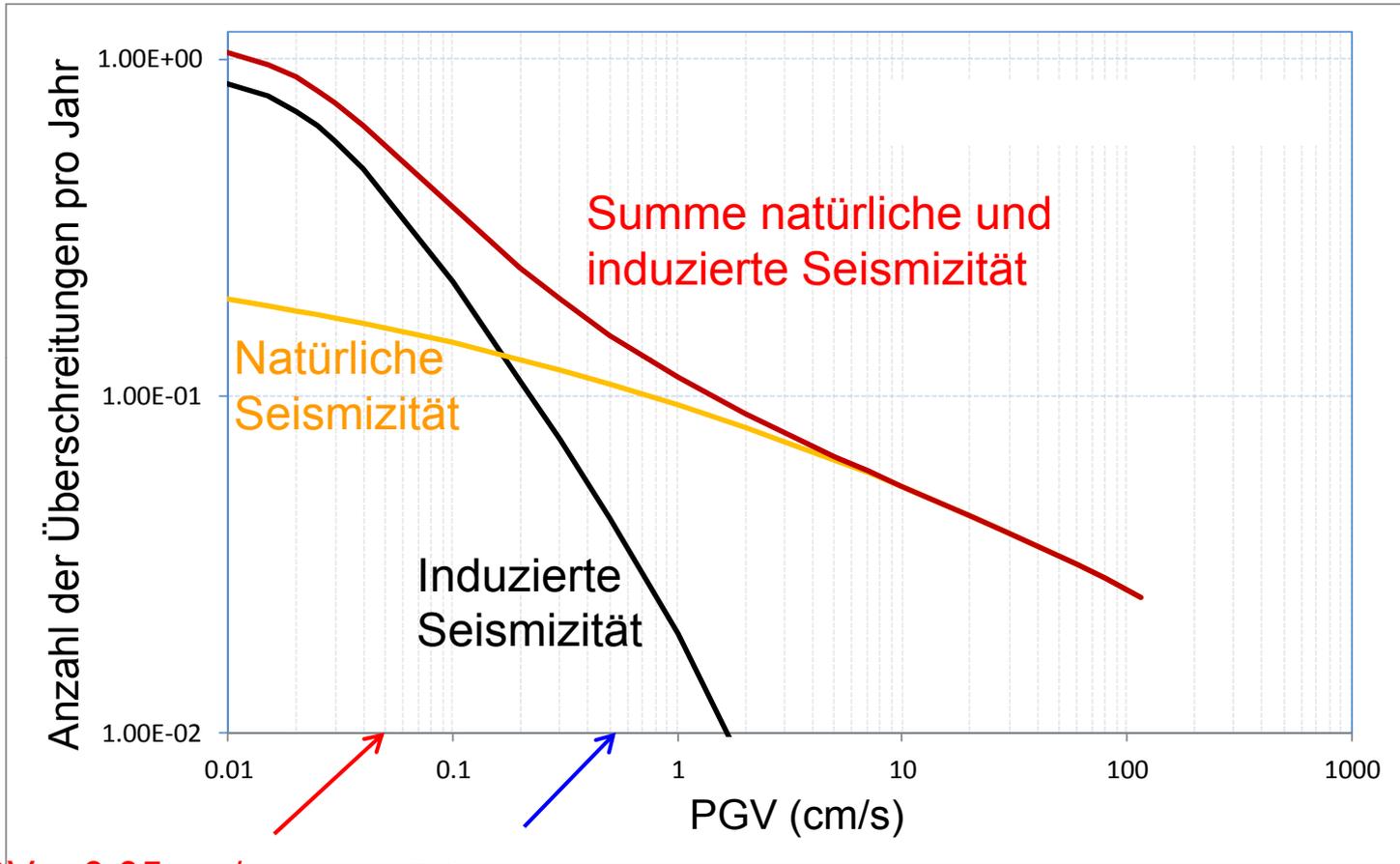


Werte für die ‚akzeptable‘ oder ‚erlaubte‘ Anzahl der Überschreitungen kann in Empfehlungen von Expertengruppen, in Regelwerken oder von Genehmigungsbehörden festgelegt werden; vgl. hierzu Festlegung in DIN 4149 für Erdbebenschäden: 0.002 pro Jahr.

PGV = 0.05 cm/s:  
Schwellenwert für Spürbarkeit,  
siehe Groos et al. (2013) bzw. DIN 4150

PGV = 0.5 cm/s:  
Schwellenwert für Schäden an  
Wohngebäuden nach DIN 4150

# Probabilistische Gefährdungsanalyse Unterhaching (AP 1 und AP 4): Vergleich natürliche und induzierte Seismizität

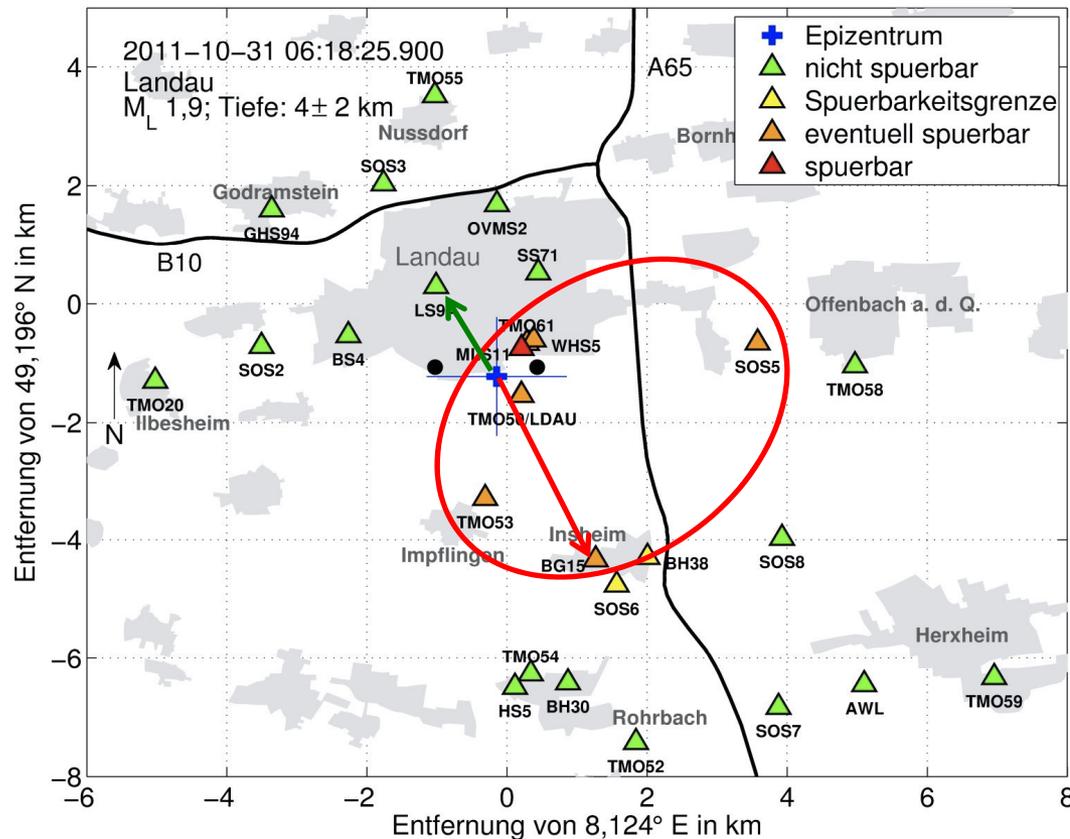


PGV = 0,05 cm/s:  
Spürbarkeit

PGV = 0,5 cm/s:  
Schäden an Wohngebäuden

## Ausblick auf Planung MAGS 2: Detaillierte Berücksichtigung des Standorteffekts

Siehe hier: Ergebnisse für Netzwerk Landau von EP 1 (Groos et al., 2013) mit Bewertung der möglichen Spürbarkeit eines Ereignisses (ML = 1.9)



- Standorteffekt kann sehr starken Einfluss auf Gefährdung haben.
- Zur Bewertung der Standorteffekte müssen detaillierte Informationen über lokalen Untergrund vorliegen.
- Strategie für MAGS 2: Mikrozonierung für die Ermittlung der lokalen Untergrundstruktur und Berücksichtigung in Gefährdungsanalyse.

# Zusammenfassung und Ausblick

- In EP4 wurde ein Verfahren für die probabilistische Gefährdungsberechnung für induzierte Seismizität bei tiefer Geothermie entwickelt und bereit gestellt:
  - Auswahl und Benchmark einer QS gesicherten Berechnungssoftware
  - Seismische Quellzonen können am Bohrloch angeordnet werden oder in Zonen von seismischer Aktivität entfernt vom Bohrloch
  - Ermittlung von geeigneten Abnahmebeziehungen für die seismischen Amplituden
  - Ermittlung und Aufbereitung der Input-Daten anhand von Standortdaten (seismische Kataloge) und anhand von Literaturangaben
  - Exemplarische Anwendung für Projekte Landau und Unterhaching
- Die Vorgehensweisen einschlägiger Regelwerke bei dynamischen Beanspruchungen im Bauwesen wurden übertragen und kombiniert: DIN 4149 ‚Bauen in Erdbebengebieten‘ und DIN 4150 ‚Erschütterungsmessungen‘.  
Werte für die ‚akzeptable‘ oder ‚erlaubte‘ Anzahl bzw. Wahrscheinlichkeit der Überschreitungen können von Expertengruppen oder von Genehmigungsbehörden festgelegt werden.
- Standorteffekte konnten bisher nur in pauschaler Form über die Auswahl von Abnahmebeziehungen seismischer Amplituden erfasst werden. Sie müssen detailliert berücksichtigt werden, siehe Beobachtungen am Standort Landau: Planungen für MAGS 2

Das Verbundprojekt MAGS  
Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität  
bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme  
im tiefen Untergrund

ist ein Forschungsvorhaben  
von BMU und PtJ-EEN (Erneuerbare Energien)

Projektträger für



**Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit**

[http://www.mags-projekt.de/MAGS/DE/Home/MAGS\\_node.html](http://www.mags-projekt.de/MAGS/DE/Home/MAGS_node.html)



The logo for the MAGS project, featuring the letters 'MAGS' in a bold, black font. The letter 'A' is stylized with a red and blue wave-like shape underneath it, and a small black line resembling a heartbeat or seismic wave is positioned below the 'M' and 'A'.



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

**GEOZENTRUM HANNOVER**