

# Analyse und Modellierung des Schweremaximums bei Ober-Ramstadt, Hessen

Abschlussbericht für das  
Hessische Landesamt für  
Naturschutz, Umwelt und  
Geologie

--- Teil 2: Modellierung ---

Mai 2018

- » Einleitung (3)
- » Das Basismodell (4-13)
- » Modelltests (14-15)
  - » Der konische Trochoidenturm (16-23)
  - » Drei konische Trochoide (24-33)
  - » Drei viereckige Polygonkörper (34-41)
    - » Exkurs: erweiterte Interpretation (42-51)
  - » Drei lineament-basierte Polygonkörper (52-63)
  - » Invertierbare Linse (64-74)
  - » Oberflächengeologie (75-91)
  - » Oberflächengeologie, verkippt (92-103)
- » Zusammenfassung der Ergebnisse (104)
- » Addendum: Modelldichten (105-114)
- » Appendix: Overlay mit Lineamenten (115-116)

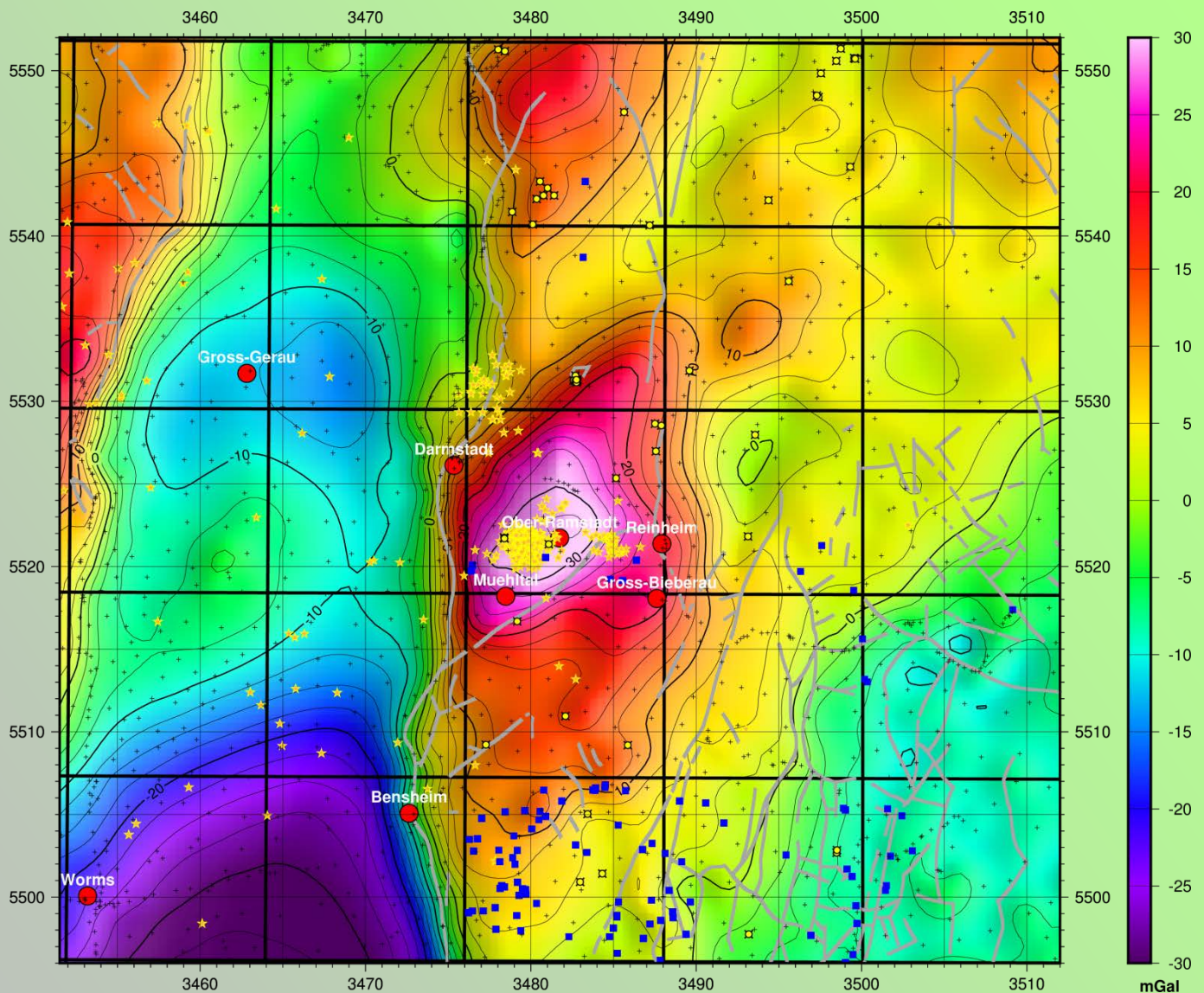


- » Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Ursache des Schwere-maximums bei Ober-Ramstadt, Hessen, besser zu verstehen. Dafür wurden zunächst die vorhandenen Schweredaten analysiert, ergänzt durch eine Analyse der magnetischen Daten (Bericht Teil 1).
- » In diesem Teil werden verschiedene Testmodelle erstellt und invertiert, um die Eigenschaften der Quellstruktur eingrenzen zu können. Da es in dem Bereich des Maximums in der Tiefe offensichtlich wenige geologische Informationen oder Vorgaben gibt, werden zunächst Körper mit einfacher Geometrie modelliert.
- » Die so gewonnenen Modelle zeigen, welche Aussagekraft die vorhandene Schwerevermessung für die verschiedenen Aspekte des Problems hat.
- » Die Koordinaten an den Karten beziehen sich auf Gauß-Krüger, Zone 3, und tragen die Einheit Kilometer.

- » Das Basismodell, auf welchem alle folgenden Modelle aufbauen, besteht aus den erhaltenen Modellhorizonten. Abgesehen vom Prä-Perm werden die Schichten mit hohem Einfluss auf die Schwere mit einer lateralen Dichteverteilung versehen. Damit sollen regionale Dichteveränderungen modelliert werden können. Auch vertikale Dichtegradien sind für die meisten Schichten vorgesehen, Ausnahmen sind hier das Prä-Perm und der Zechstein. In der Inversion wird außerdem ein regionales Schwerefeld berechnet, welches linear angenommen wird und dazu dient, Effekte von außerhalb des Modells nachzubilden.
- » Topografie hat einen großen Einfluss auf die berechnete Schwere. Da das Modell aus Prismen aufgebaut ist, die die Topografie annähern, können an den Kanten Artefakte in der Schwereberechnung auftreten. Daher wird der Modelleffekt nicht direkt auf den Prismen sondern in „sicherer Entfernung“ berechnet. Diese Entfernung hängt einerseits von der Variation in der Topografie und andererseits von der Breite und Tiefe der Prismen ab. Da die Beobachtungsdaten im Mittel über 1.6 km auseinander liegen und keine zu detaillierten Modellinformationen vorhanden sind, wurde eine Gitterweite der Prismen von 500 m gewählt. Da auch die Variation der Topografie in diesem Bereich liegt, wird das beobachtete Schwerefeld im Mittel um diesen Betrag auf eine geglättete Drape-Fläche nach oben feldfortgesetzt (siehe Seite 9).



# Bouguerschwere (2670kg/m<sup>3</sup>)



## » Bouguerschwere mit Reduktionsdichte 2670kg/m<sup>3</sup>

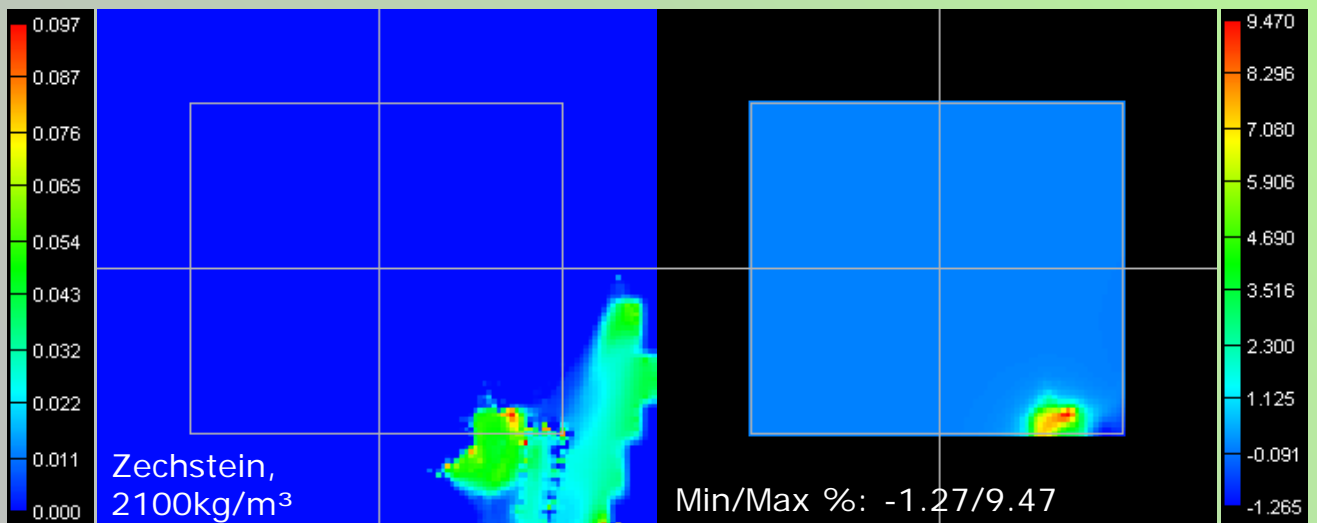
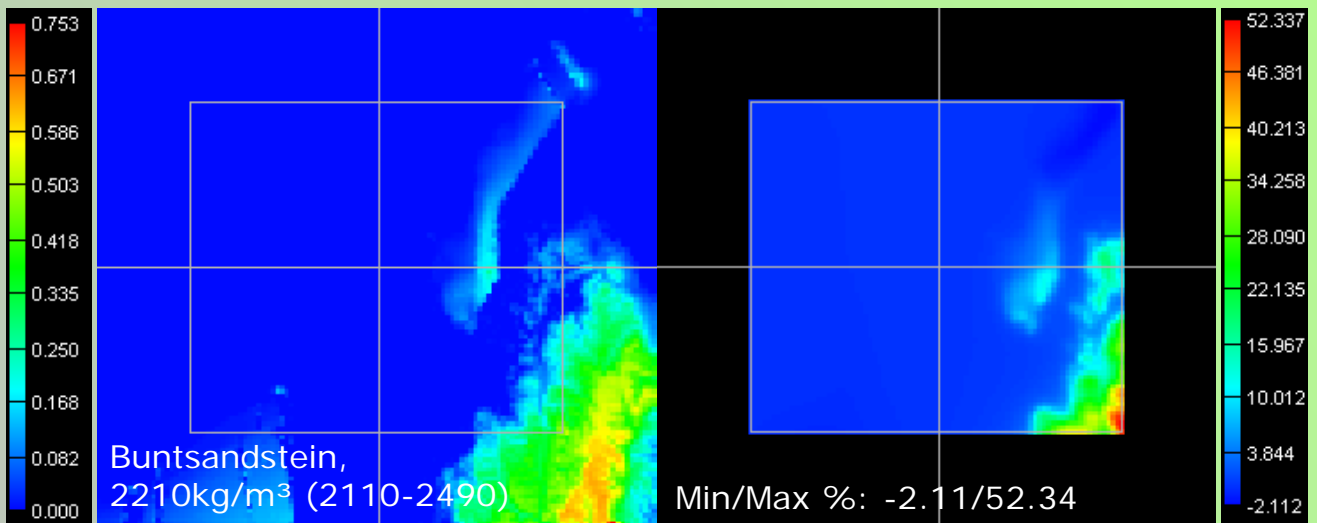
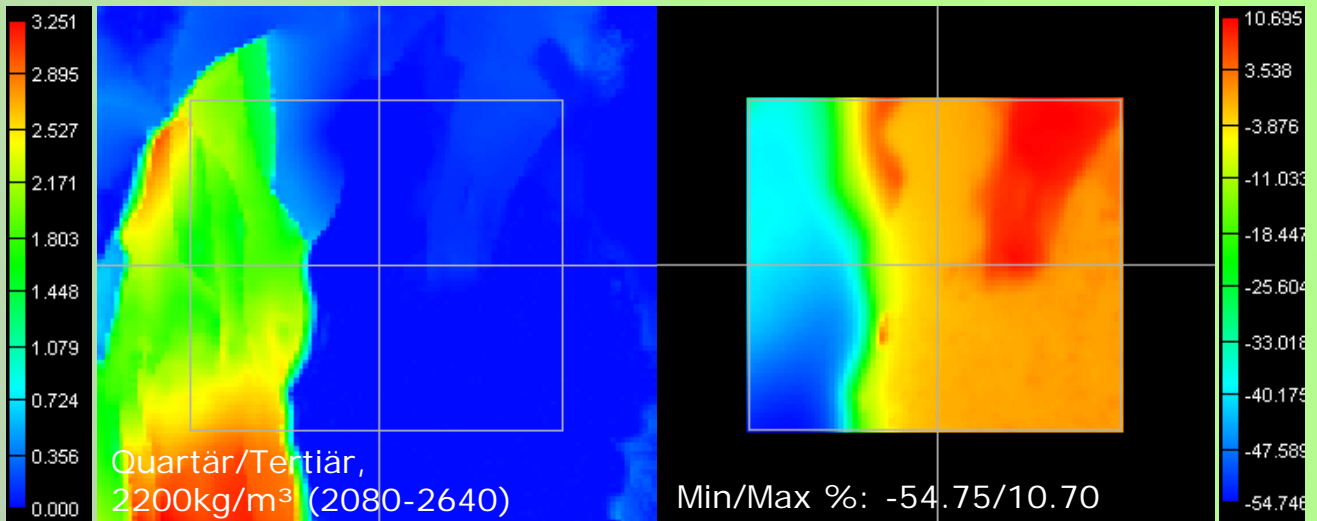
» Das zentrale Schweremaximum um Ober-Ramstadt trifft mit einer Häufung von Erdbebenlokationen zusammen. Eine zweite Häufung gibt es an seinem nordwestlichen Rand, nördlich von Darmstadt.

» Im Westen wird das Maximum vom Oberrheintalgraben begrenzt.

### Legende für diese und alle weiteren Karten:

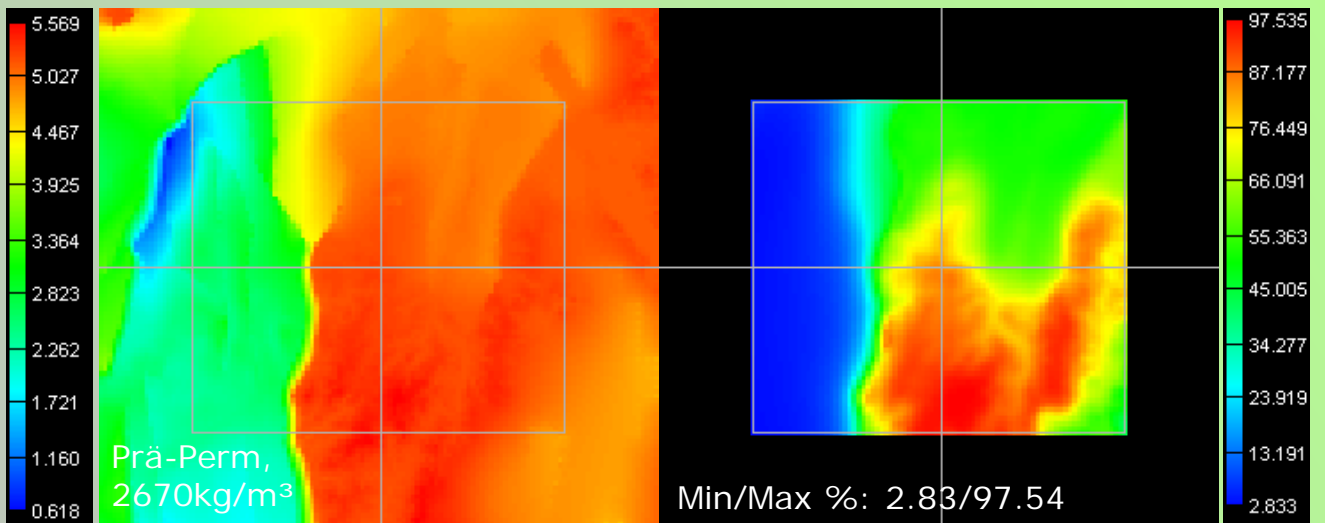
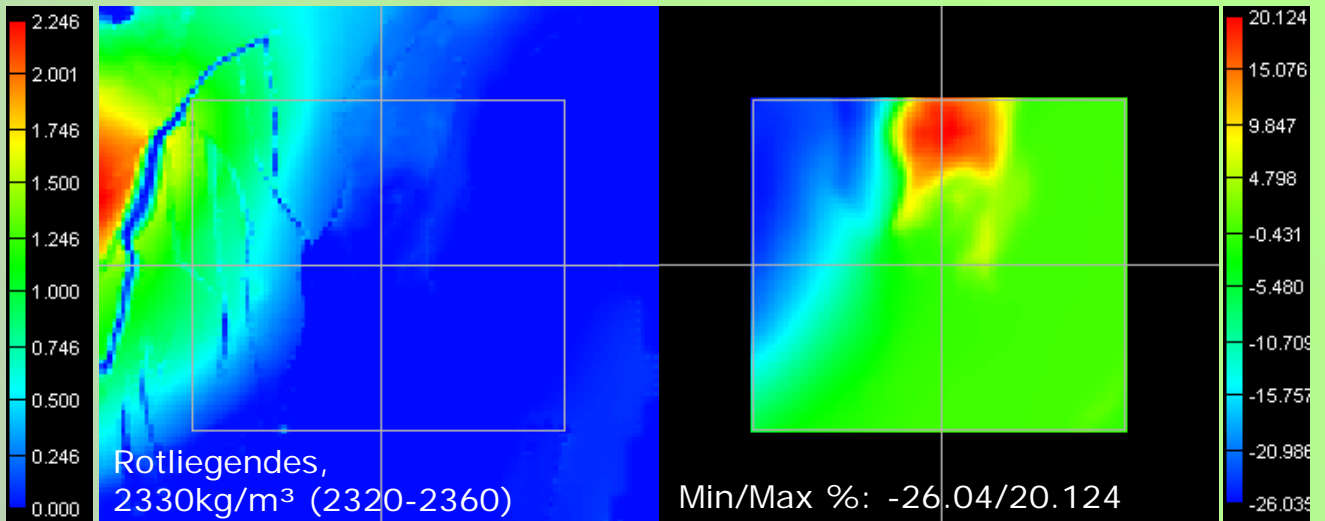
- Tektonik
- Städte
- + Schweremesspunkte
- Dichtemessungen
- ★ Erdbebenlokationen
- TK Blätter
- Bohrungen

# Einfluss des Schichtmodells



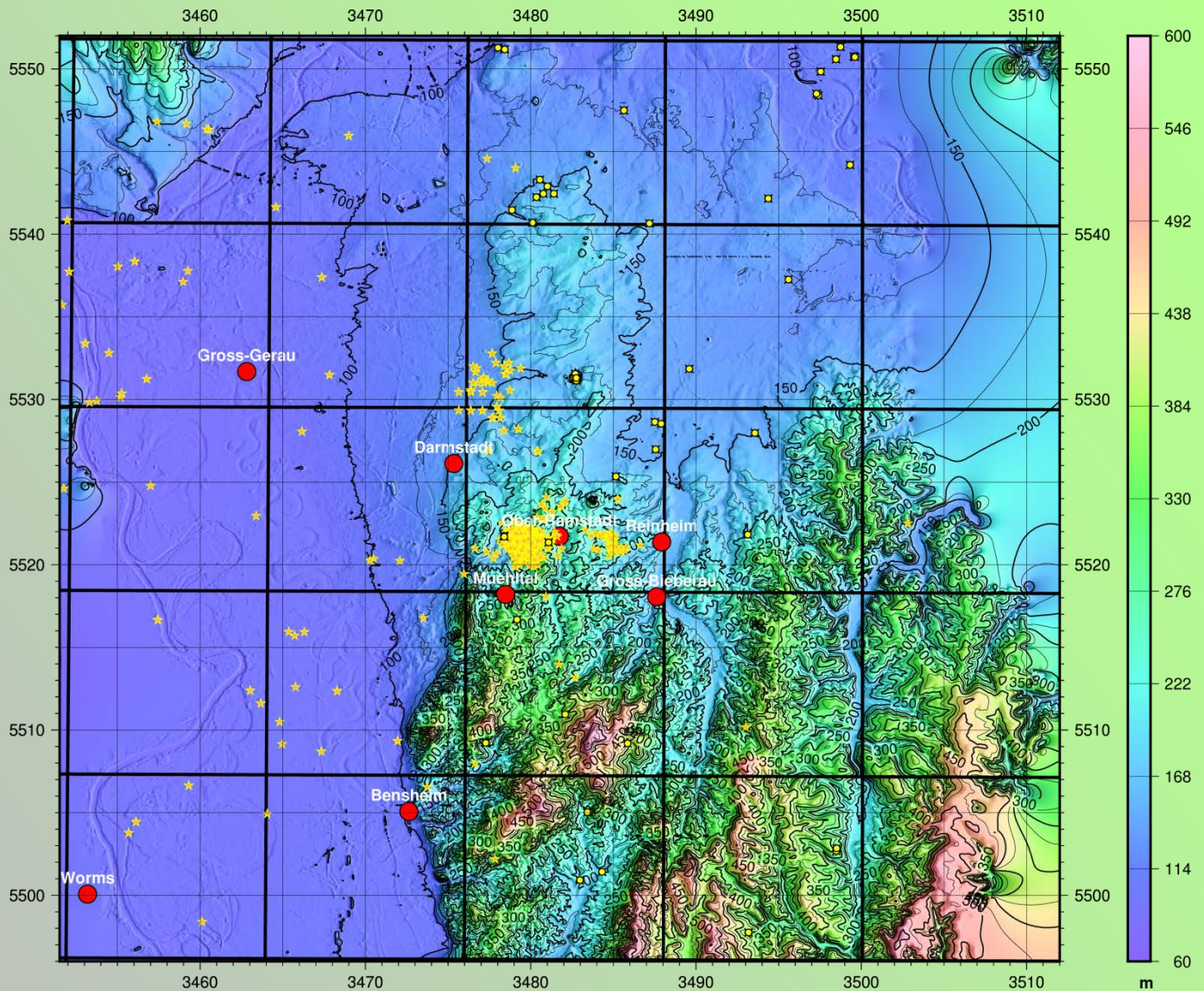
- » Links: Schichtmächtigkeiten mit Dichteinformation; Rechts: Einfluss auf die Schwereberechnung in Prozent. Negative Prozentzahlen bedeuten eine negative Schwerewirkung.
- » Oben: Quartär/Tertiär, Mitte: Buntsandstein, Unten: Zechstein

# Einfluss des Schichtmodells



- » Links: Schichtmächtigkeiten mit Dichteinformation; Rechts: Einfluss auf die Schwereberechnung in Prozent. Negative Prozentzahlen bedeuten eine negative Schwerewirkung.
- » Oben: Rotliegendes, Unten: Prä-Perm

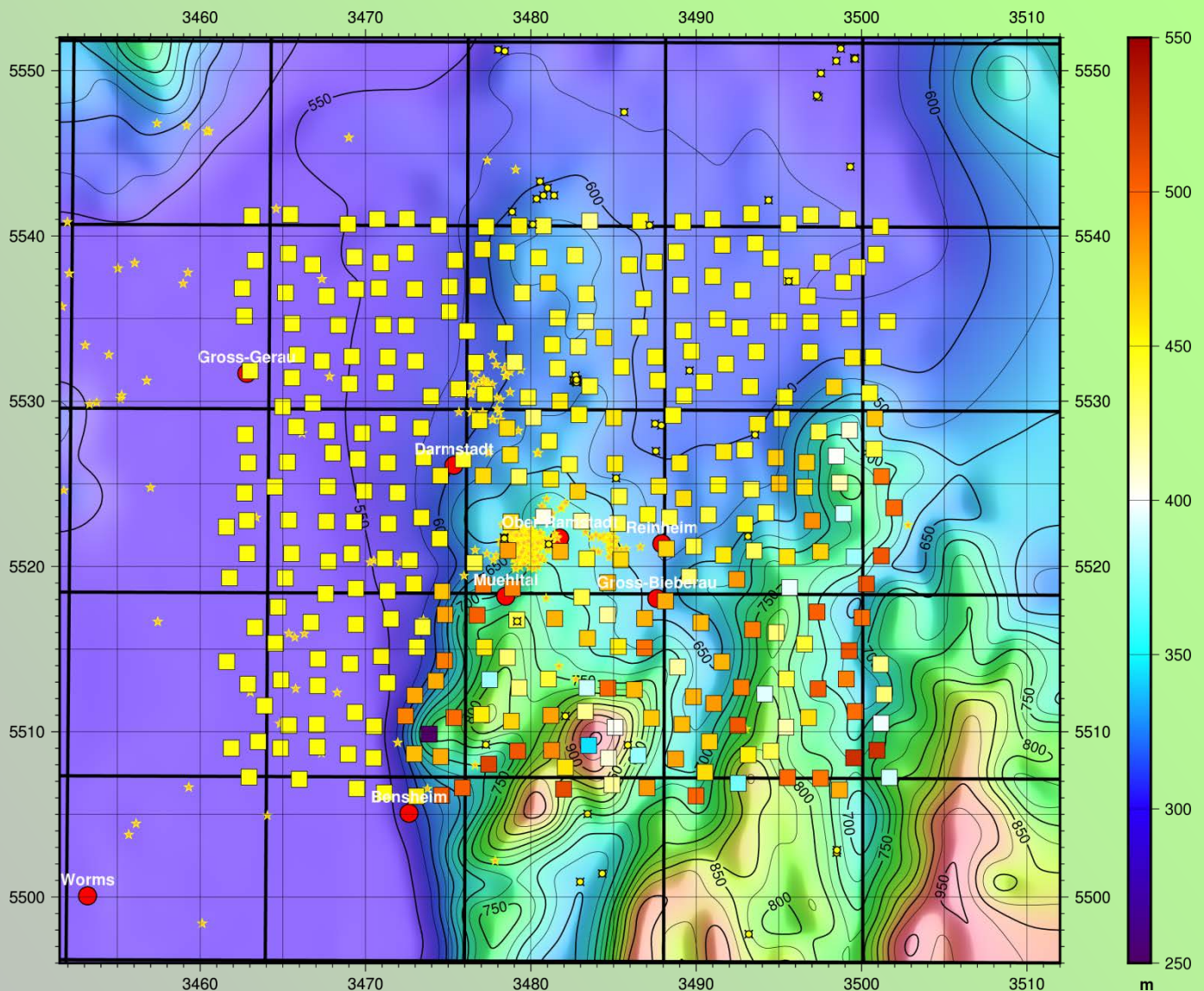




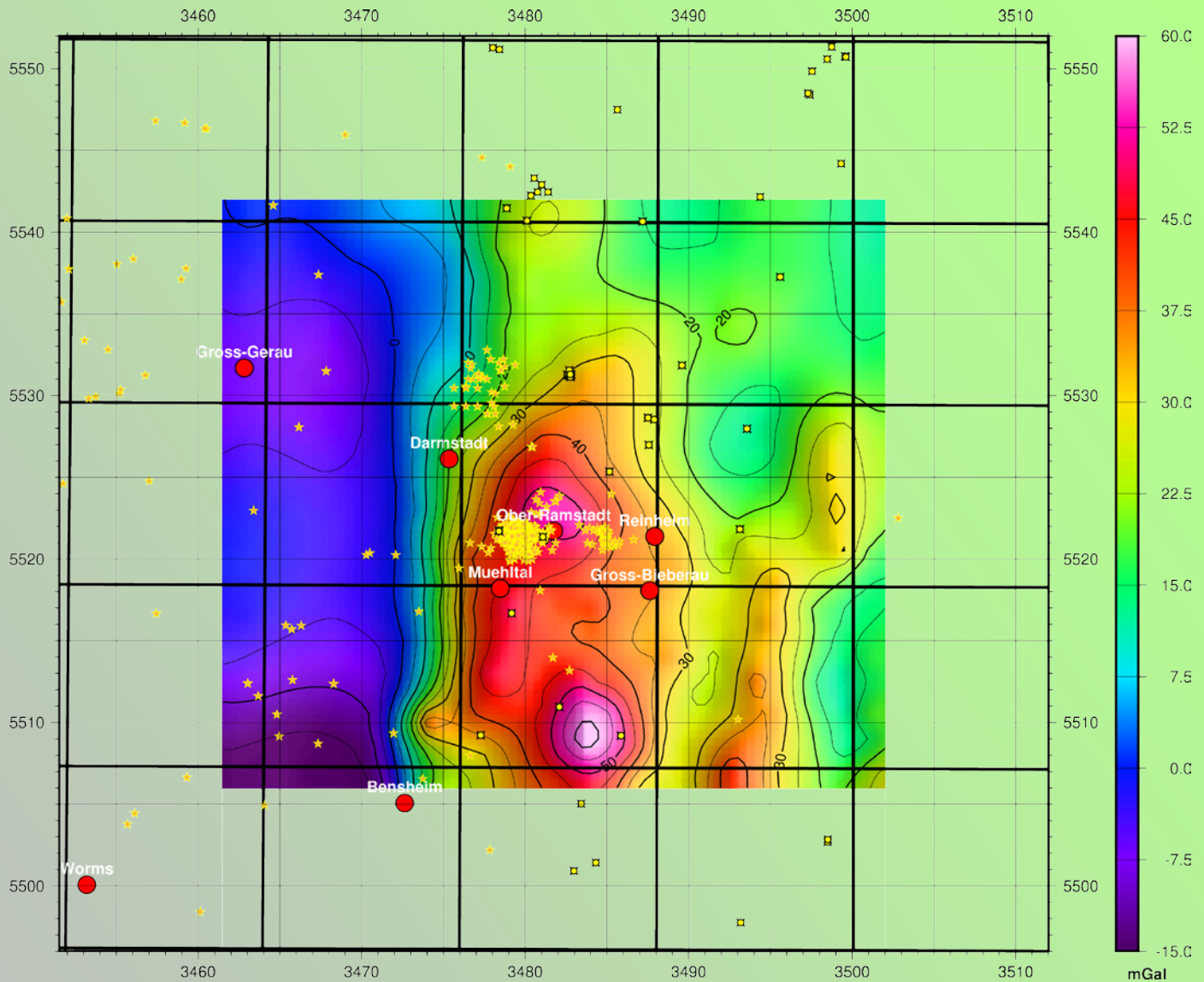
## » Topografie

- » Die Topografie hat einen großen Einfluss auf die Schwereberechnung. Im Interessengebiet variiert sie von ca. 75-600m und muss deshalb bei der Modellierung berücksichtigt werden.



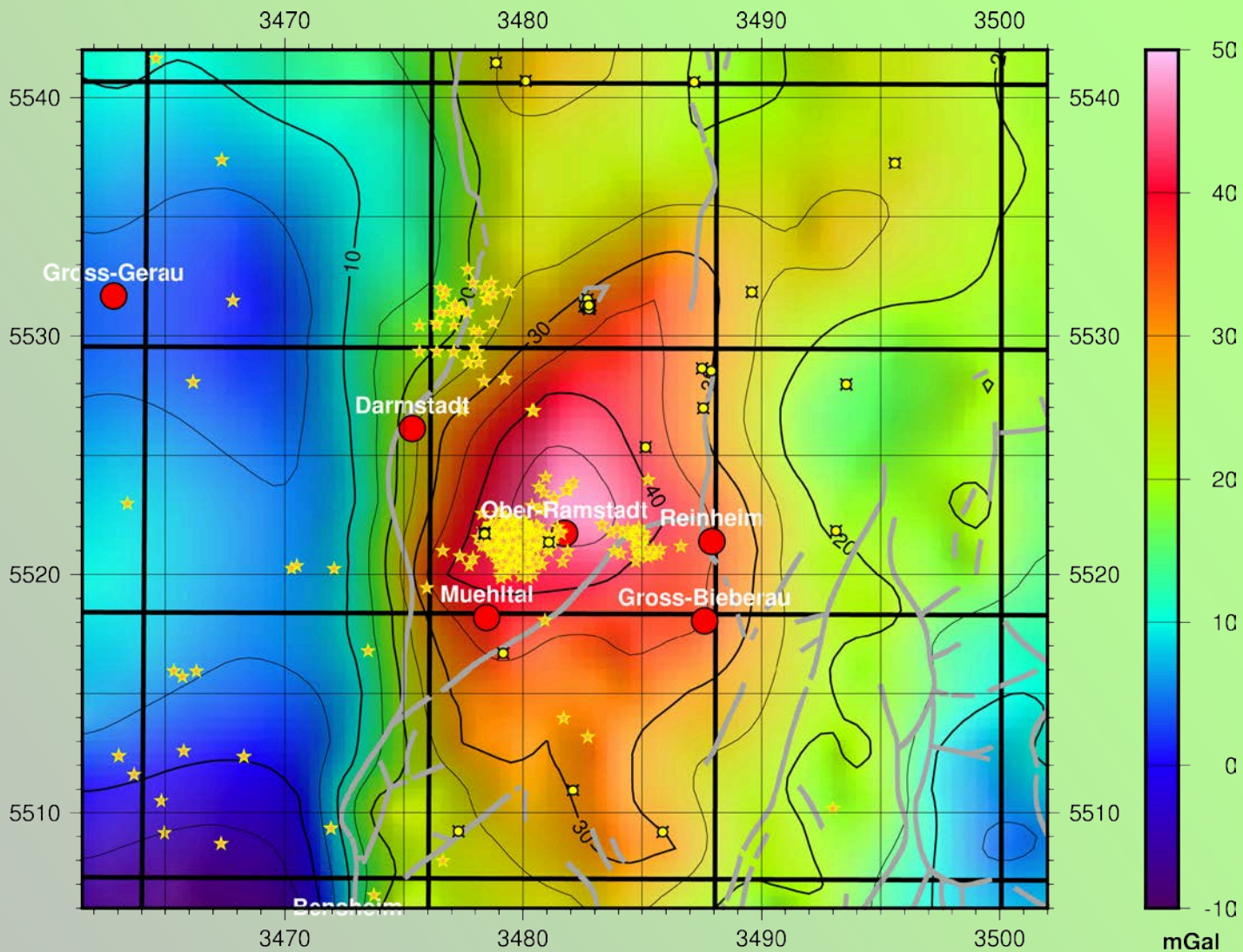


- » Um Modellartefakte zu minimieren, wurden die Beobachtungen nach oben auf eine Drape-Fläche feldfortgesetzt.
- » Hier sieht man die verwendete Drape-Fläche im Hintergrund und die Differenzhöhen zur Topografie als Quadrate gemäß nebenstehender Farbskala.
- » Eine Drape-Fläche ist nötig, weil sonst Messpunkte in engen Tälern nach der Feldfortsetzung immer noch sehr nahe an Prismenkanten lägen.

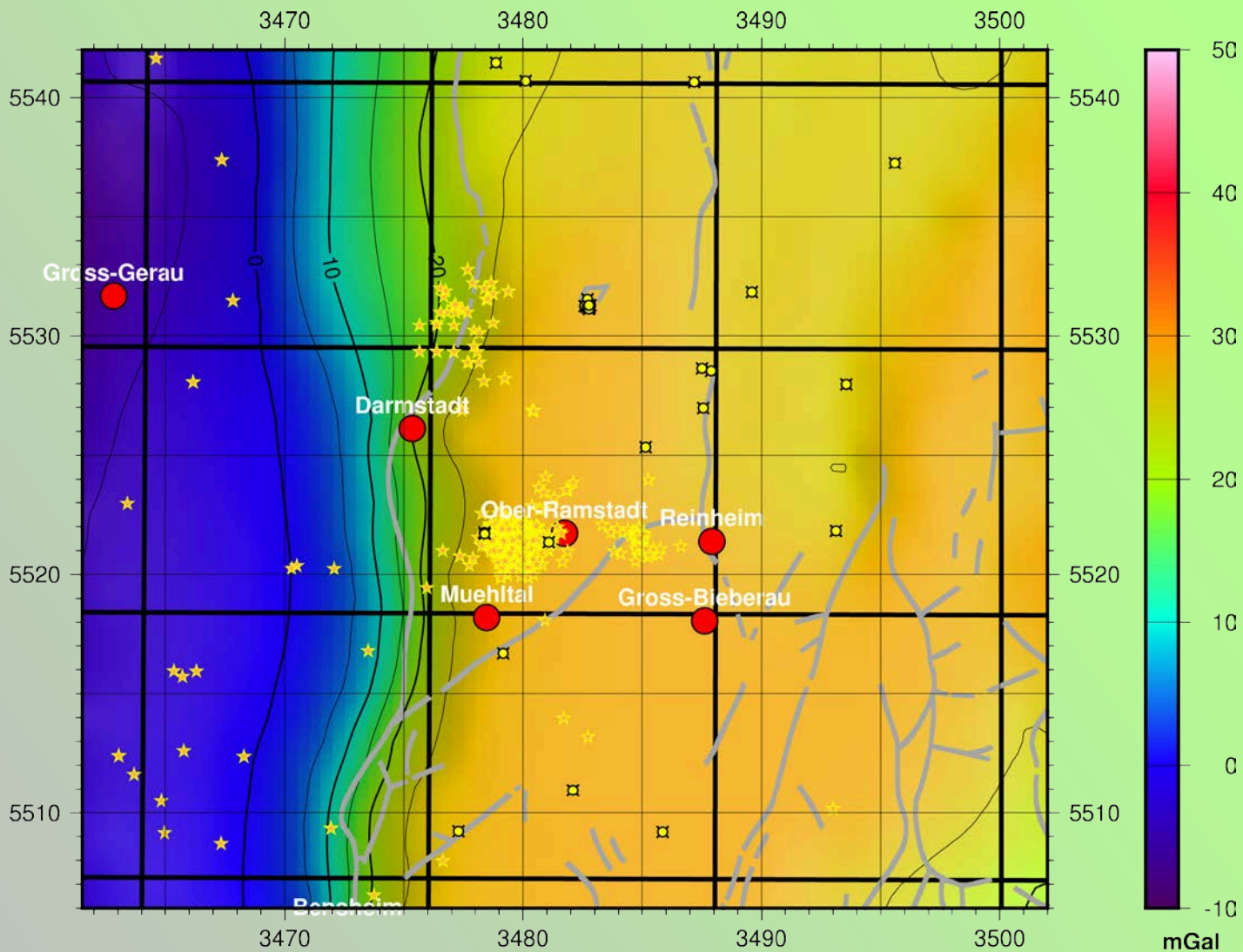


- » Freiluftschwere, feldfortgesetzt auf die Drape-Fläche
- » Für das Modellieren wird die Freiluftschwere verwendet, da dann Dichtevariationen oberhalb des Reduktionsniveaus berücksichtigt werden können.



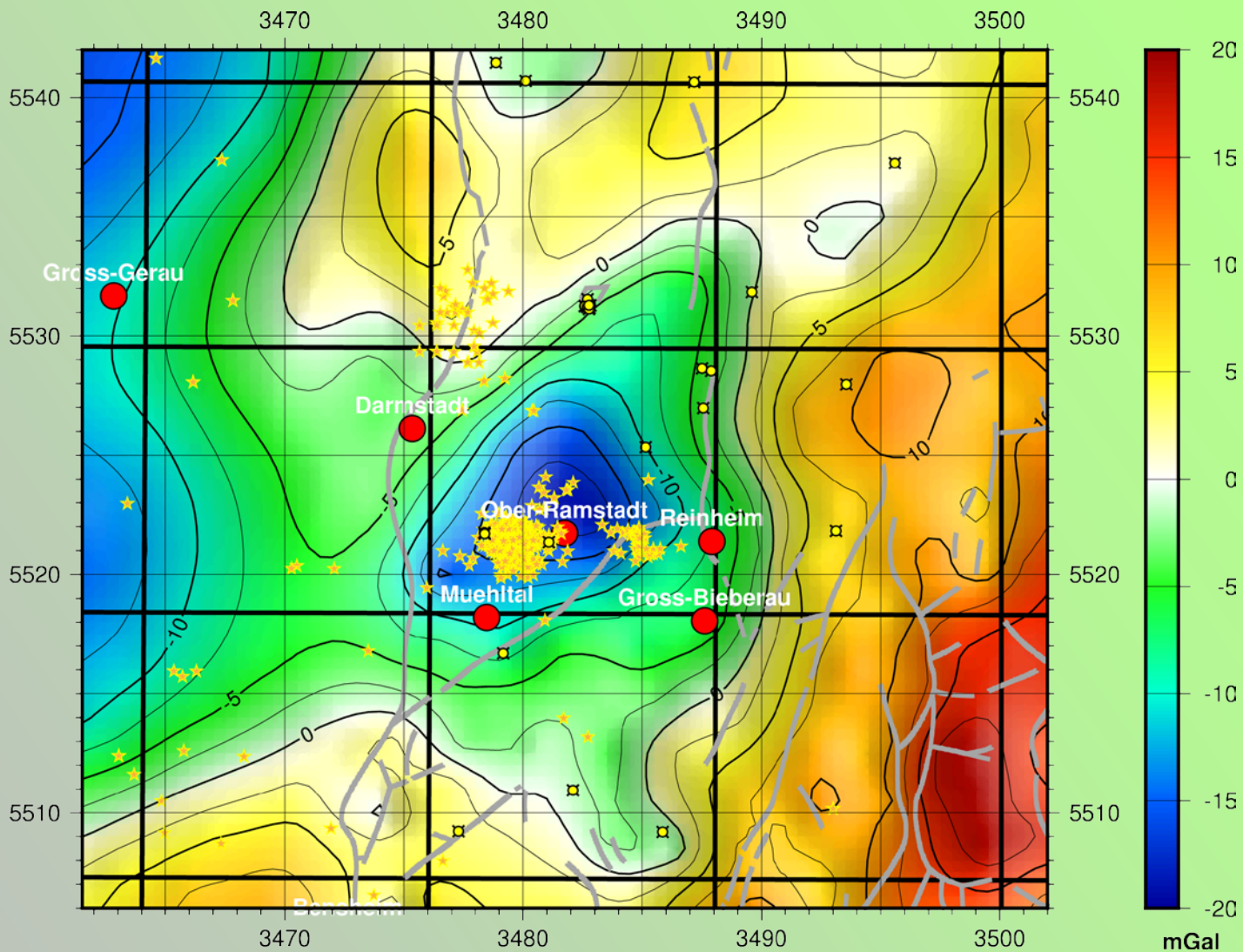


- » **Freiluftschwere, feldfortgesetzt und um die Wirkung des Fernfeldes reduziert**
- » Das Fernfeld wird entfernt, um den Rechenaufwand zu reduzieren.
- » Dies ist die Referenzschwere, mit der die berechneten Daten der Modellierung verglichen werden.
- » Diese und die nachfolgenden Seiten zeigen das Ergebnisgebiet (d.h. der durch Randeffekte beeinflusste Modellbereich wird weggelassen).



- » **Modellierte Schwere des vorgegebenen Basismodells**
- » Die Farbskala ist identisch zur vorherigen Seite.
- » Die berechnete Schwere des Basismodells zeigt in dem Bereich des Maximums keinerlei Struktur. Es muss somit vollständig von einem oder mehreren noch zu bestimmenden Körpern erklärt werden.





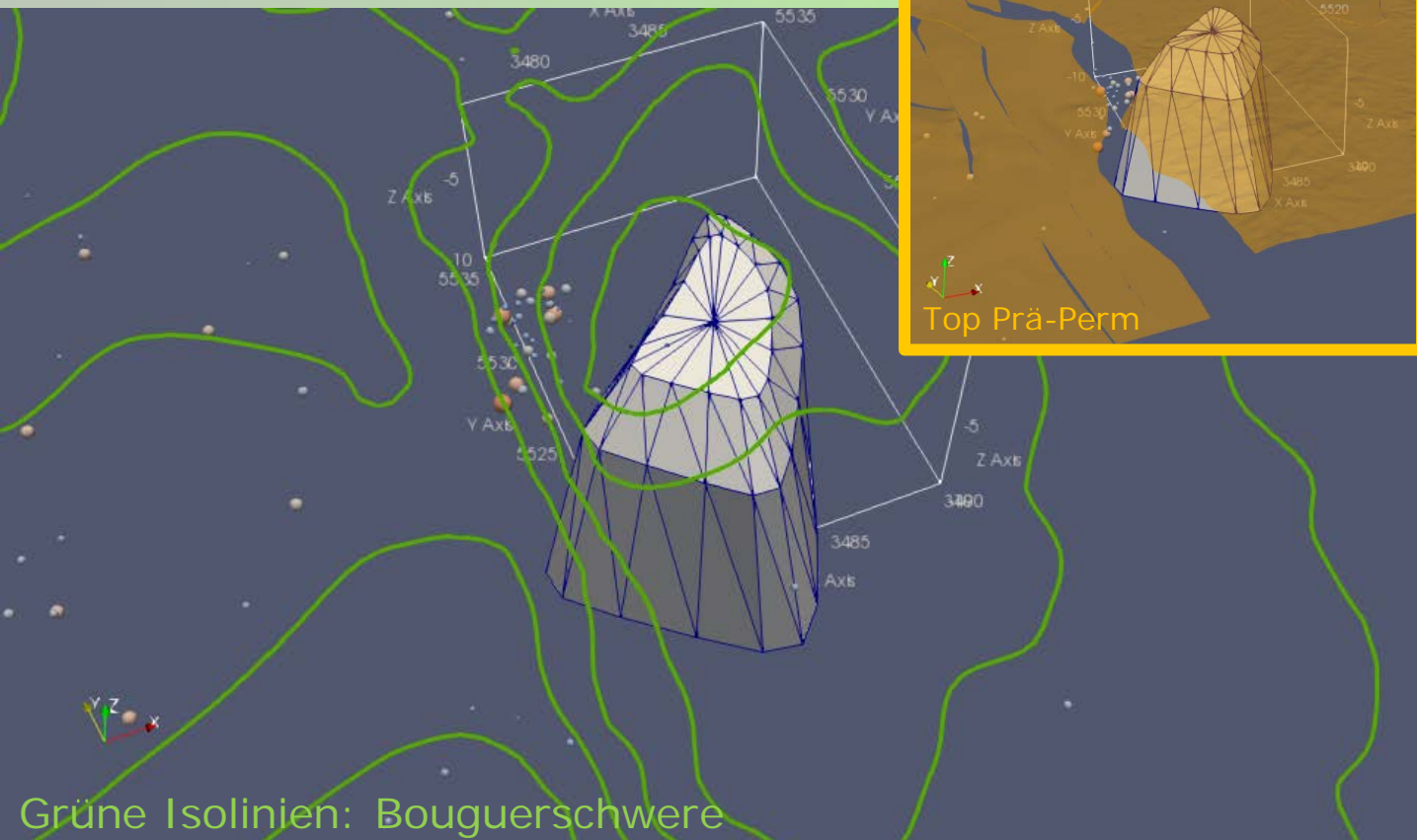
- » **Schwereresiduum des vorgegebenen Basismodells**
- » Negative Werte bedeuten, dass die modellierte Schwere zu gering ist (Massendefizit).
- » Auch außerhalb des Interessenbereichs ist die Modellvorstellung noch nicht vollständig.



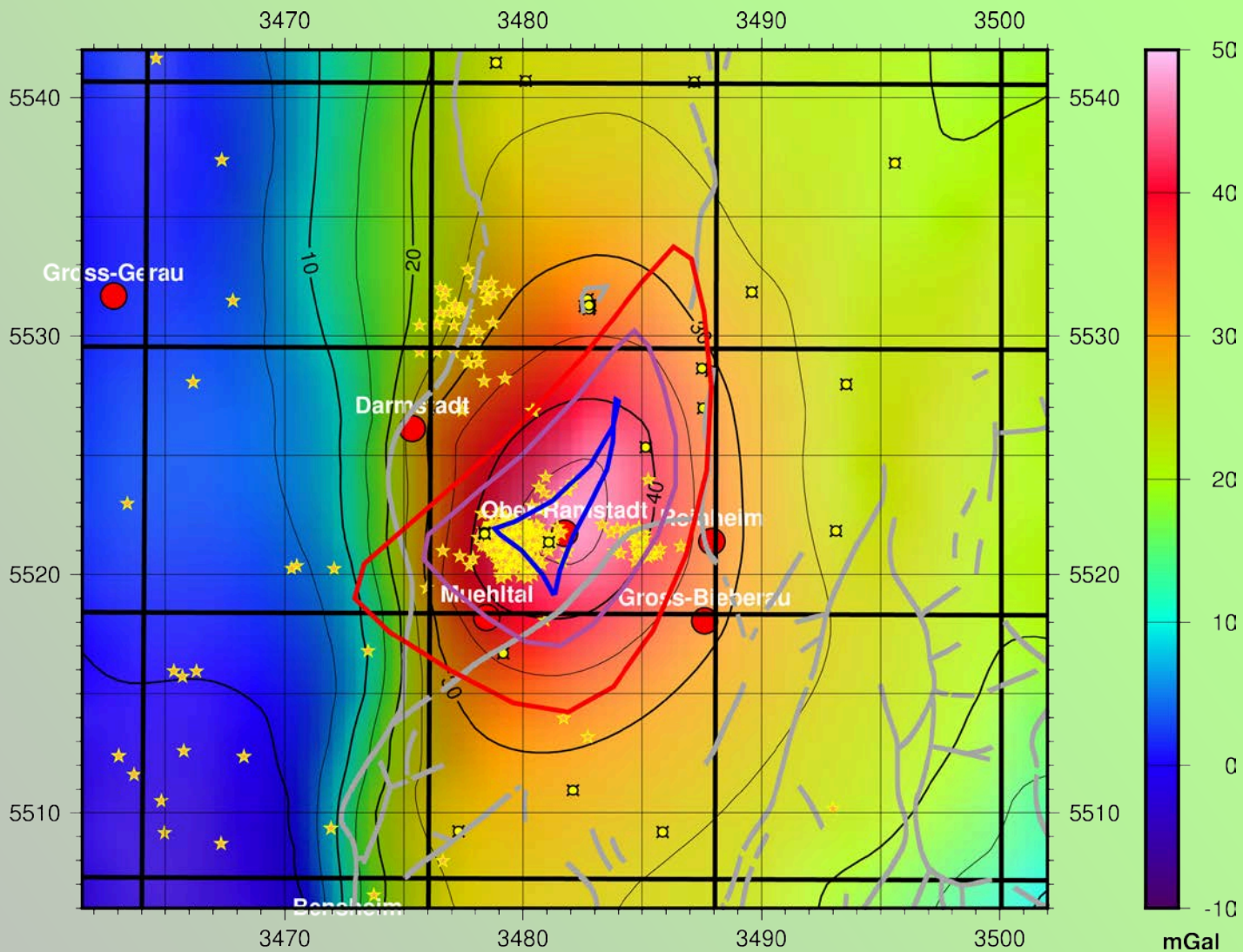
- » Die im Folgenden gezeigten Modelle basieren auf dem Schichtmodell als grundlegende Geometrie. Die Dichten der Schichten dürfen jeweils angepasst werden, für das Quartär+Tertiär sowie das Rotliegende wird der Inversion eine laterale Dichtevariation mit 5x5 Stützstellen erlaubt. Quartär+Tertiär, Buntsandstein und Rotliegendes erhalten außerdem einen vertikalen Dichtegradienten, der mögliche Effekte der Kompaktion nachbilden kann. Abgesehen von den Schichtdichten darf die Inversion stets einen linearen Trend als Regionalfeld anpassen. Dieses dient dazu, Schwereeffekte von außerhalb des Modells herauszurechnen.
- » Das erste und simpelste Modell (ab Seite 16) enthält außer den oben genannten Variablen einen einzigen Körper, dessen Form durch drei Polygone vorgegeben wird. Ihre Mittelpunkte haben die gleichen lateralen Koordinaten, so dass sich eine Art Turm ergibt.
- » Die folgenden Modelle (ab Seiten 24, 34 und 52) bilden das Schweremaximum mit je drei sich überlagernden Körpern nach. Die Körper erhalten Differenzdichten, die jeweils zu der Dichte des Prä-Perm hinzuaddiert werden. Die in der Präsentation angegebenen Einzeldichten entsprechen der addierten Dichte. Wo sich die Körper überlagern, werden beide (oder alle drei) Differenzdichten zu der Prä-Perm-Dichte addiert.

- » Im Anschluss (ab Seite 64) wird getestet, wie ein aus zwei Schichten aufgespannter Körper aussehen müsste, der die Schwere sehr gut erklären kann. Die so erhaltene Geometrie spiegelt zwar direkt die Schwere wider, jedoch lassen sich in ihr interessante Bereiche finden, die in der Schwerekarte durch die große Amplitude des Maximums verborgen sind.
- » Zum Schluss werden aus der Oberflächengeologie digitalisierte Körperumrisse verwendet, um das Schwerehoch mit entsprechenden Körpern nachzubilden. In der Oberflächengeologie fehlende Körper, deren Oberkante eventuell in geringer Tiefe, jedoch nicht an der Topografie liegt, werden dabei durch eine invertierbare Schicht angepasst. Bei der Interpretation soll diese Schicht an den Stellen, an denen sie verformt worden ist, darauf aufmerksam machen, dass hier wichtige Dichtekontraste fehlen. Dieser Test wird einmal mit vertikalen Körperflanken durchgeführt (ab Seite 75) und danach noch einmal mit der zusätzlichen Möglichkeit, die Körperunterkanten auch seitwärts zu verschieben (ab Seite 91) und damit verkippte Körper zu modellieren.

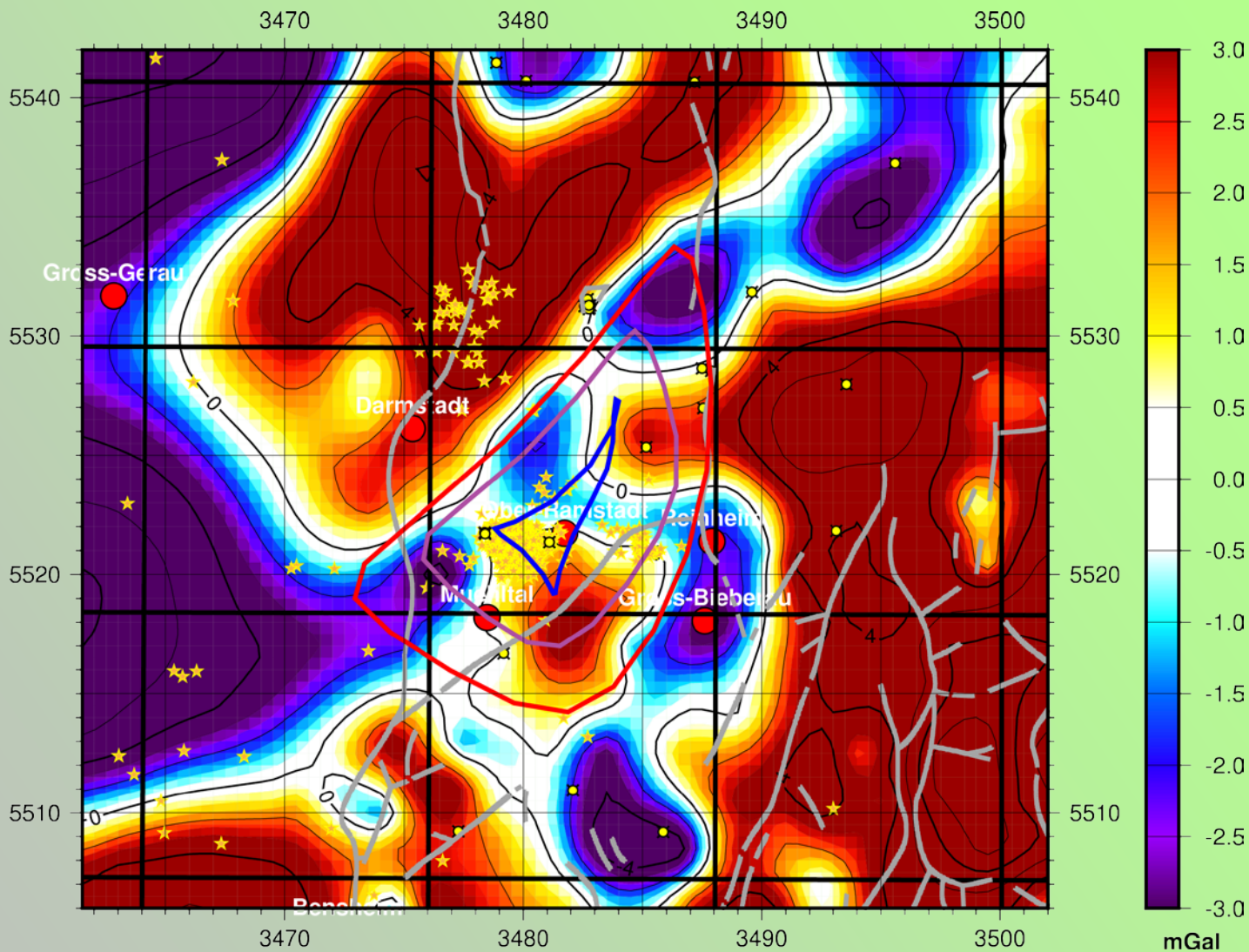
- » Dieses Modell fügt dem vorher gezeigten Basismodell einen Turm aus drei trochoidischen Polygonen hinzu. Der Startkörper ist in der Abbildung unten auf dieser Seite zu sehen.
- » Variablen sind neben den Schichtdichten und einem linearen Regionaltrend die Dichte und Geometrie des Turms.
- » Die Geometrie des Turms wird über Radien und Differenzradien (welche die Trochoide beschreiben) sowie Tiefen der so gebildeten Polygone definiert. Mit den verwendeten Startwerten können sich maximal vier „Ecken“ ausbilden.
- » Der Vorteil an dieser Parametrisierung ist, dass nur wenige Variablen benötigt werden und schnell eine grobe Abschätzung von Dichte, Lage und Volumen des Störkörpers erhalten wird. Dies hilft bei der Weiterentwicklung von Modellvorstellungen und Testideen.
- » Durch seine rundliche Form könnte der Trochoiden-Turm zum Beispiel eine intrusionsartige Struktur nachbilden.





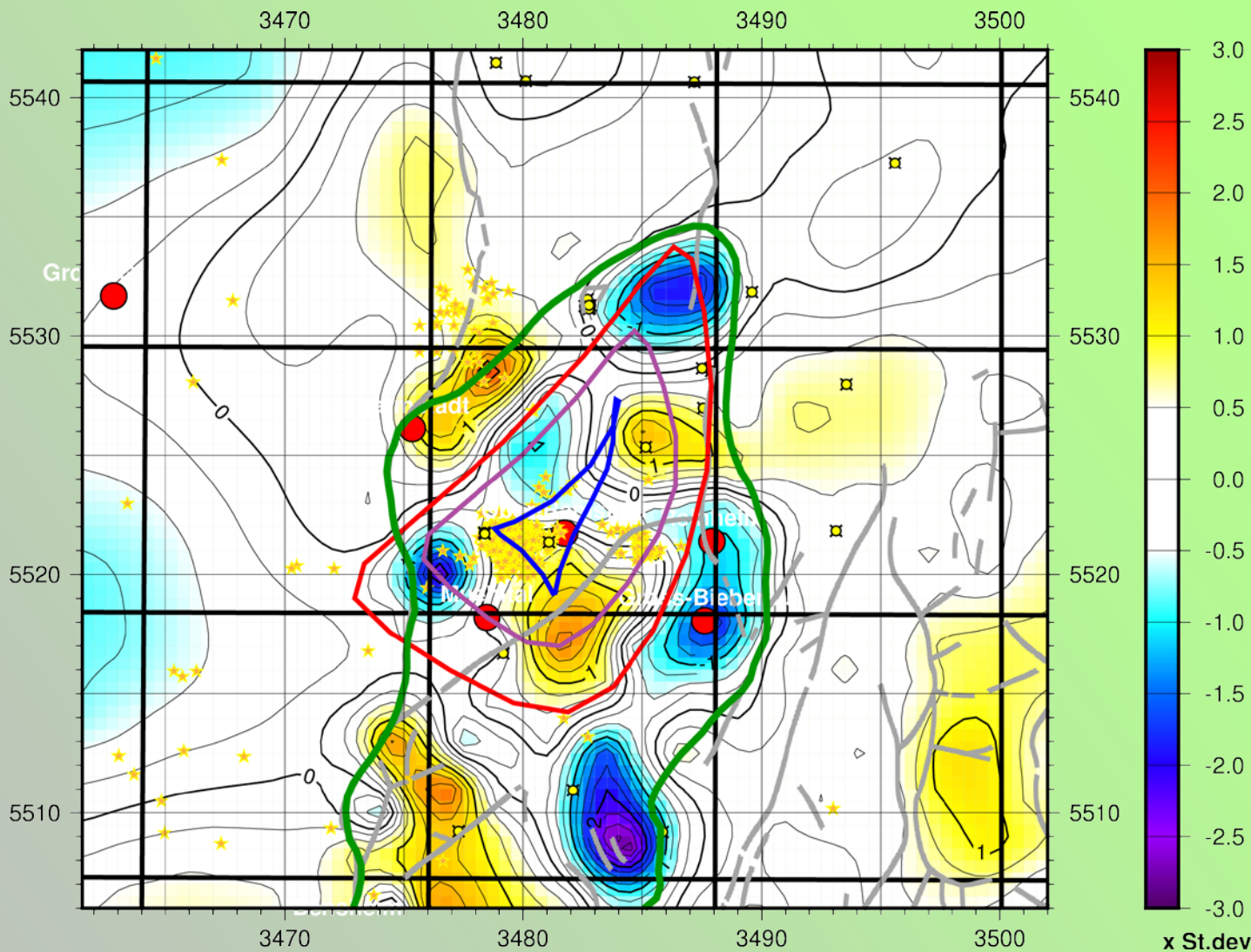


- » **Modellierte Schwere eines invertierten Trochoiden-Turms**
- » Die bunten Polylinien zeigen die Kanten des invertierten Körpers. Blau: oben (ca. 1km Tiefe), lila: Mitte (ca. 3km Tiefe), rot: unten (ca. 11.5km Tiefe).
- » Die invertierte Dichte des Trochoiden-Turms ist  $2894\text{kg/m}^3$ .



- » **Residuum eines invertierten Trochoiden-Turms**
- » Die bunten Polylinien zeigen die Kanten des invertierten Körpers. Blau: oben (ca. 1km Tiefe), lila: Mitte (ca. 3km), rot: unten (ca. 11.5km).
- » Gleichzeitig wurden die Dichten des Schichtmodells invertiert; Rotliegendes und Quartär-Tertiär mit lateraler Variation.



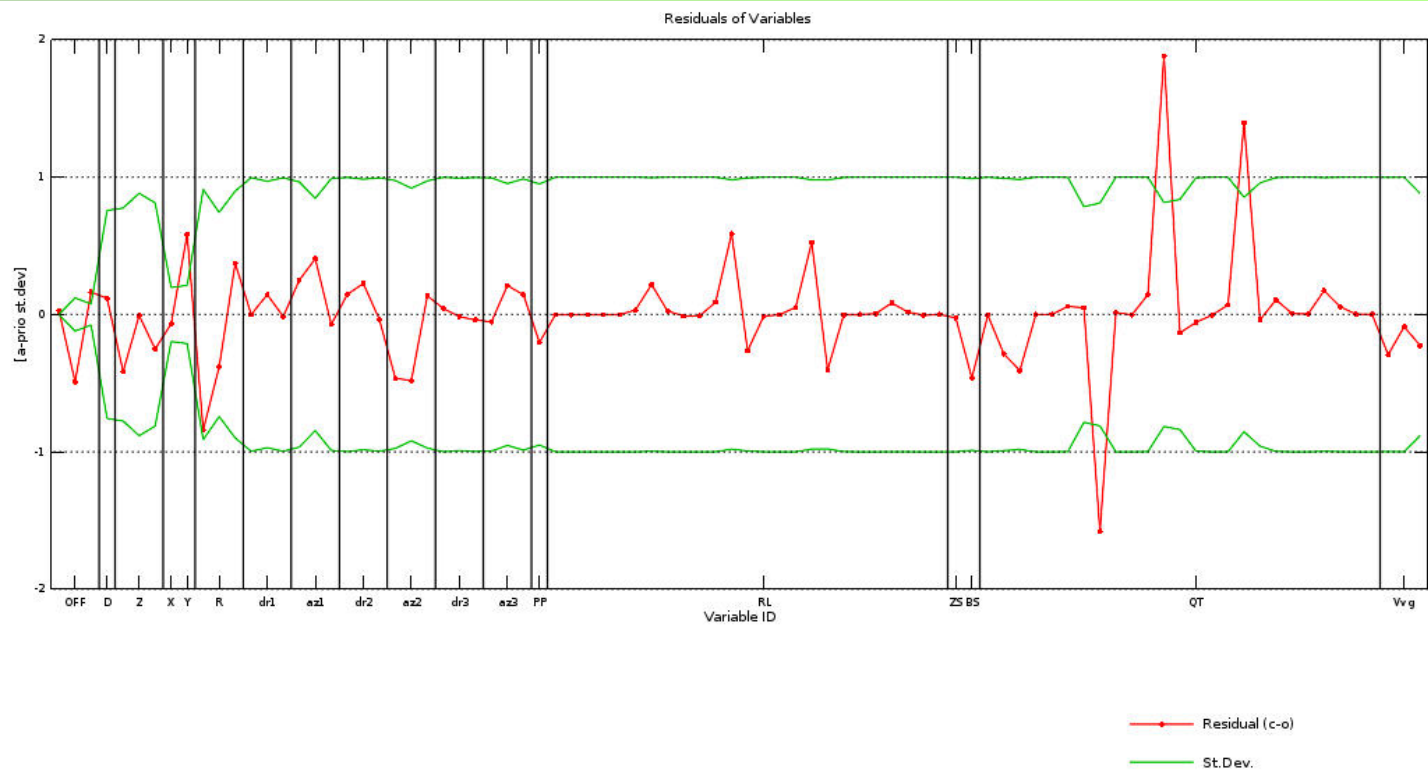


## » Normiertes Residuum eines invertierten Trochoiden-Turms

» Da außerhalb des Interessengebiets (angezeigt durch die grüne Polylinie) die Beobachtungen geringer gewichtet wurden, wird hier ein normiertes Residuum gezeigt. Daran wird deutlich, dass die Inversion im Interessengebiet einen deutlich höheren Druck hat, den Schweremessungen zu entsprechen.

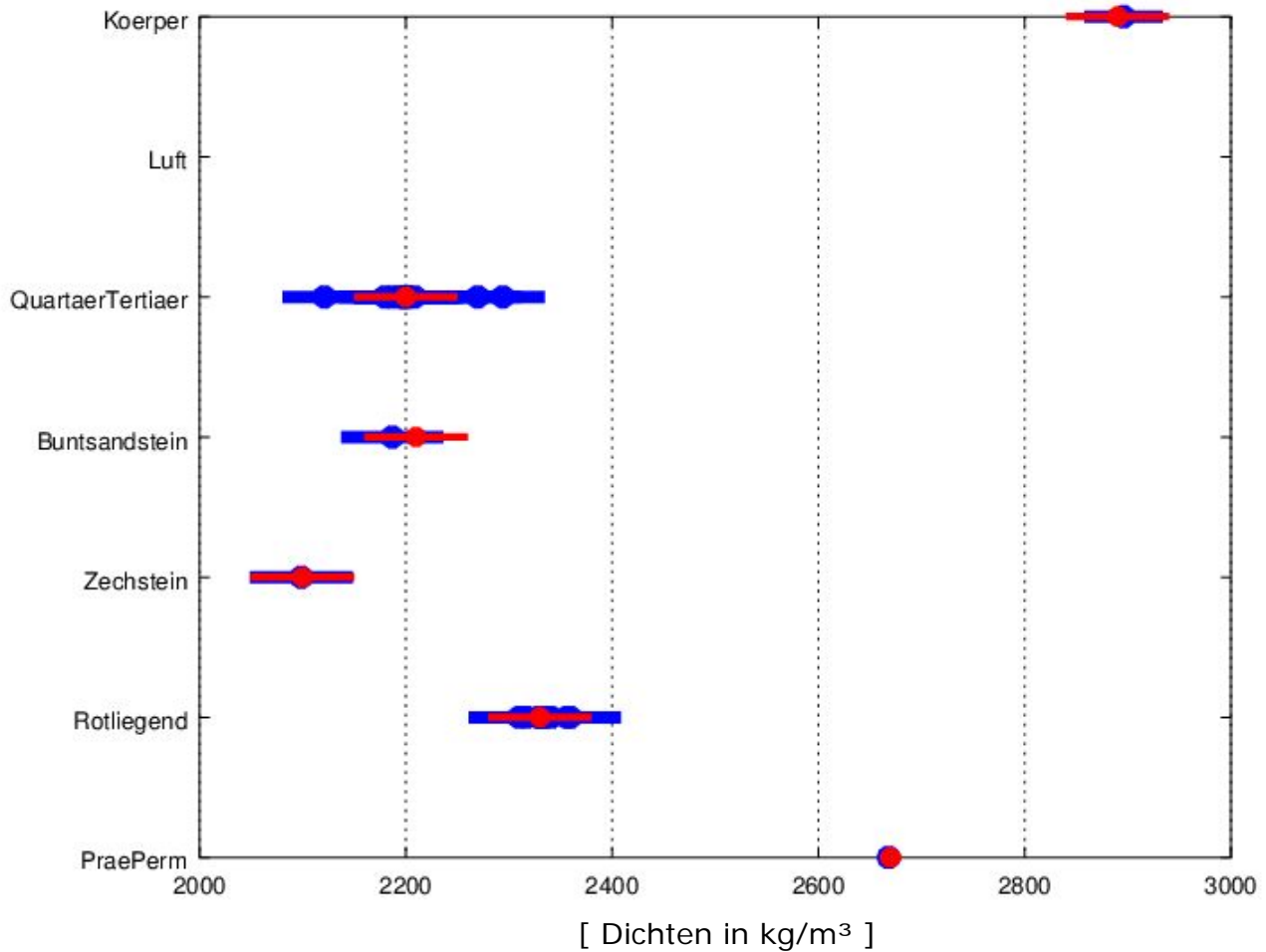
» Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 2.31mGal.





## » Inversionsstatistik des Modells

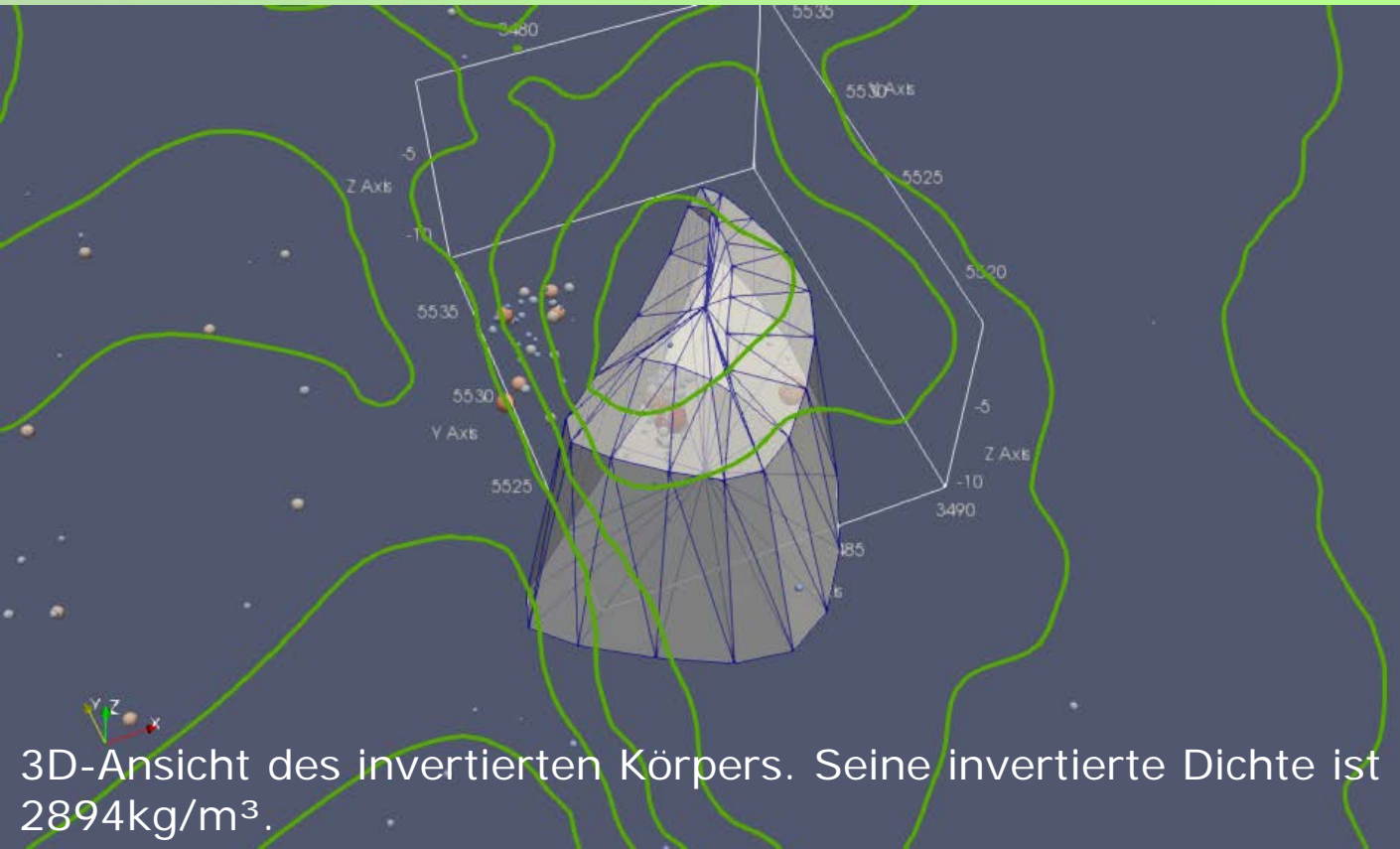
- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.



## » Modelldichten

- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.
- » Quartär und Rotliegendes besitzen laterale Dichtevariationen und sind daher durch mehrere Punkte repräsentiert.
- » Wo es vertikale Dichteänderungen innerhalb einer Schicht gibt, gilt die dargestellte Dichte für die mittlere Tiefe.

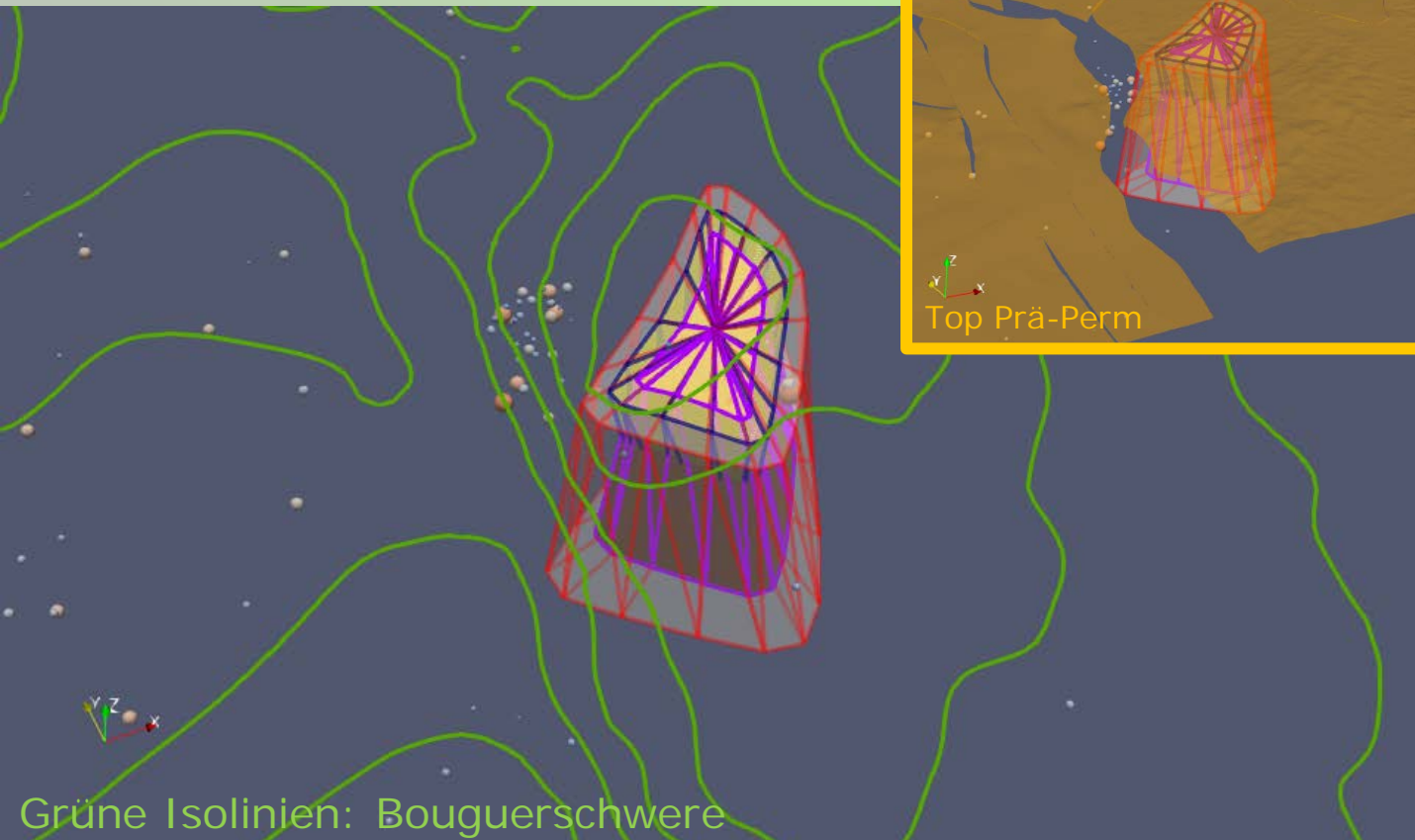
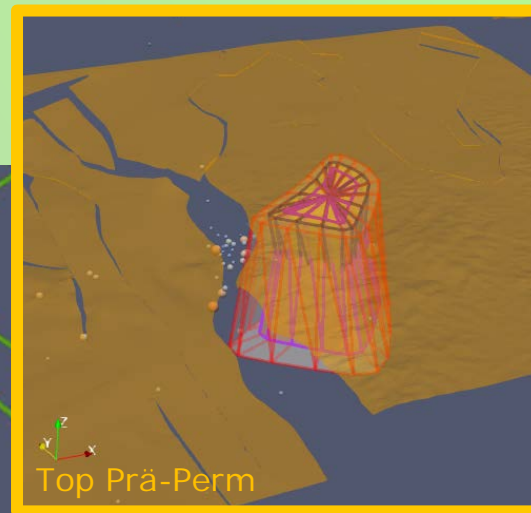
# Konischer Trochoiden-Turm

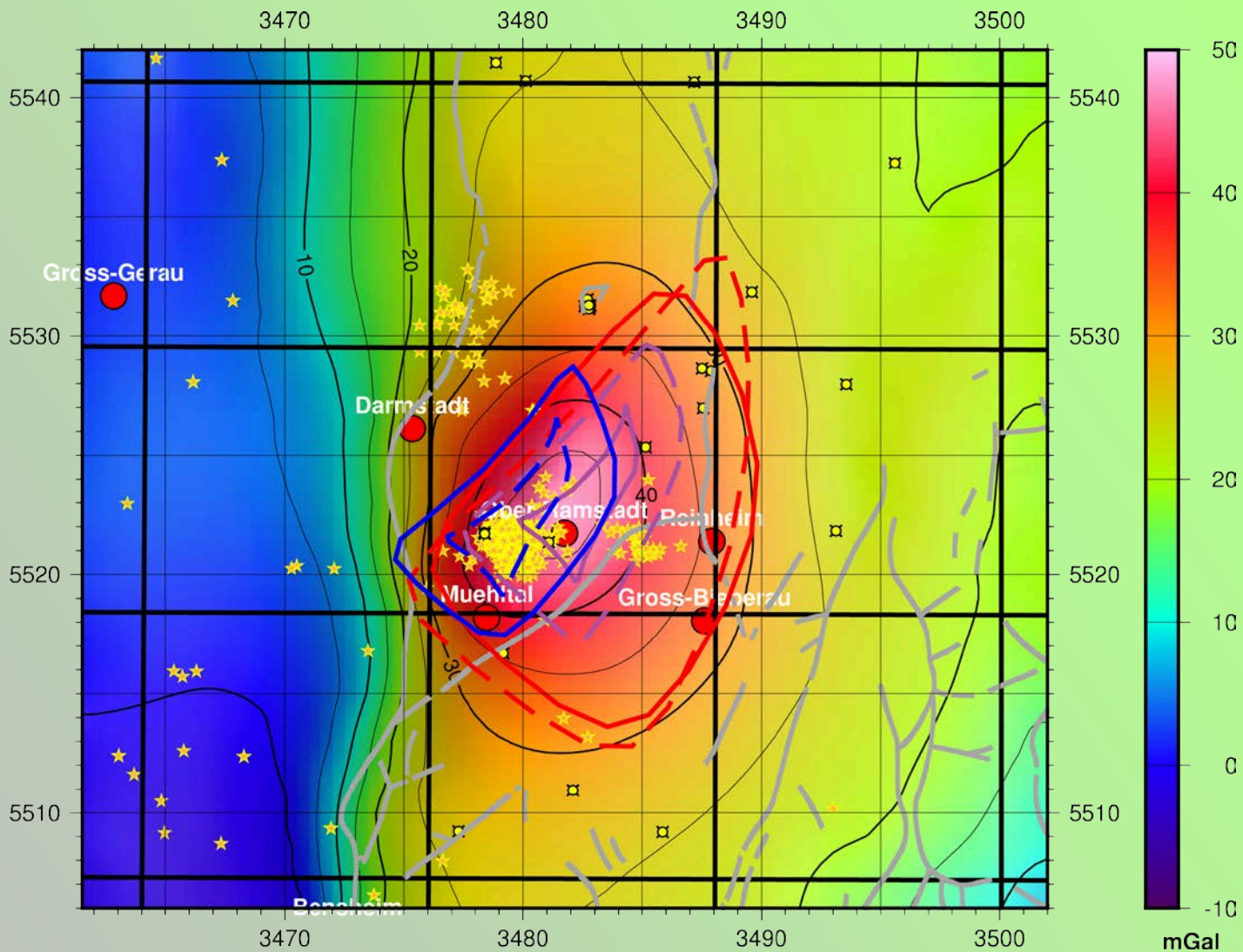




- » Aus dem Modell mit dem konischen Trochoiden-Turm kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Es wird ein großes Volumen erhöhter Dichte benötigt, um das Schweremaximum zu erklären.
  - » Eine Mächtigkeit von 10km wäre möglich.
  - » Der Mittelpunkt des Trochoiden-Turms ist in der Inversion gut aufgelöst.
  - » Die genaue Form des Turms ist nicht gut bestimmbar, eine ungefähre Form lässt sich jedoch gut ableiten.
  - » Die Dichten des Basismodells sind für die Inversion von untergeordneter Bedeutung.

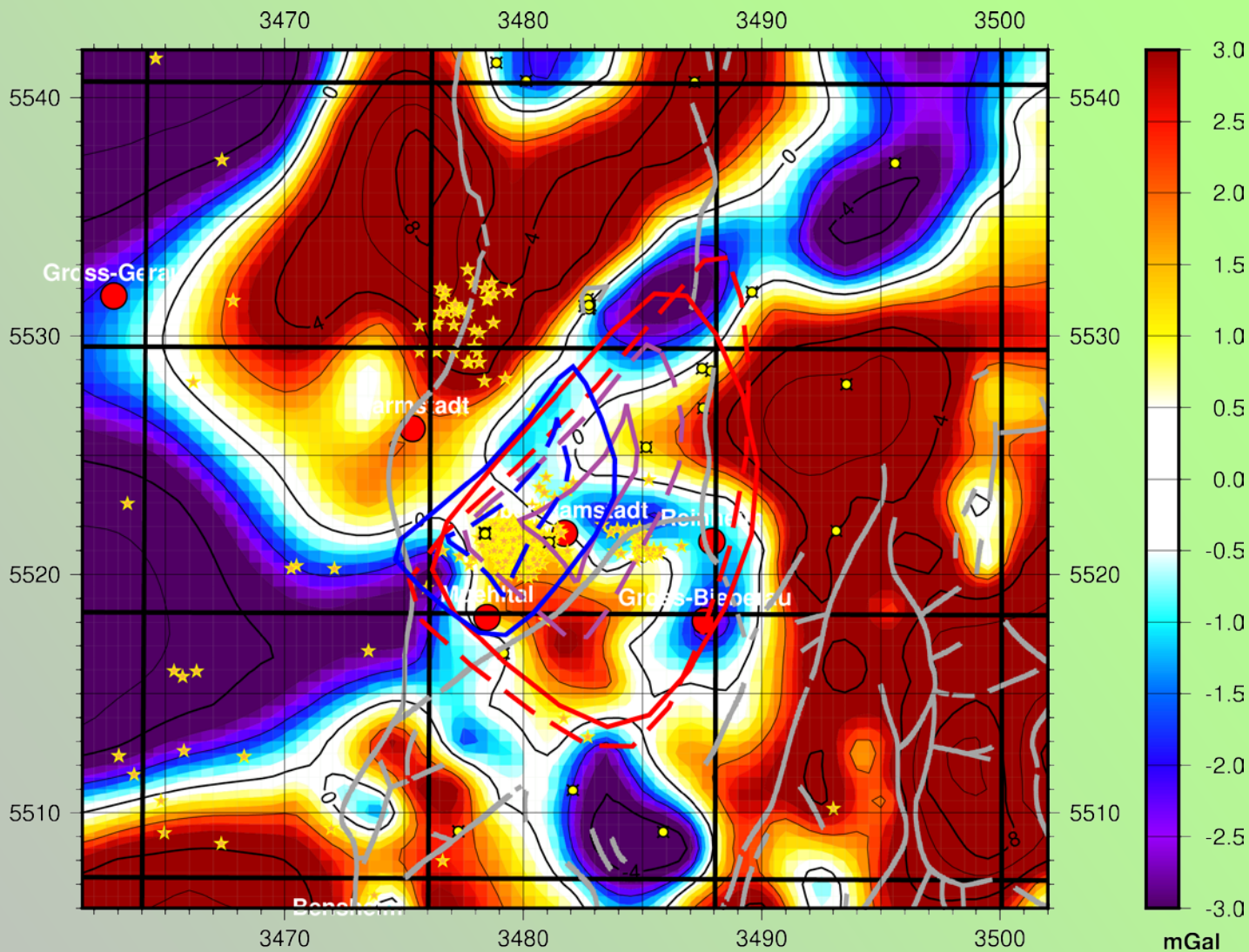
- » Dieses Modell fügt dem Basismodell drei Körper hinzu, die je durch zwei trochoidische Polygone aufgespannt werden. Die Startkörper sind in der Abbildung unten auf dieser Seite zu sehen. Wo sich die Körper überlagern, werden ihre Dichtekontraste von initial je  $100\text{kg/m}^3$  addiert, so dass sich im Startmodell ein maximaler Dichtekontrast von  $300\text{kg/m}^3$  zum umgebenden Material ergibt.
- » Variablen sind neben den Schichtdichten und einem linearen Regionaltrend die Dichten und Geometrien der drei Körper.
- » Dieses Modell bietet gegenüber dem Trochoiden-Turm den Vorteil, einen Dichtegradienten nachbilden zu können. Aus der Schwerekarte und den zugehörigen Attributen (Bericht Teil 1) kann abgeleitet werden, dass die nördliche Kante des Maximums von einem starken Dichtekontrast hervorgerufen wird, während die südliche Kante möglicherweise von einem weicherem Dichtegradienten erzeugt wird.





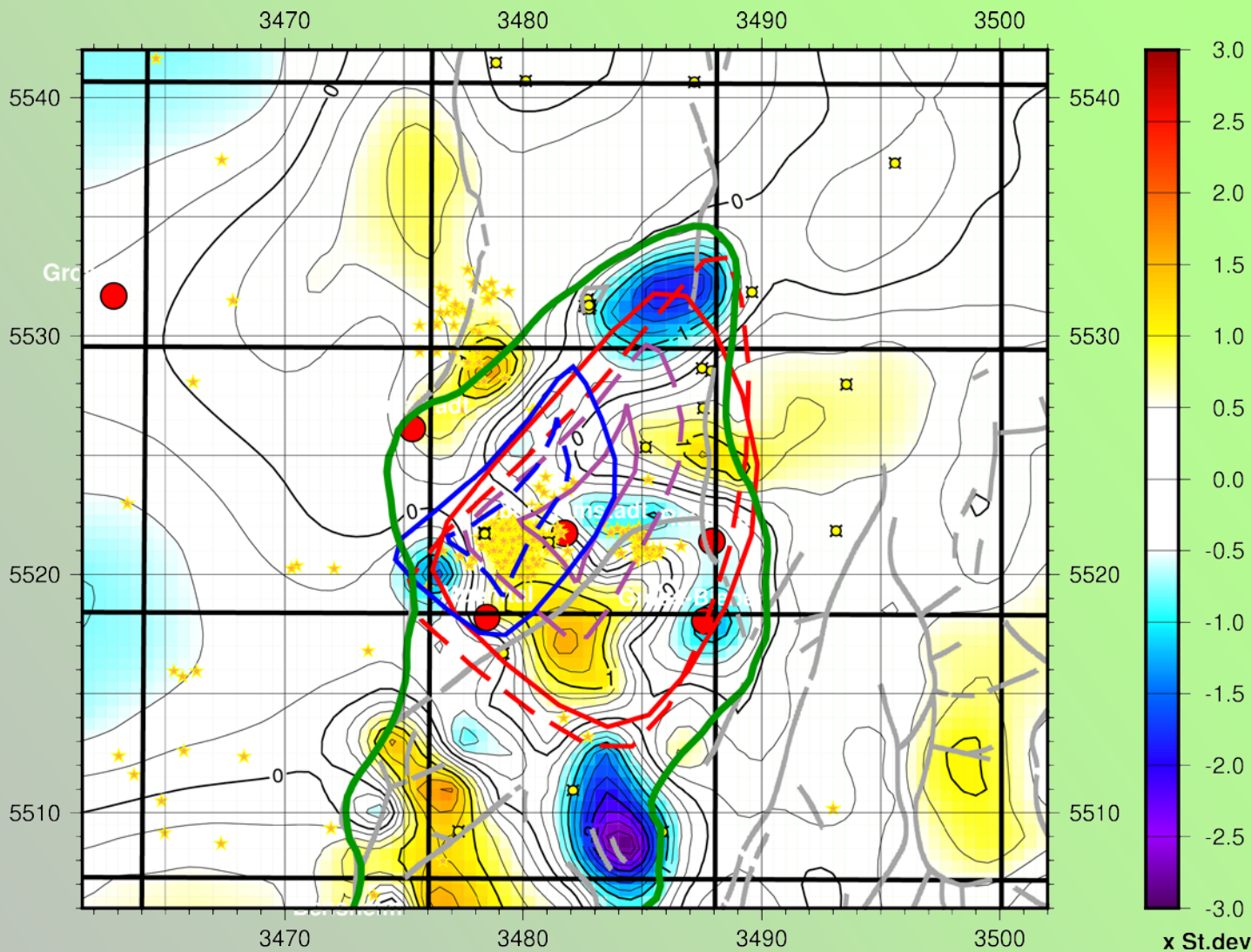
- » **Modellierte Schwere von drei invertierten konischen Trochoiden**
- » Die bunten Polylinien zeigen die Kanten der invertierten Körper. Körper 1: rot, Körper 2: lila, Körper 3: blau. Die gestrichelten Linien stellen jeweils die Körperunterkanten dar.
- » Wo sich die Körper durchdringen, wird ihre Dichte addiert. Die so entstandene maximale Dichte ist  $2969\text{kg/m}^3$ .





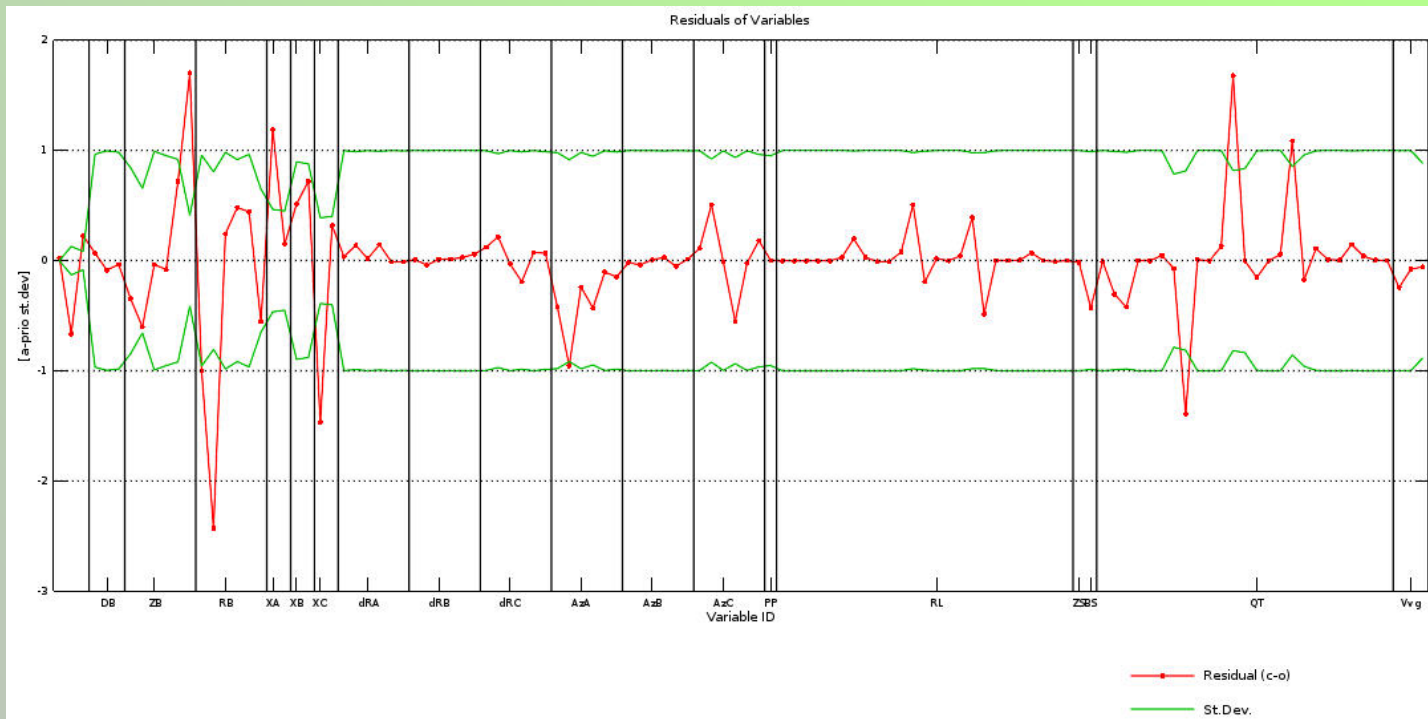
## » Residuum drei invertierter konischer Trochoide

- » Um den Einfluss des für die Schwere nicht optimalen Schichtmodell zu minimieren, wurden in allen Modellen die Beobachtungen außerhalb des Interessengebiets herabgewichtet (siehe nächste Seite).



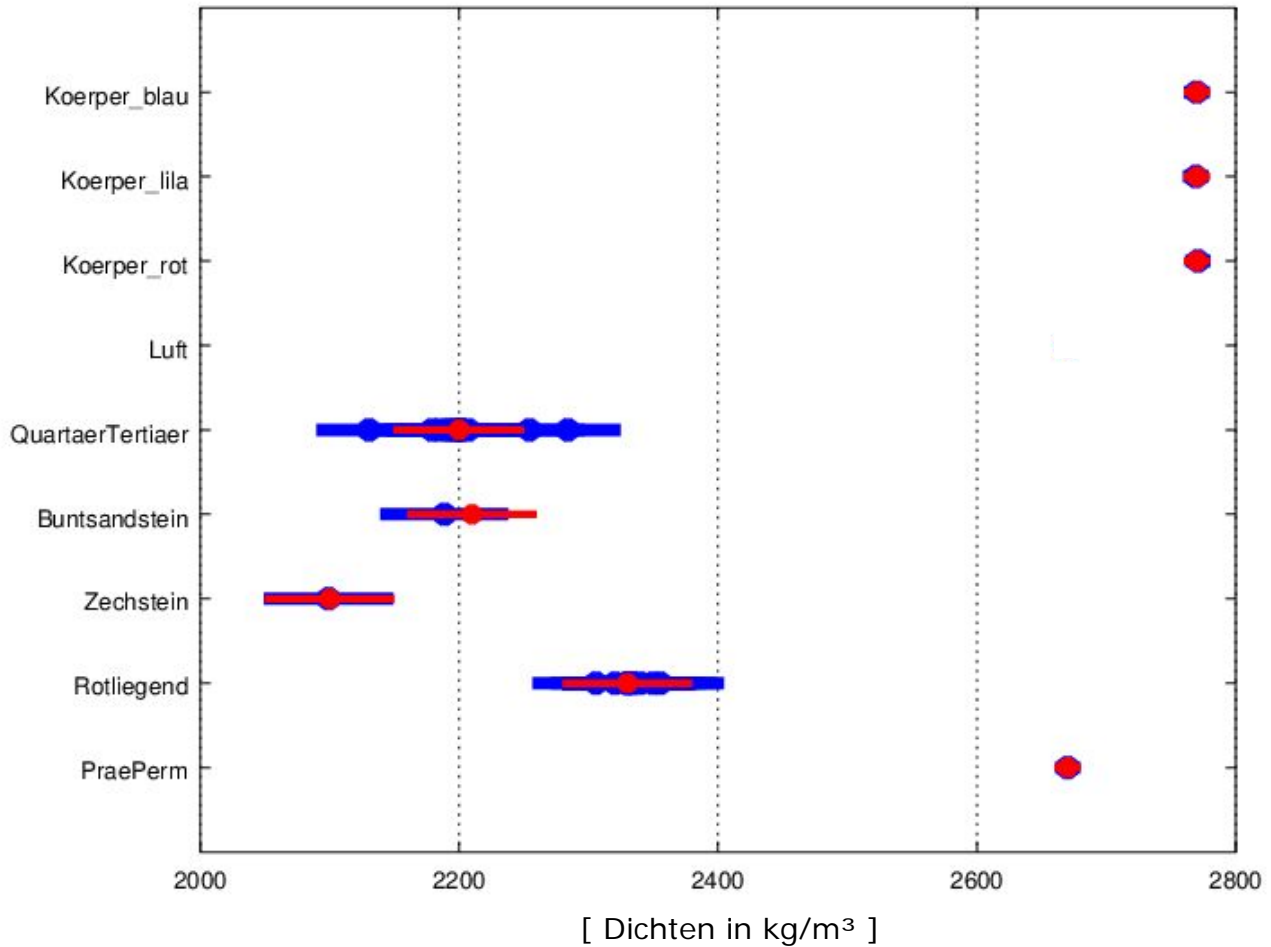
- » **Normalisiertes Residuum drei invertierter konischer Trochoide**
- » Das grüne Polygon zeigt das Interessengebiet, außerhalb welchem die Beobachtungen geringer gewichtet wurden. Die Werte der Karte beziehen sich darauf, um wieviel die a-priori Standardabweichung an den Messlokationen überschritten wird.
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 2.12mGal.





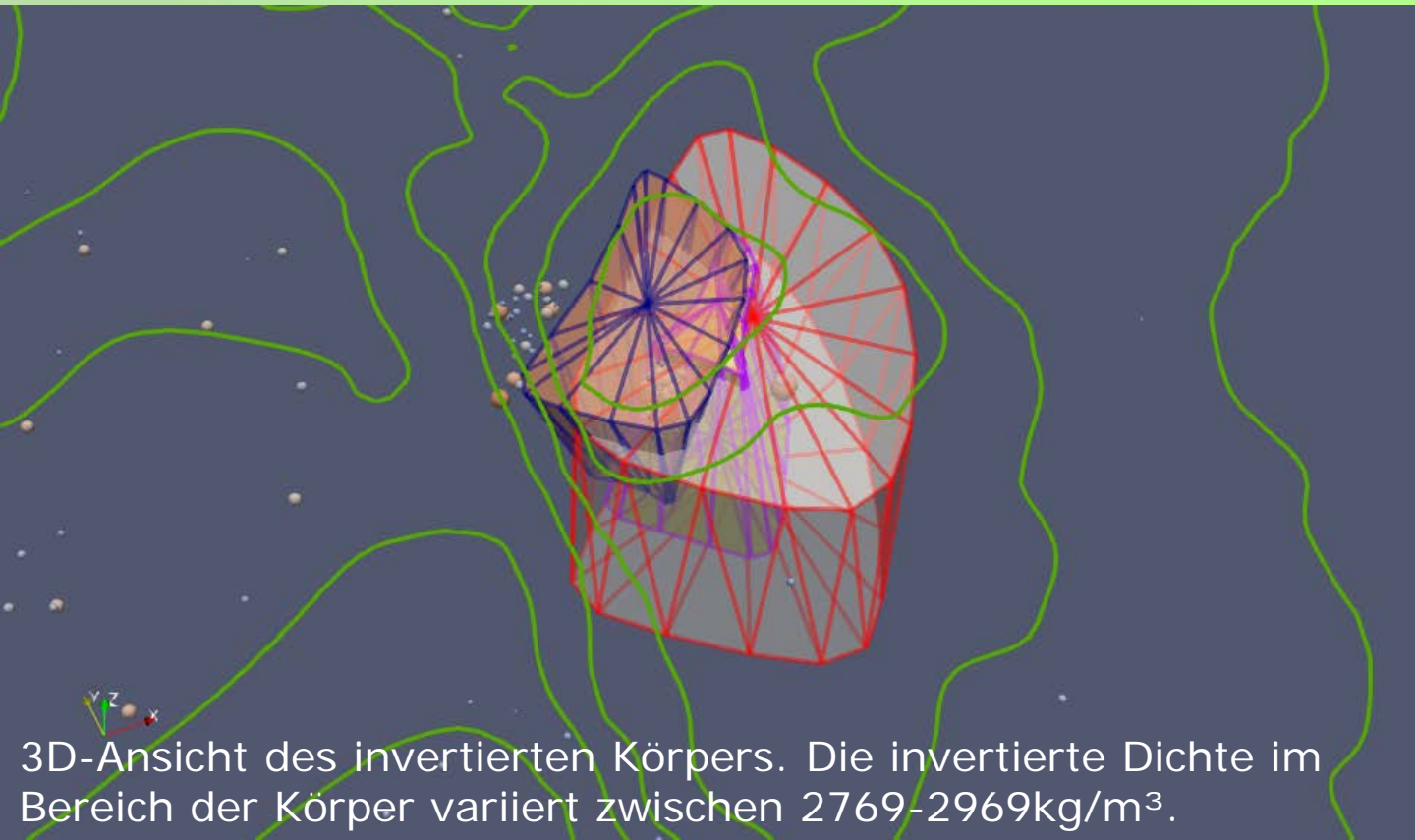
## » Inversionsstatistik des Modells

- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.

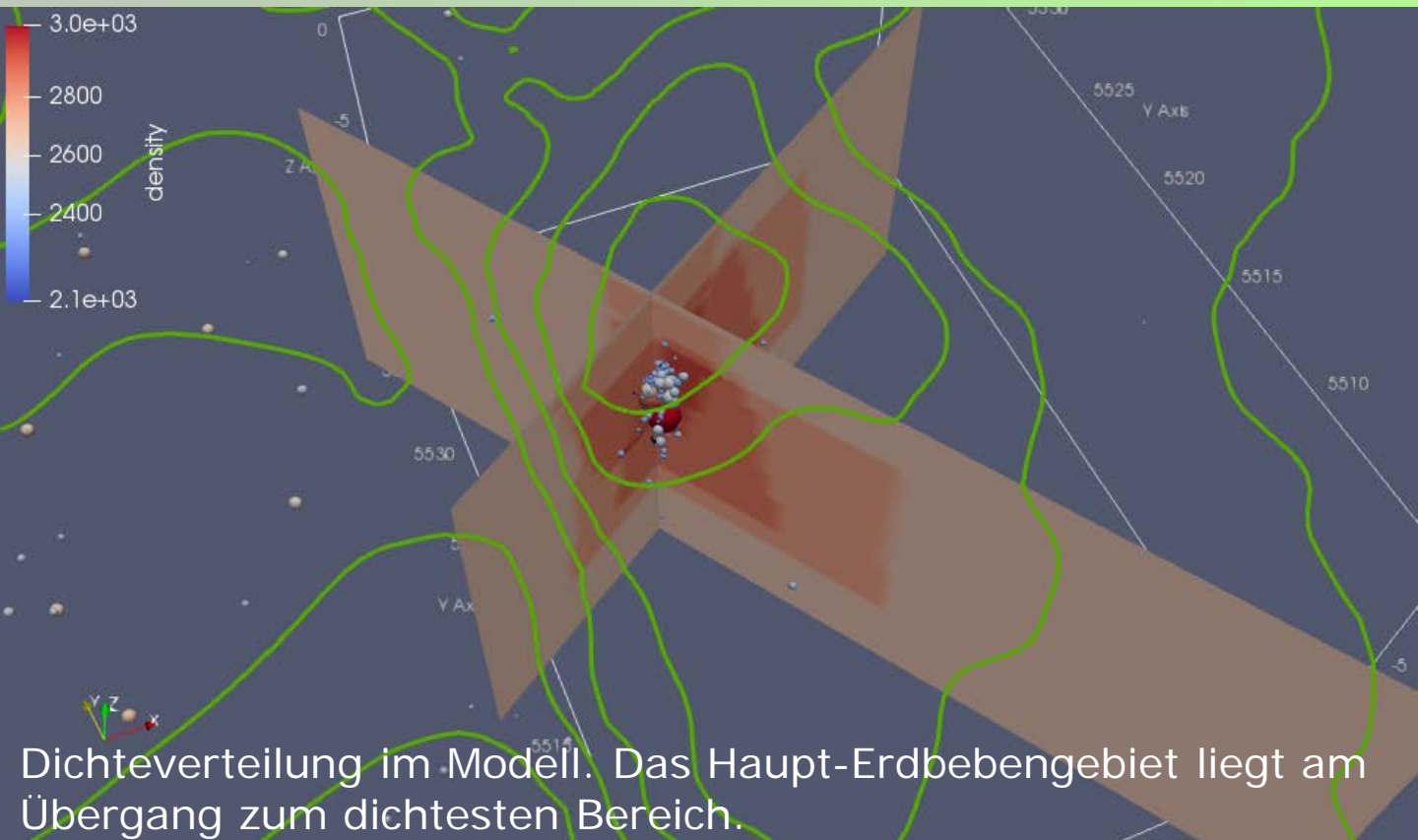


## » Modelldichten

- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.
- » Wo sich die Körper überlagern, addiert sich ihre Differenzdichte zu der invertierten Prä-Perm-Dichte von  $2670\text{kg/m}^3$ . Die maximale Dichte innerhalb der Körper beträgt deshalb  $2969\text{kg/m}^3$ .



3D-Ansicht des invertierten Körpers. Die invertierte Dichte im Bereich der Körper variiert zwischen  $2769\text{-}2969\text{kg/m}^3$ .



Dichteverteilung im Modell. Das Haupt-Erdbebengebiet liegt am Übergang zum dichtesten Bereich.

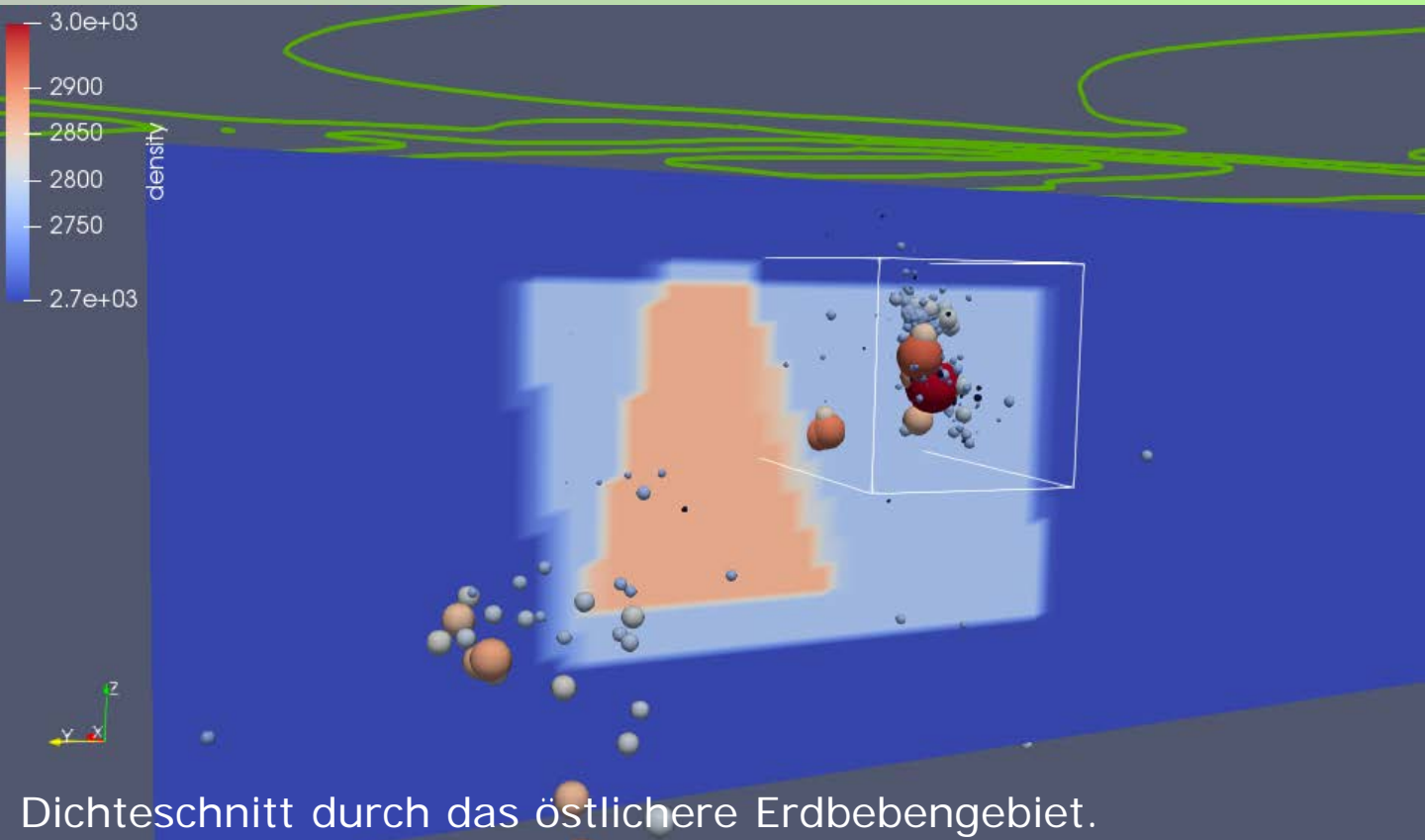




Die Dichtefarbskala wurde in dieser Darstellung an die Körperdichte angepasst (auf der vorherigen Seite war die Skala an das gesamte Modell angepasst).

- » **3D-Ansicht von oben**
- » 3D-Ansicht des lilafarbenen invertierten Körpers zusammen mit zwei Dichteschnitten durch die Erdbebengebiete (siehe auch nächste Seite).
- » Die weiße Box zeigt den Bereich zwischen
  - x: 3478km / 3486km
  - y: 5518.5km / 5523.5km
  - z: -6.5km / -1.5km

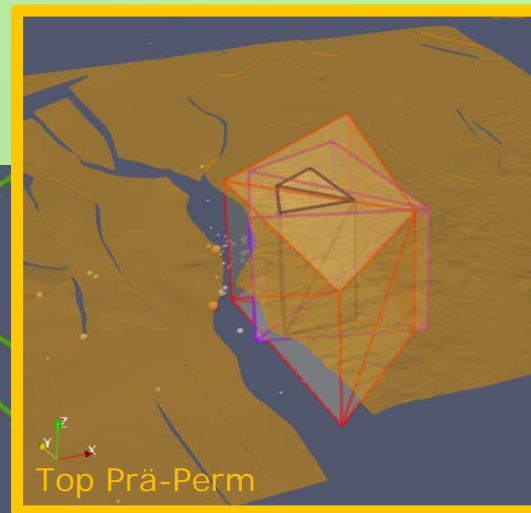
# Drei konische Trochoide



- » Aus dem Modell mit den drei konischen Trochoiden kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Wie erwartet benötigt die nördliche Kante einen starken Dichtekontrast, während die südliche einen weicherer Dichtegradienten bevorzugt.
  - » Die Erdbeben scheinen am Rand des dichtesten Bereichs zu liegen.
  - » Die Lage des roten und des blauen Trochoids scheint besser aufgelöst zu sein als die des lilafarbenen.
  - » Die genaue Form der Trochoiden ist für das Inversionsergebnis nicht so wichtig.

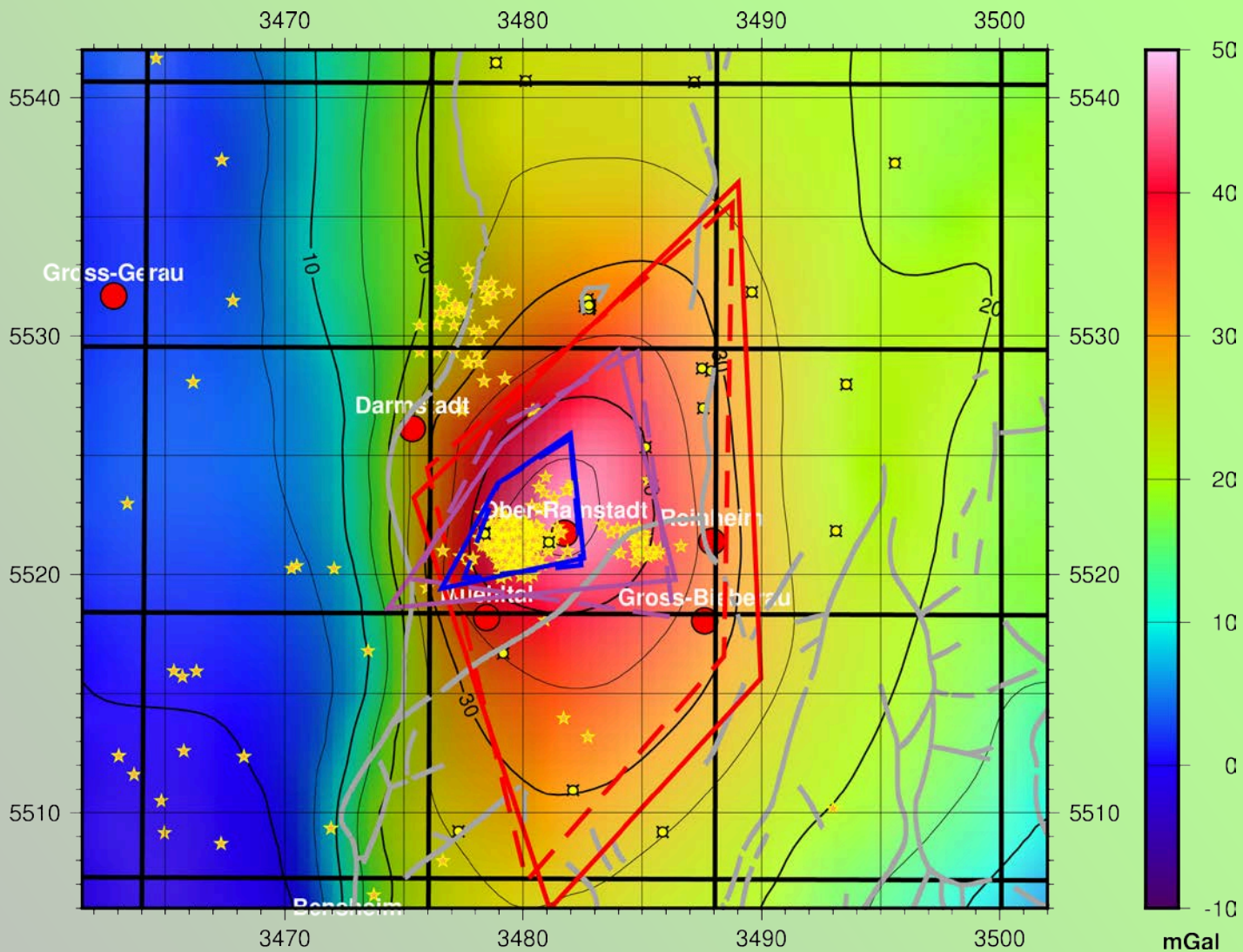


- » Dieses Modell fügt dem Basismodell drei Körper hinzu, die je durch zwei viereckige Polygone aufgespannt werden. Die Startkörper sind in der Abbildung unten auf dieser Seite zu sehen. Wo sich die Körper überlagern, werden ihre Dichtekontraste von initial je  $100\text{kg/m}^3$  addiert, so dass sich im Startmodell ein maximaler Dichtekontrast von  $300\text{kg/m}^3$  zum umgebenden Material ergibt.
- » Variablen sind neben den Schichtdichten und einem linearen Regionaltrend die Dichten und Lage der Eckpunkte der drei Körper.
- » Dieses Modell besitzt noch einige Variablen mehr als das mit den drei Trochoiden, hat aber den Vorteil, dass die Körper auch so verformt werden können, wie es mit Trochoiden nur schwer nachzubilden ist. Die viereckigen Polygonkörper können eventuelle blockartige Strukturen besser darstellen.



Grüne Isolinien: Bouguerschwere

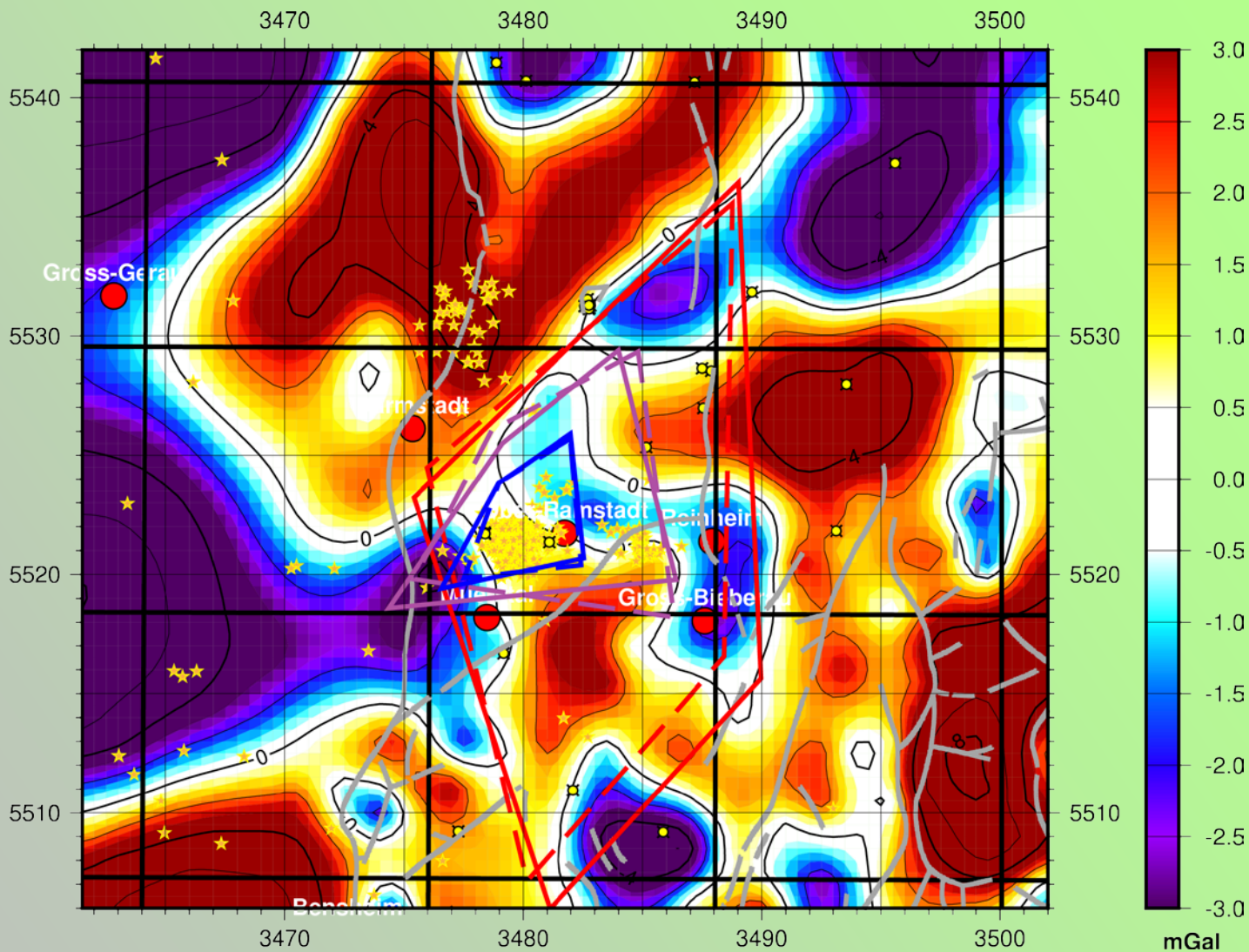
# Drei viereckige Polygonkörper



- » **Modellierte Schwere von drei invertierten Polygonkörpern**
- » Die bunten Polylinien zeigen die Kanten der invertierten Körper. Körper 1: rot, Körper 2: lila, Körper 3: blau. Die gestrichelten Linien zeigen jeweils die Körperunterkanten.
- » Wo sich die Körper durchdringen, wird ihre Dichte addiert. Die so entstandene maximale Dichte ist  $2953\text{kg/m}^3$ .



# Drei viereckige Polygonkörper

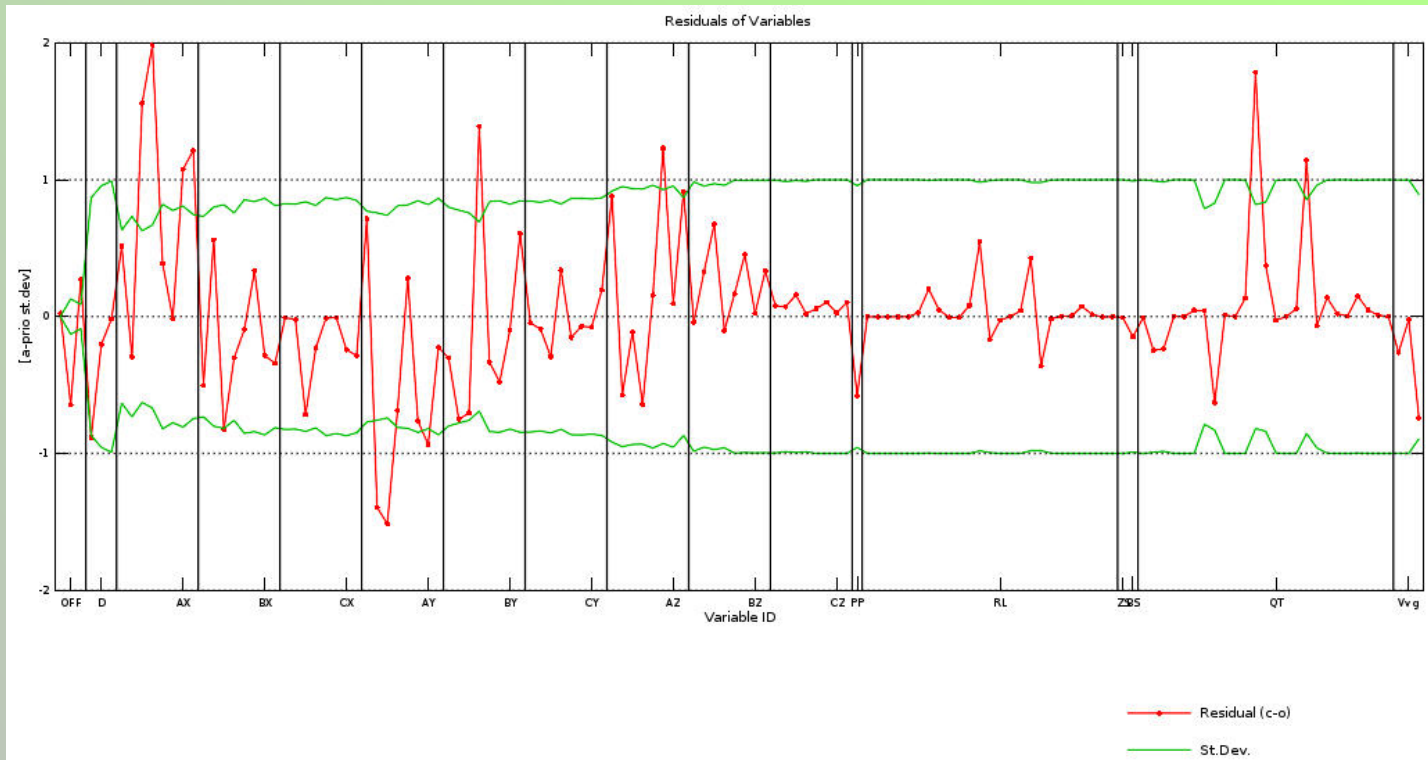


## » Residuum von drei invertierten Polygonkörpern

- » Wie bei den anderen Inversionen wurden die Schichtdichten und ein Regionaltrend mit angepasst. Um den Einfluss des für die Schwere nicht optimalen Schichtmodells zu minimieren, wurden die Beobachtungen in allen Modellen außerhalb des Interessenbereichs herabgewichtet (siehe nächste Seite).

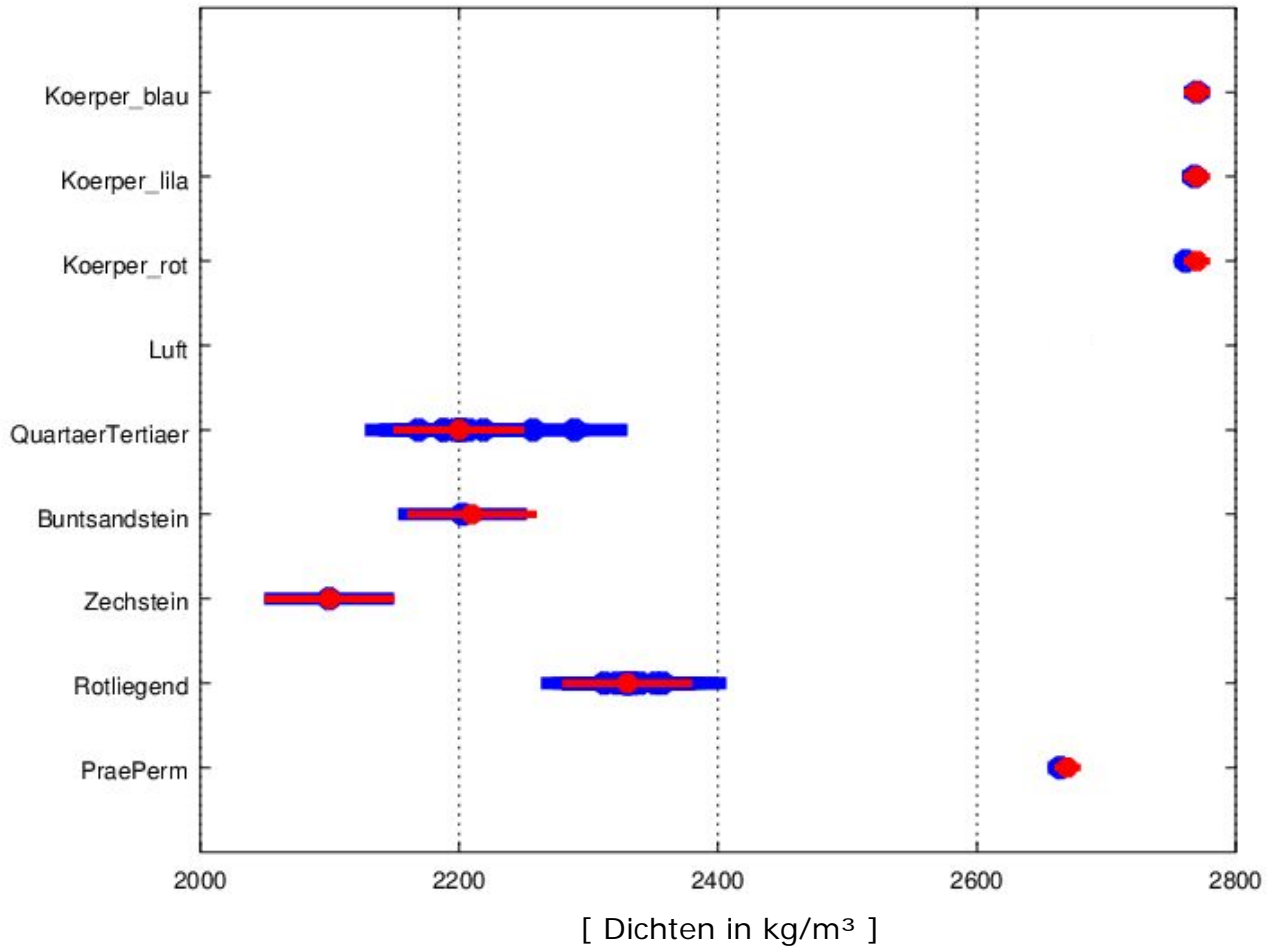






## » Inversionsstatistik des Modells

- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.

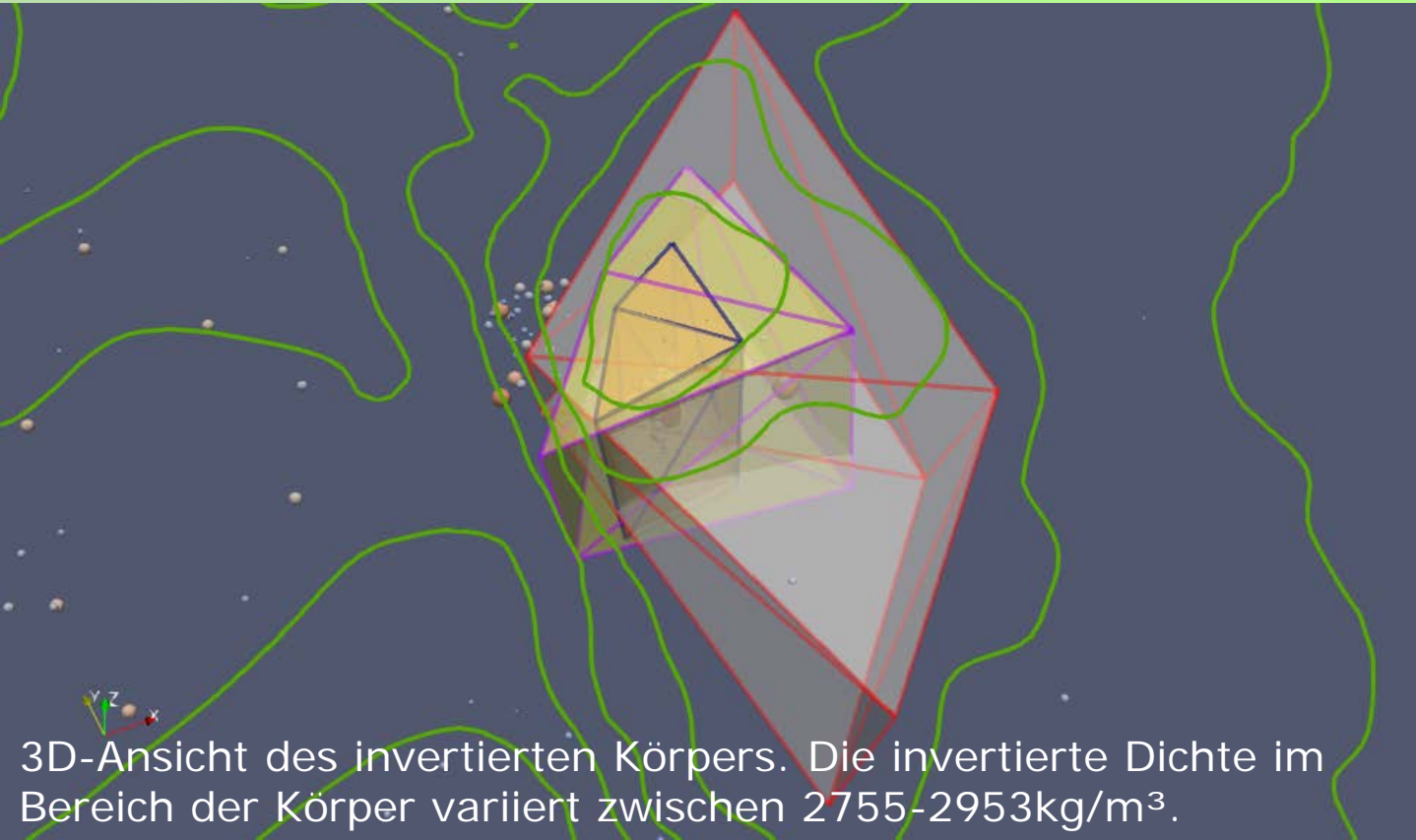


## » Modelldichten

- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.
- » Wo sich die Körper überlagern, addiert sich ihre Differenzdichte zu der invertierten Prä-Perm-Dichte von  $2664\text{kg/m}^3$ . Die maximale Dichte innerhalb der Körper beträgt deshalb  $2953\text{kg/m}^3$ .



# Drei viereckige Polygonkörper



3D-Ansicht des invertierten Körpers. Die invertierte Dichte im Bereich der Körper variiert zwischen 2755-2953kg/m<sup>3</sup>.

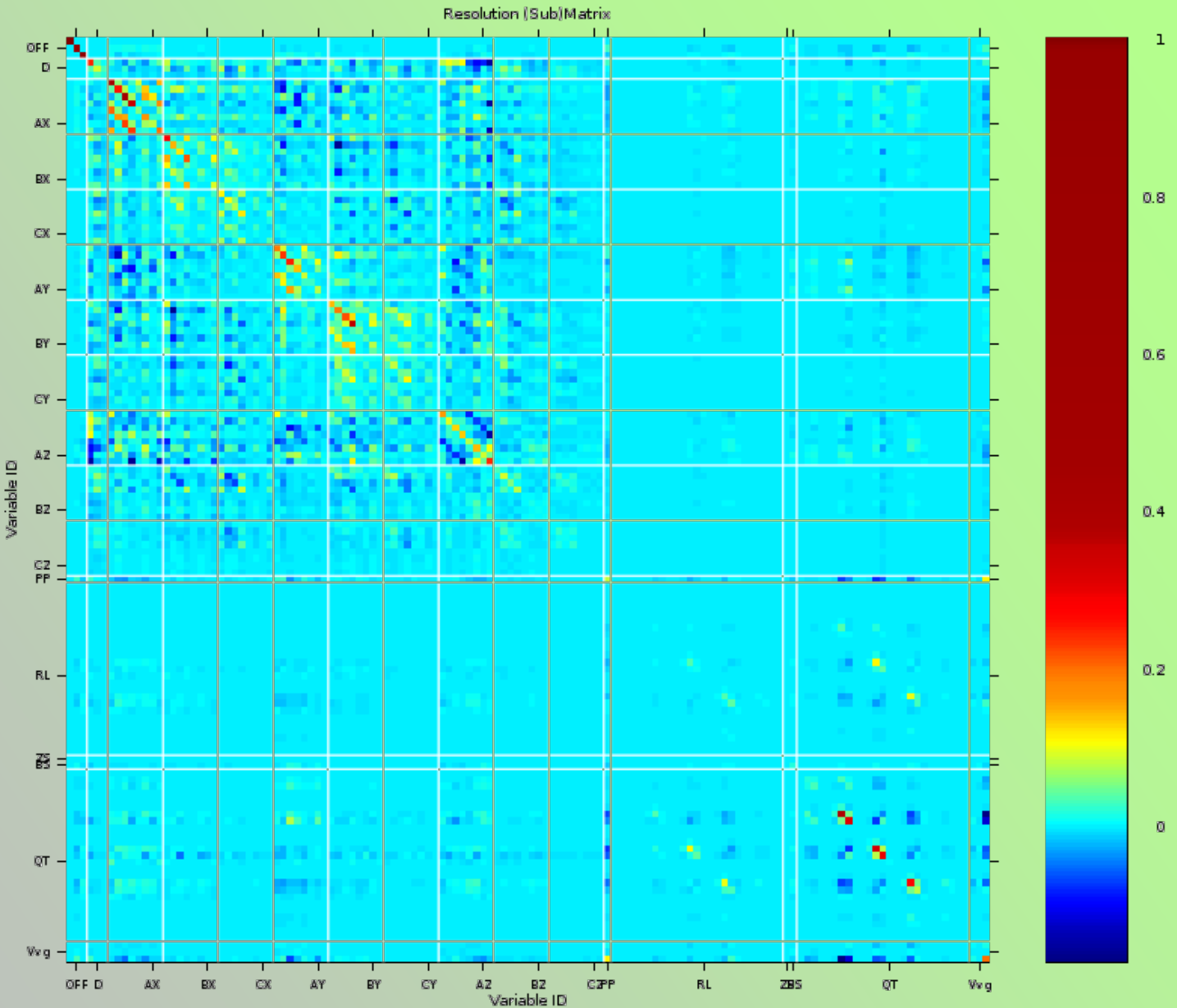


Das Haupt-Erdbebengebiet liegt im dichtesten Bereich. Auch ein Ergebnis mit den Erdbeben am Übergang zum dichtesten Bereich ließe sich mit gleich guter Anpassung produzieren.

- » Aus dem Modell mit den drei viereckigen Polygonkörpern kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Die nördliche Kante hat auch hier einen stärkeren Dichtekontrast als die südliche.
  - » Die Erdbeben liegen am Rand oder in der Nähe des dichtesten Bereichs.
  - » Im Vergleich zu der erwarteten Genauigkeit sind die horizontalen Positionen der Eckpunkte besser bestimmt als die Tiefenlage.
  - » Die Tiefenlagen sind beim größten Körper besser bestimmbar als bei den kleineren.
  - » Wie bei den vorherigen Modellen auch sind bis auf drei Dichten im Quartär-Tertiär die Horizontdichten für die Inversion nicht besser bestimmbar als deren geologisch wahrscheinliche Variationsbreite.

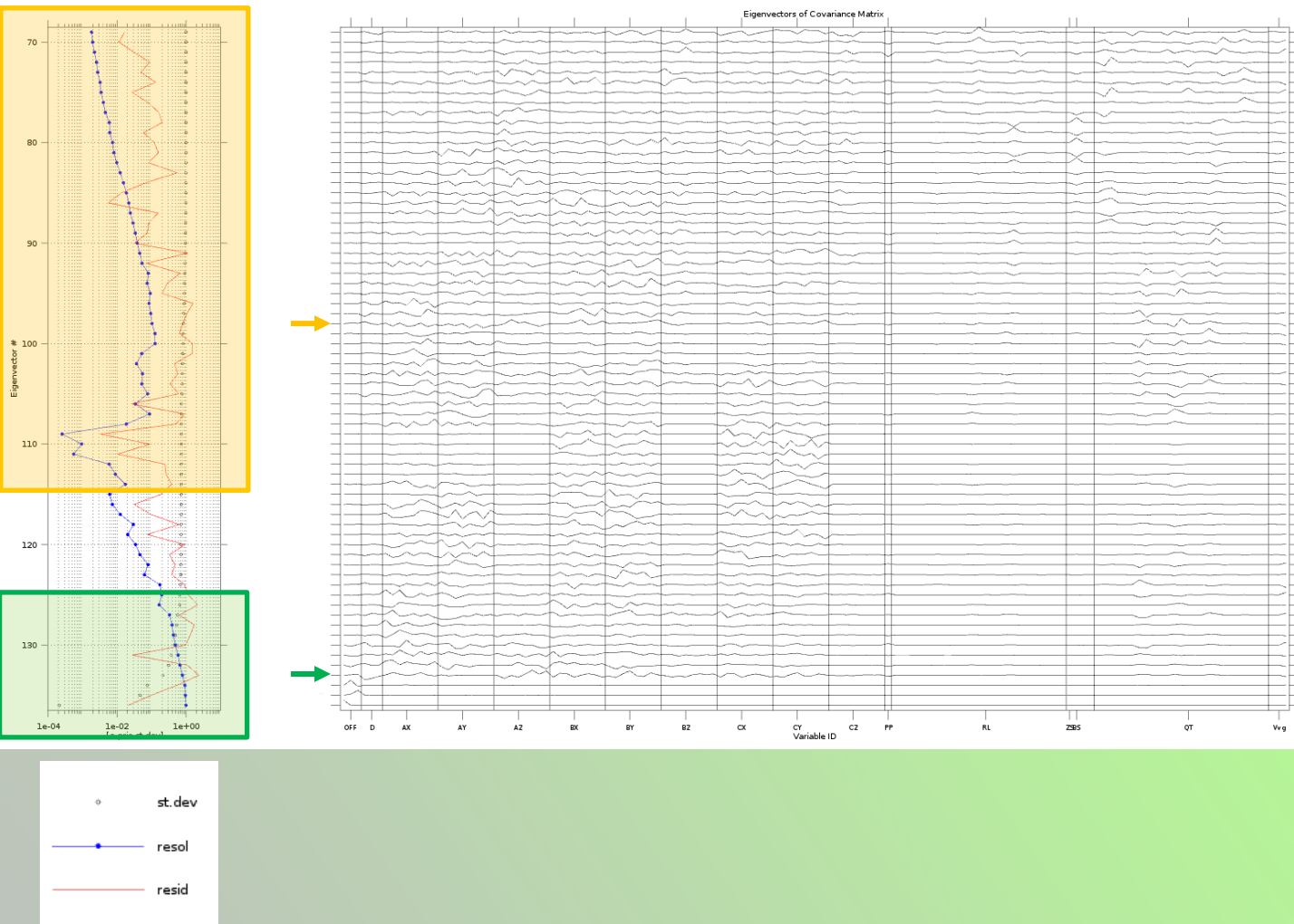
- » Am Beispiel der viereckigen Polygonkörper wird auf den folgenden Seiten gezeigt, dass nicht nur die Streubreite der einzelnen Variablen interpretiert werden kann, sondern auch die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Größen.
- » In der Auflösungs-Matrix werden paarweise Zusammenhänge dargestellt und können leicht grobe Muster erkannt werden.
- » In den Eigenvektoren können komplexere Abhängigkeiten identifiziert werden. Insbesondere werden besonders gut und besonders schlecht aufgelöste Kombinationen von Modelleigenschaften hervorgehoben.
- » Gut bestimmbare Kombinationen bewirken einen relativ großen Schwereeffekt bei nur kleinen Änderungen. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn das Volumen eines Störkörpers durch die Änderung deutlich verändert wird. Schlecht bestimmbare Kombinationen dagegen bewirken einen ähnlichen Schwereeffekt nur bei großen Änderungen. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn das Volumen des Störkörpers zwar stark zunimmt, die Dichte aber gleichzeitig abnimmt.
- » Beispielhaft werden zwei Eigenvektoren in Form von Modelländerungen und deren Auswirkung auf die Anpassung an die Beobachtungsdaten visualisiert.





## » Auflösungs-Matrix des Modells

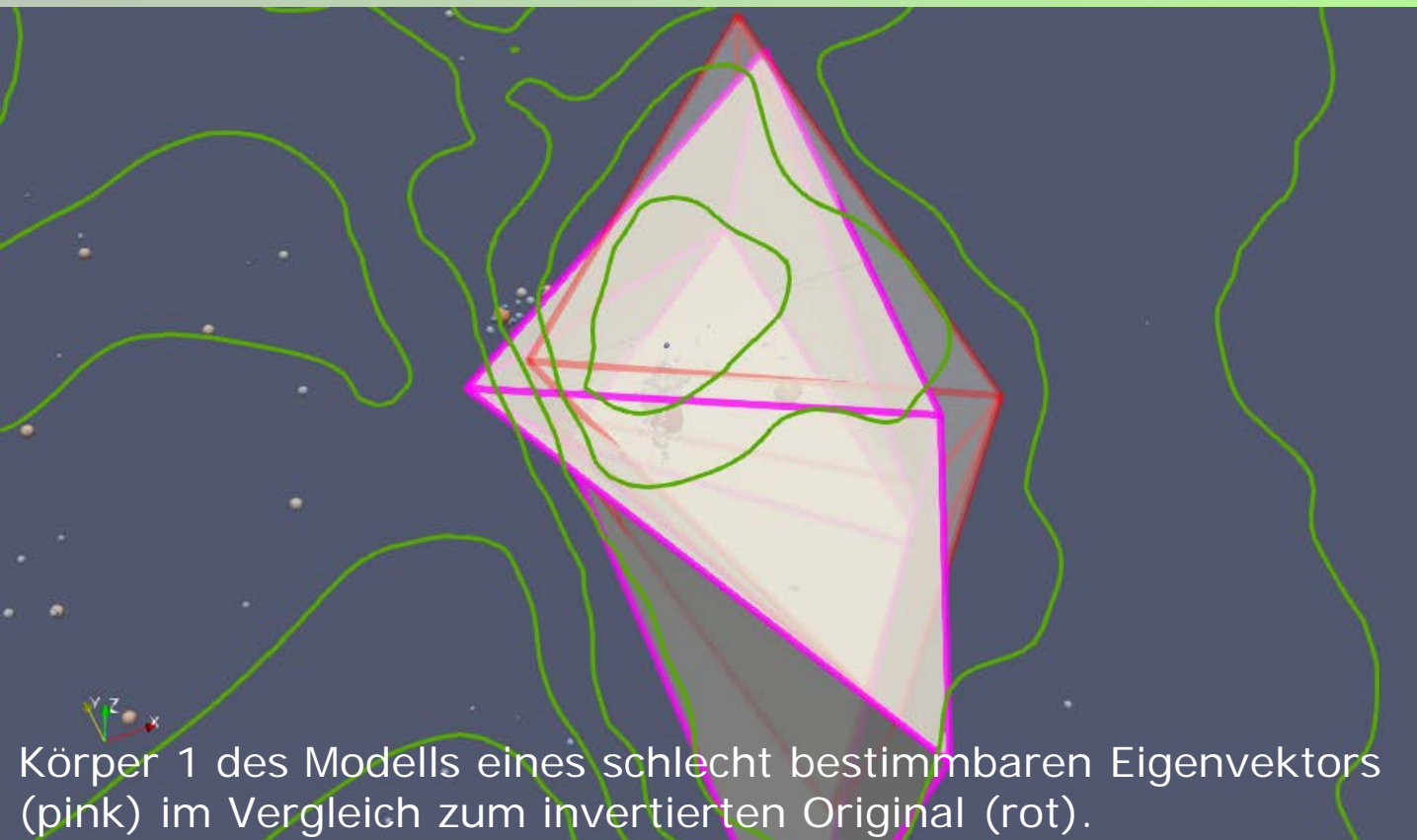
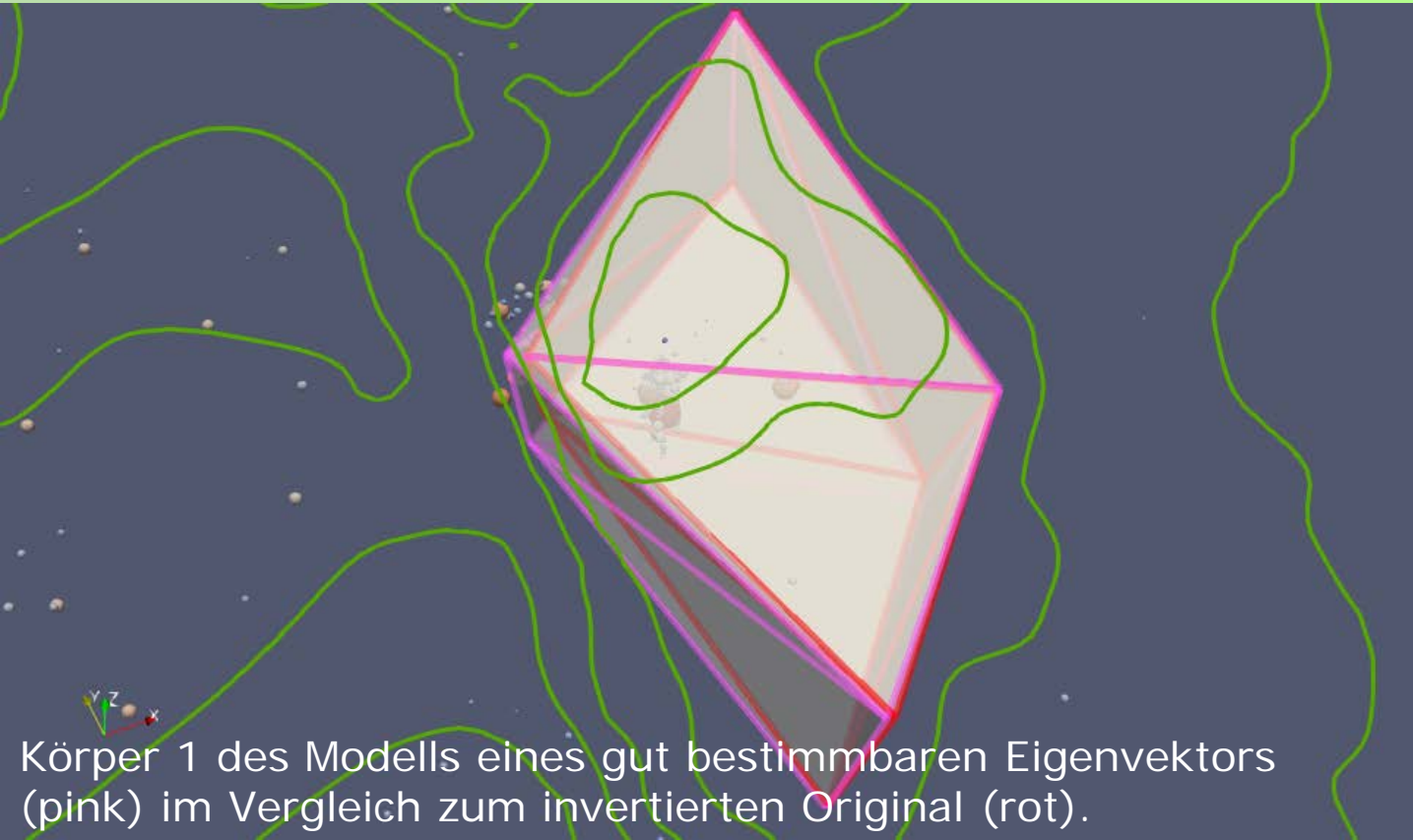
- » Diese Matrix stellt dar, wie gut die Variable selbst (Hauptdiagonale) und die Kombination mit anderen Variablen aufgelöst ist.
- » Insgesamt ist die nördliche Kante der Körper besser aufgelöst als die südliche. Kombinationen aus dem größten und mittleren Körper sind zum Teil aufgelöst, der kleinste Körper ist von untergeordneter Bedeutung.

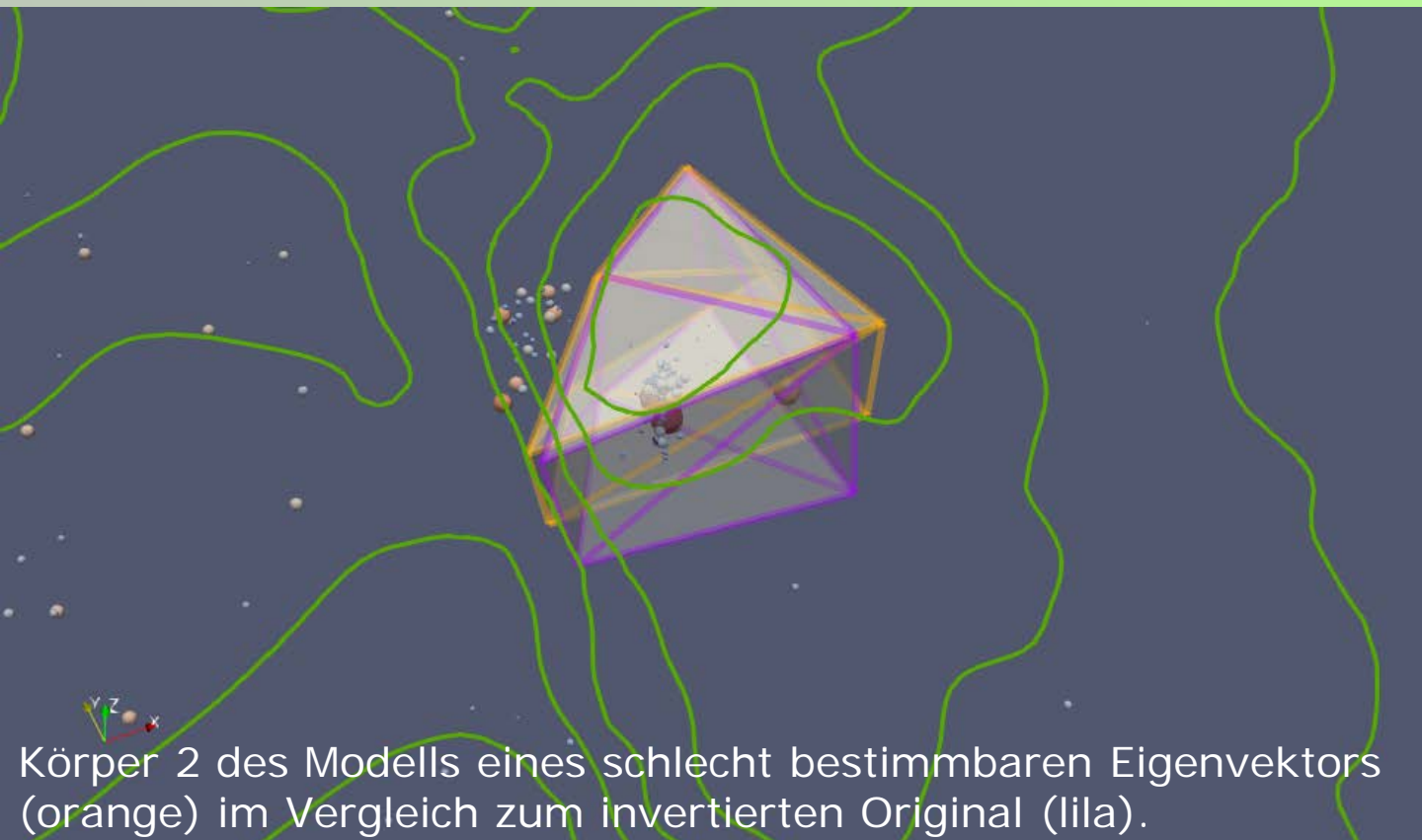
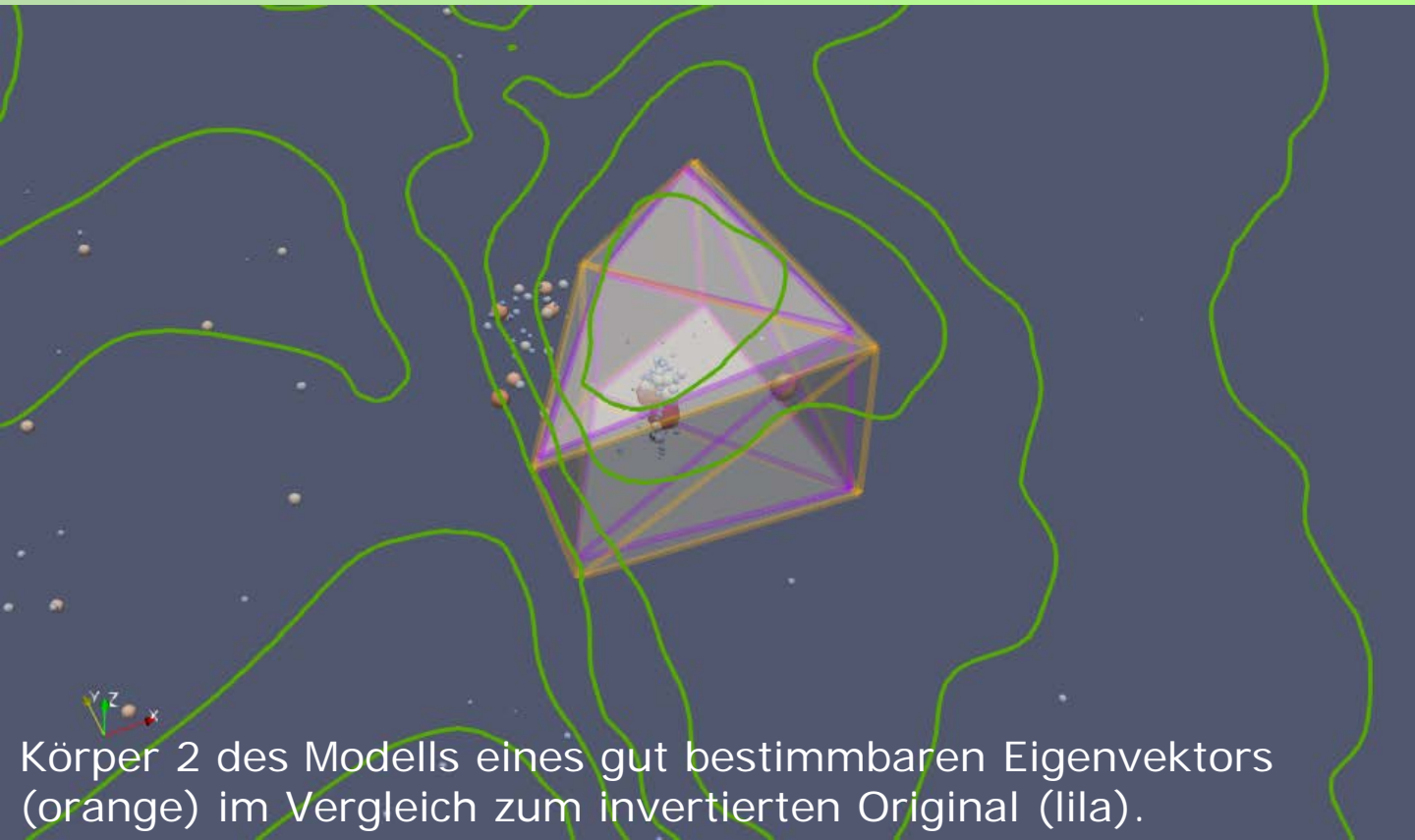


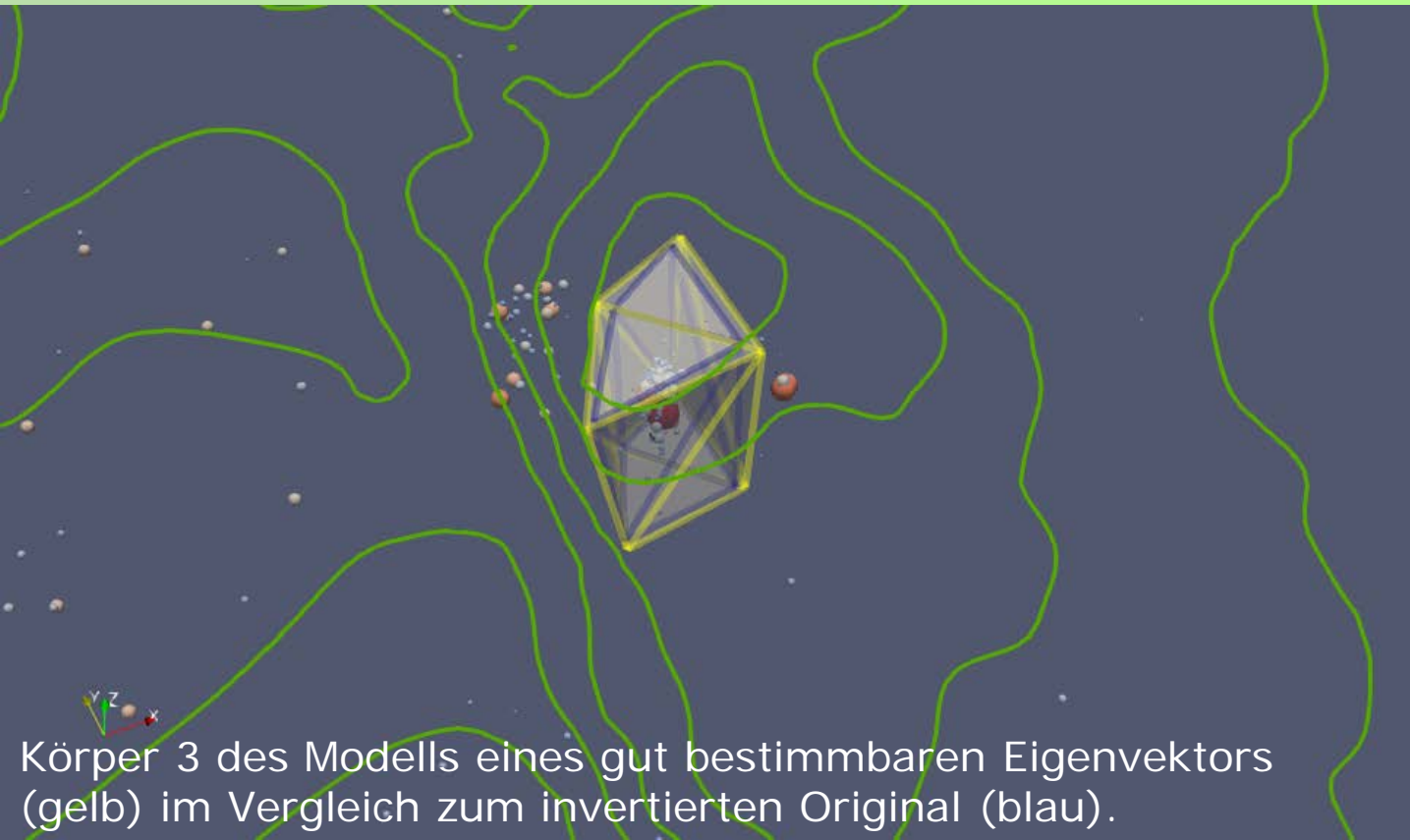
- » **Eigenvektoren der Kovarianz-Matrix (gut bestimmbar → grün, schlecht bestimmbar → orange)**
- » Anhand dieser Darstellung kann das Auflösungsvermögen von zahlreichen Variablenkombinationen beurteilt werden.
- » Die zwei markierten Eigenvektor-Modelle werden auf den folgenden Seiten gezeigt.





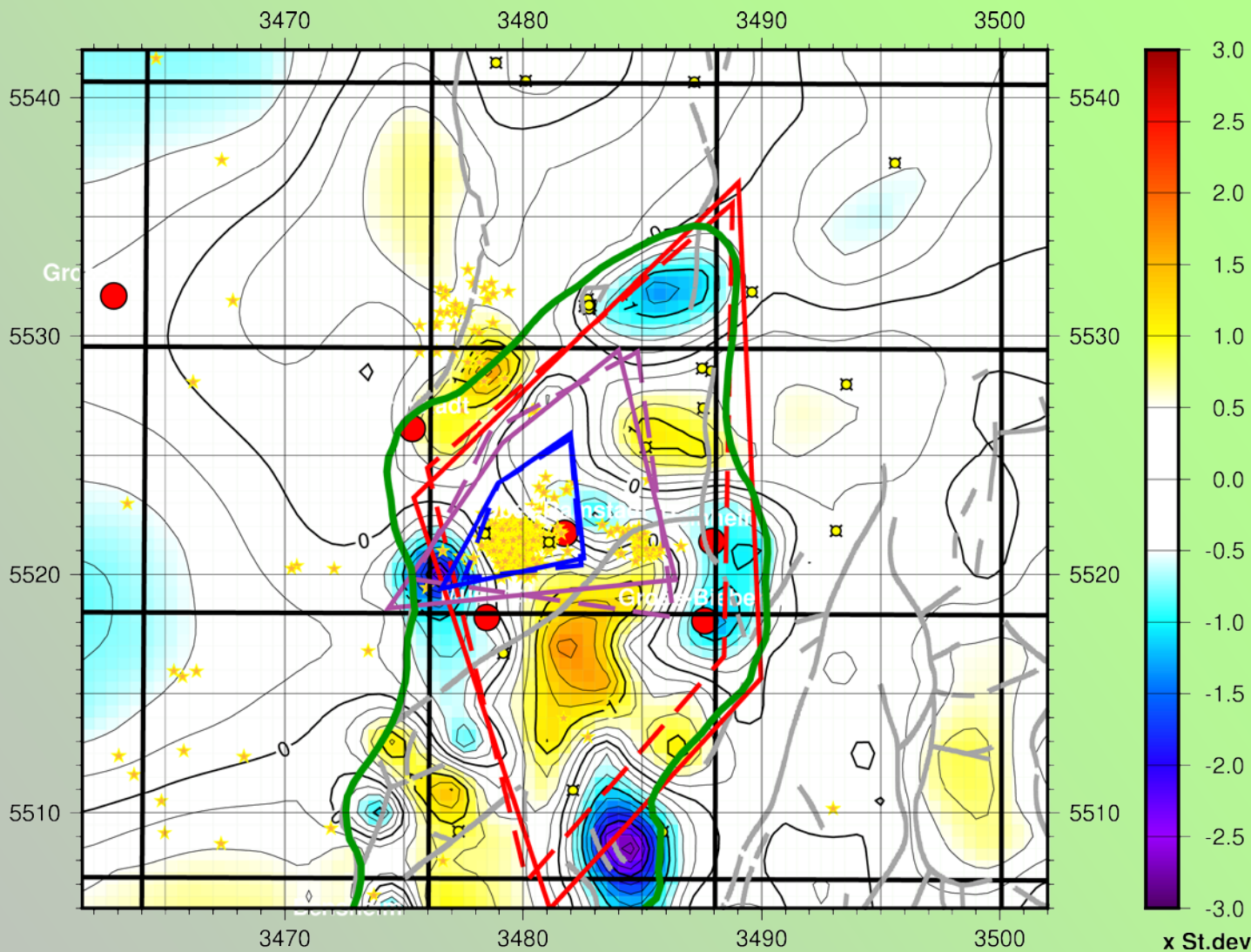




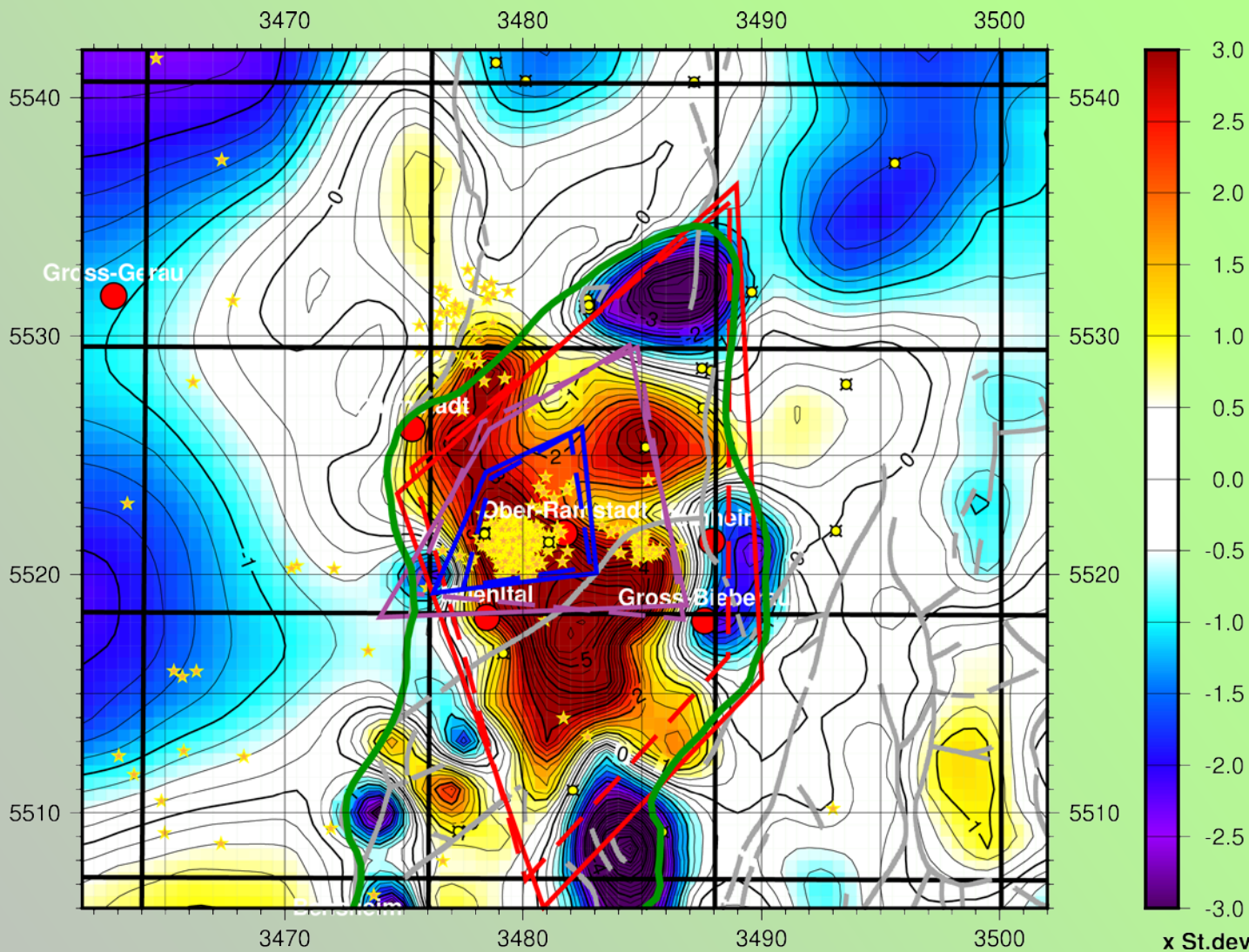




# Drei viereckige Polygonkörper



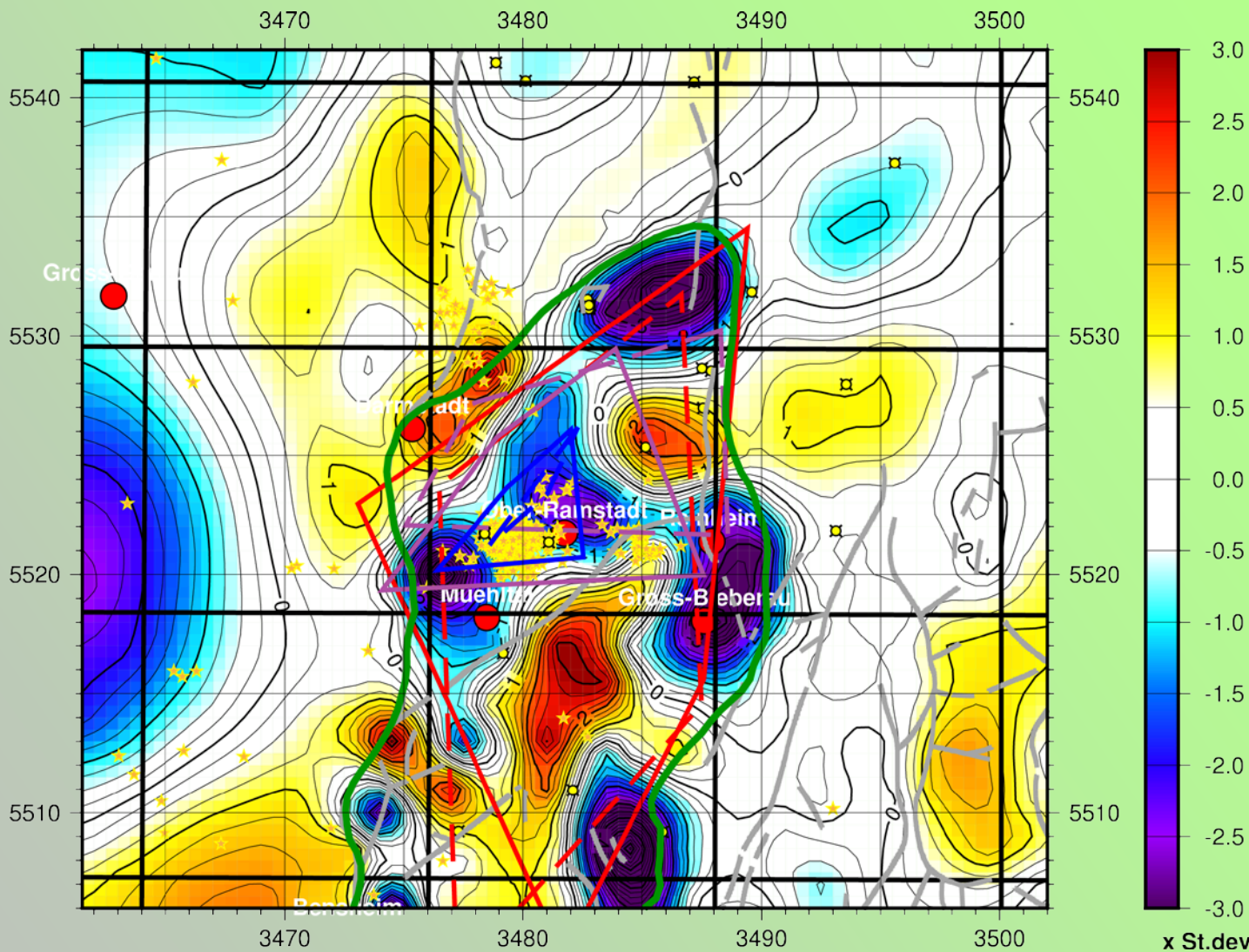
- » Normiertes Residuum von drei invertierten Polygonkörpern (zur Erinnerung)
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 2.05mGal.



## » Normiertes Residuum des gut bestimmbar Eigenvektormodells

- » Der Eigenvektor zeigt stets eine Kombination, die mit relativ wenig (gut bestimmbar) oder viel (schlecht bestimmbar) Modelländerung eine gleich starke Verschlechterung der Anpassung bewirkt (hier ca. 0.5mGal innerhalb des grünen Polygons).
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 2.70mGal.



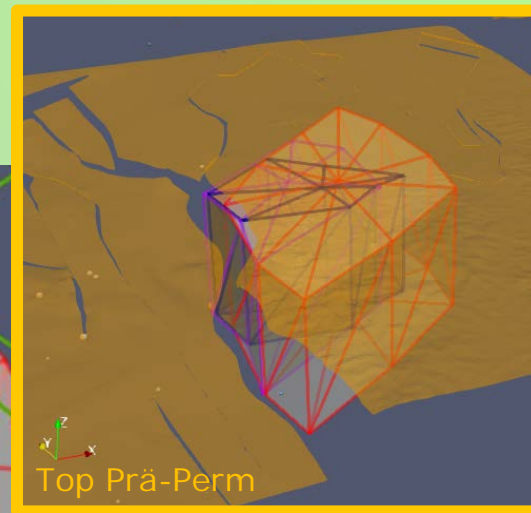


## » Normiertes Residuum des schlecht bestimmbar Eigenvektormodells

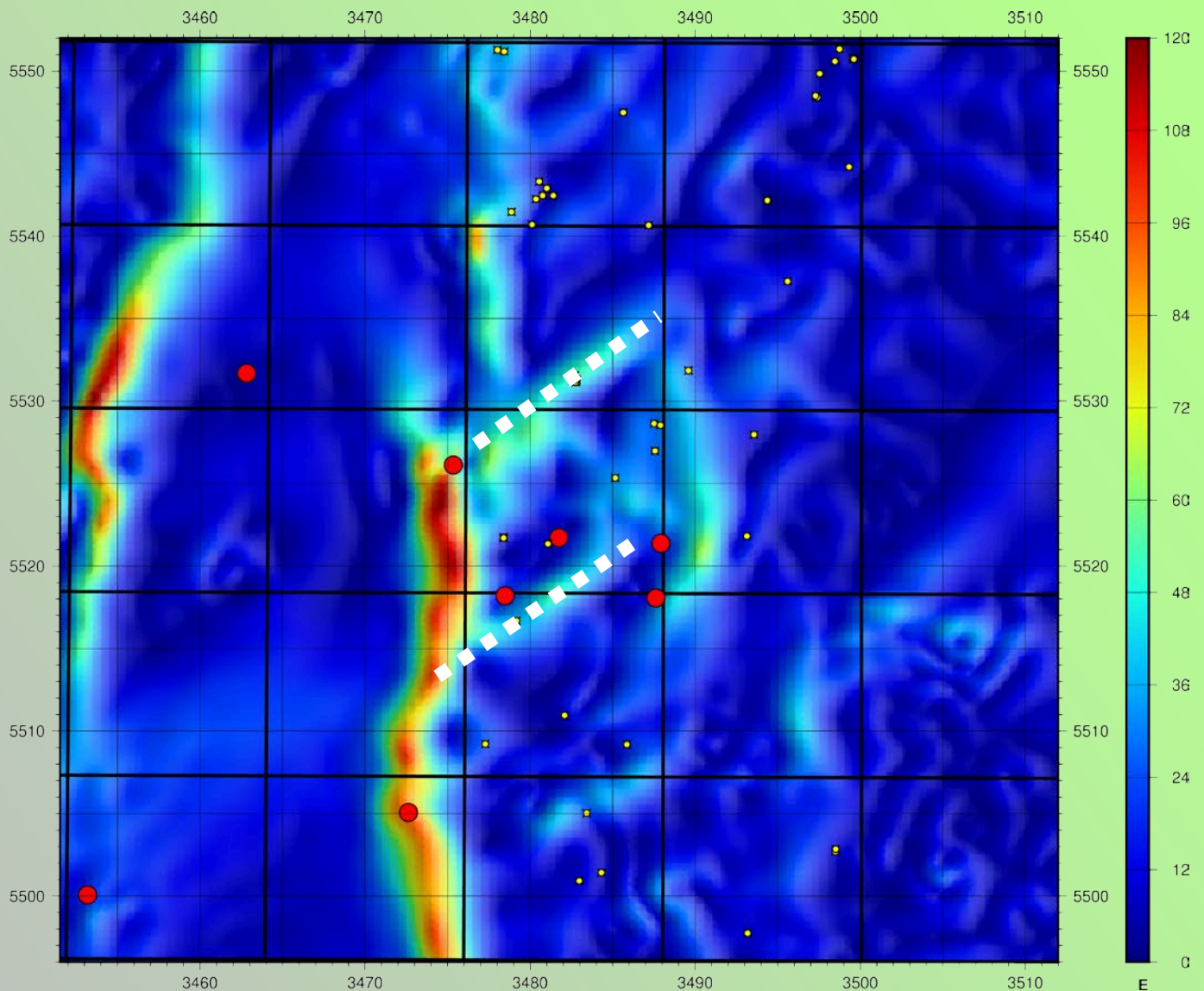
- » Der Eigenvektor zeigt stets eine Kombination, die mit relativ wenig (gut bestimmbar) oder viel (schlecht bestimmbar) Modelländerung eine gleich starke Verschlechterung der Anpassung bewirkt (hier ca. 0.5mGal innerhalb des grünen Polygons).
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 2.27mGal.



- » Dieses Modell fügt dem Basismodell drei Körper hinzu, die je durch zwei mehreckige Polygone aufgespannt werden. Die Startkörper sind in der Abbildung unten auf dieser Seite zu sehen. Zwei von ihnen besitzen je eine Kante, die ein kartiertes Lineament nachzeichnet. Diese Kanten werden in der Inversion festgehalten. Wo sich die Körper überlagern, werden ihre Dichtekontraste von initial je  $70\text{kg/m}^3$  addiert, so dass sich im Startmodell ein maximaler Dichtekontrast von  $210\text{kg/m}^3$  zum umgebenden Material ergibt.
- » Variablen sind neben den Schichtdichten und einem linearen Regionaltrend die Dichten und Lage der Eckpunkte der drei Körper.
- » Gegenüber dem Modell mit den drei viereckigen Polygonkörpern ist dieses Modell komplexer, da die Körper mehr Eckpunkte besitzen. Die Inversion hat somit bessere Möglichkeiten, komplexere Formen nachzubilden. Zwei der Oberkanten liegen auf Lineamenten, die in den Attributkarten erkannt worden sind. Sie werden während der Inversion festgehalten um einen Bezug des Modells zur erwarteten Geologie zu bewahren.

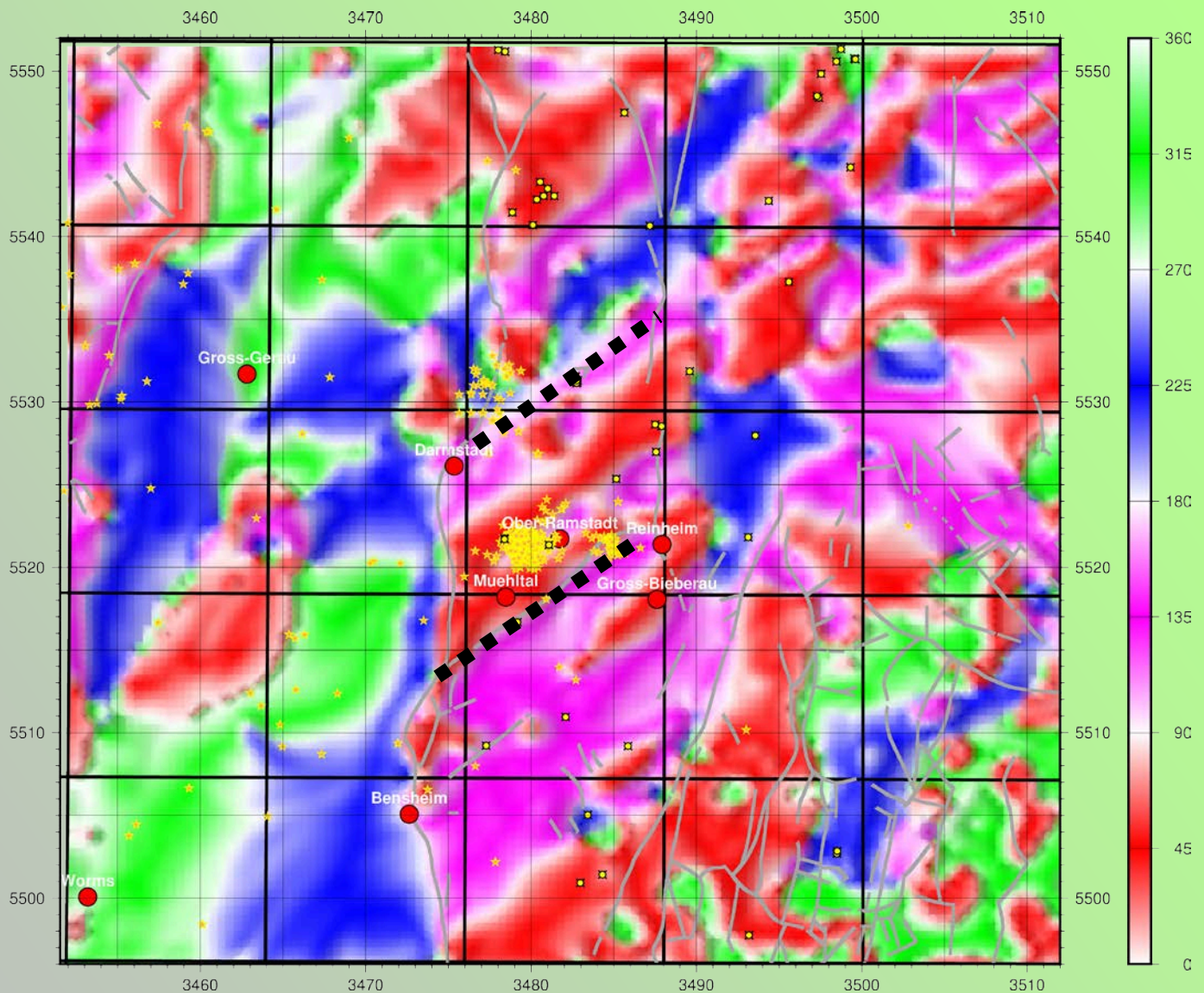


Grüne Isolinien: Bouguerschwere



- » **Horizontalgradientenmagnitude der Bouguerschwere**
- » Die Magnitude der horizontalen Gradienten wird verwendet, um Ränder von Strukturen anhand der Maxima zu verfolgen.
- » Für genügend mächtige Strukturen mit vertikalen Kanten liegen die Hochs in der Karte genau über ihren Rändern.
- » Die weißen gepunkteten Linien zeigen die in diesem Test verwendeten Lineamente

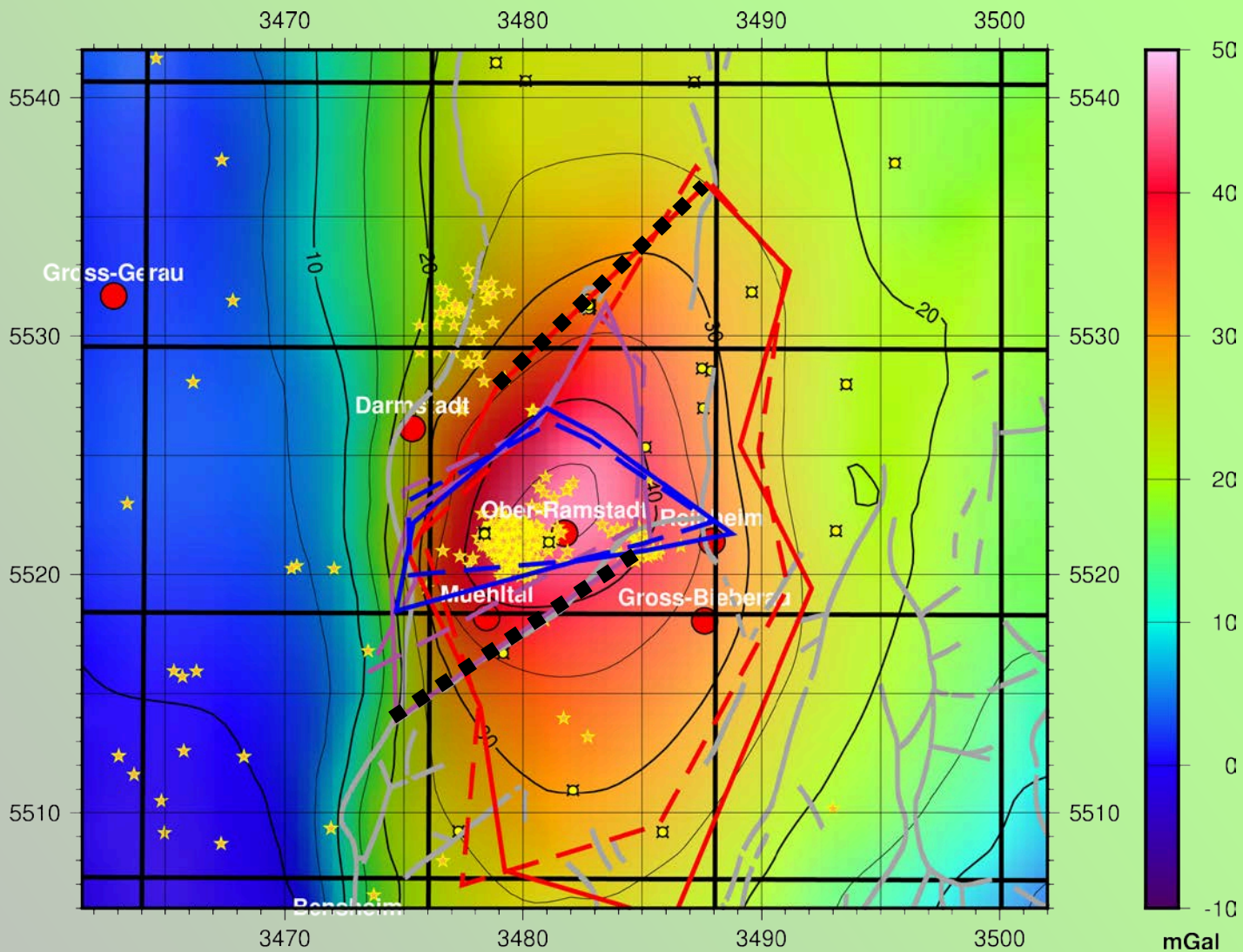




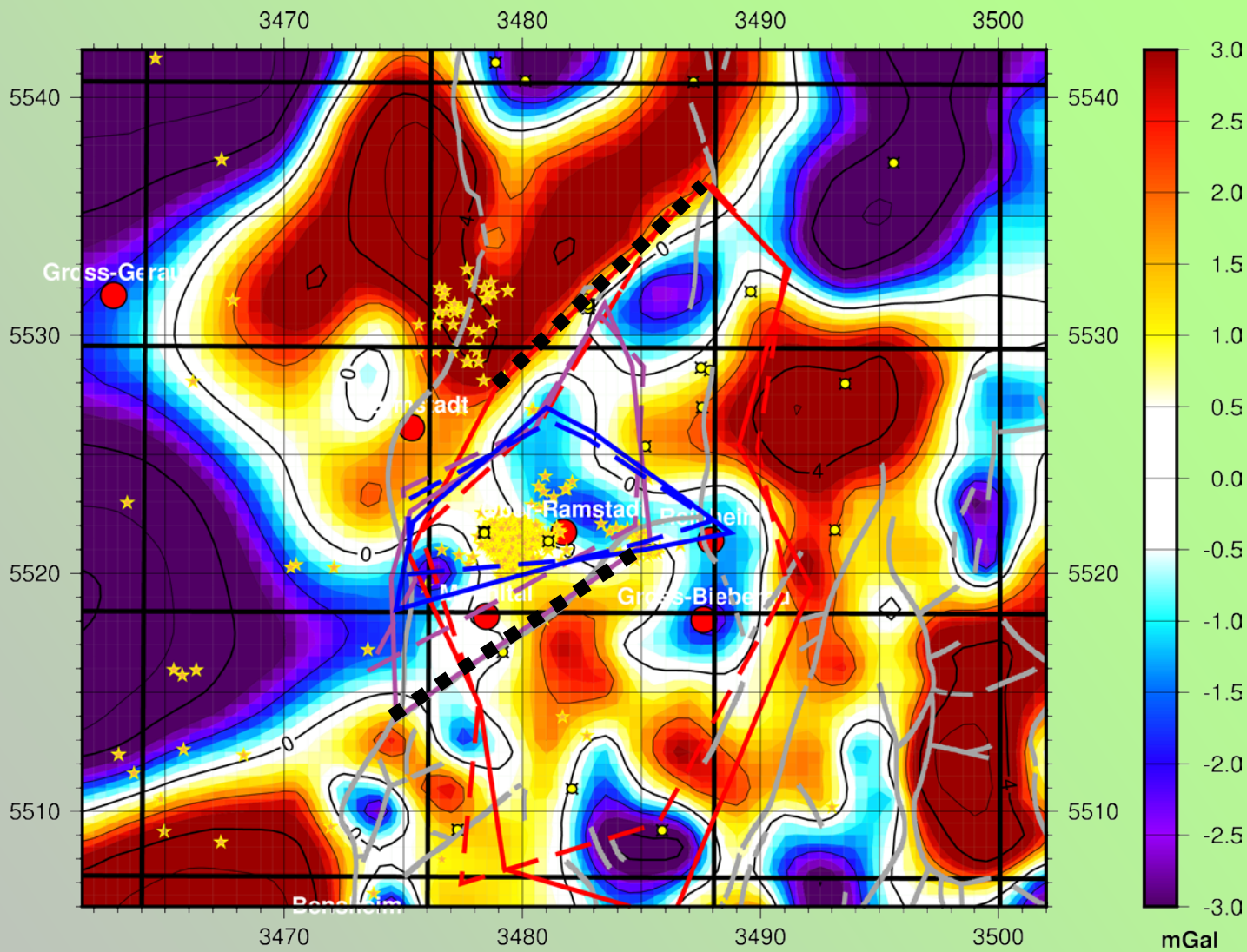
## » Grid-Korrelation der Tilt Derivatives von Bouguerschwere und polreduziertem Magnetfeld

- Rot: beide TDRs positiv
  - Blau: beide TDRs negativ
  - Pink: Schwere positiv, Magnetik neg.
  - Grün: Magnetik positiv, Schwere neg.
- » Die schwarzen gepunkteten Linien zeigen die in diesem Test verwendeten Lineamente





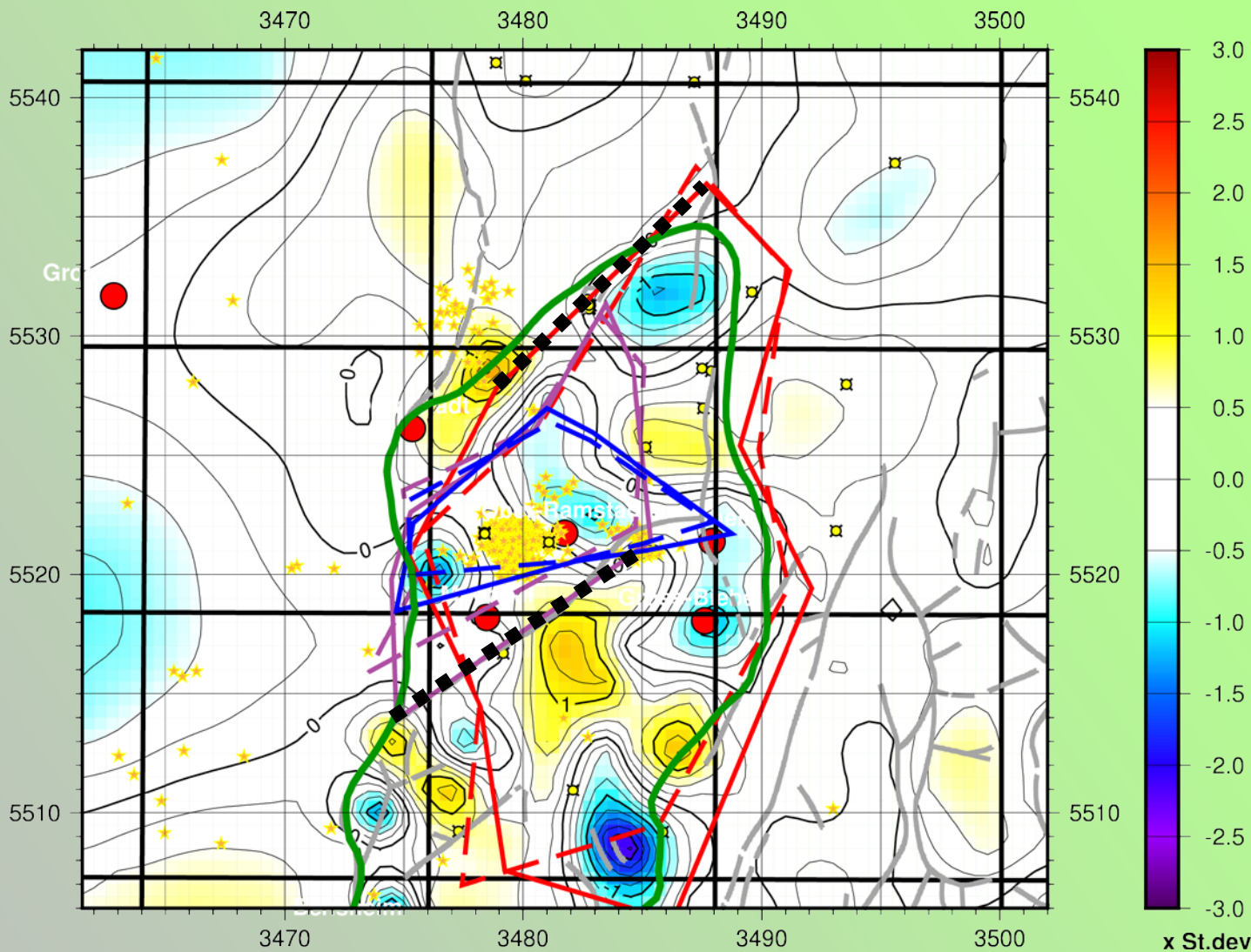
- » **Modellierte Schwere von drei invertierten Polygonkörpern**
- » Die bunten Polylinien zeigen die Kanten der invertierten Körper. Körper 1: rot, Körper 2: lila, Körper 3: blau. Die gestrichelten Linien zeigen jeweils die Körperunterkante.
- » Die schwarz markierten Teile des lila und roten Polygons (beide sind die oberen Polygone eines Körpers) entsprechen beobachteten Lineamenten und wurden für diesen Test festgehalten.



## » Residuum von drei invertierten Polygonkörpern

- » Die schwarz markierten Teile des lila und roten Polygons (beide sind die oberen Polygone eines Körpers) entsprechen beobachteten Lineamenten und wurden für diesen Test festgehalten.
- » Wo sich die Körper durchdringen, wird ihre Dichte addiert. Die so entstandene maximale Dichte ist  $2900\text{kg/m}^3$ .

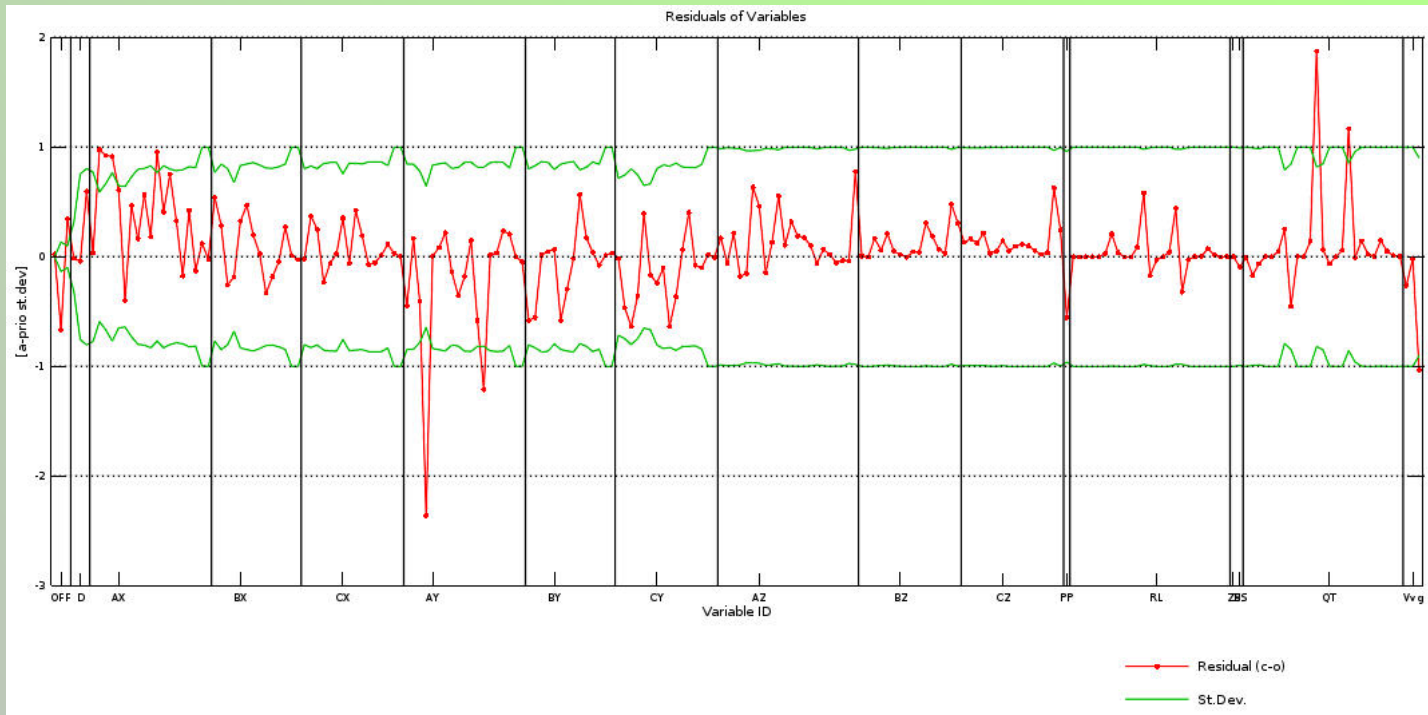




## » Normiertes Residuum von drei invertierten Polygonkörpern

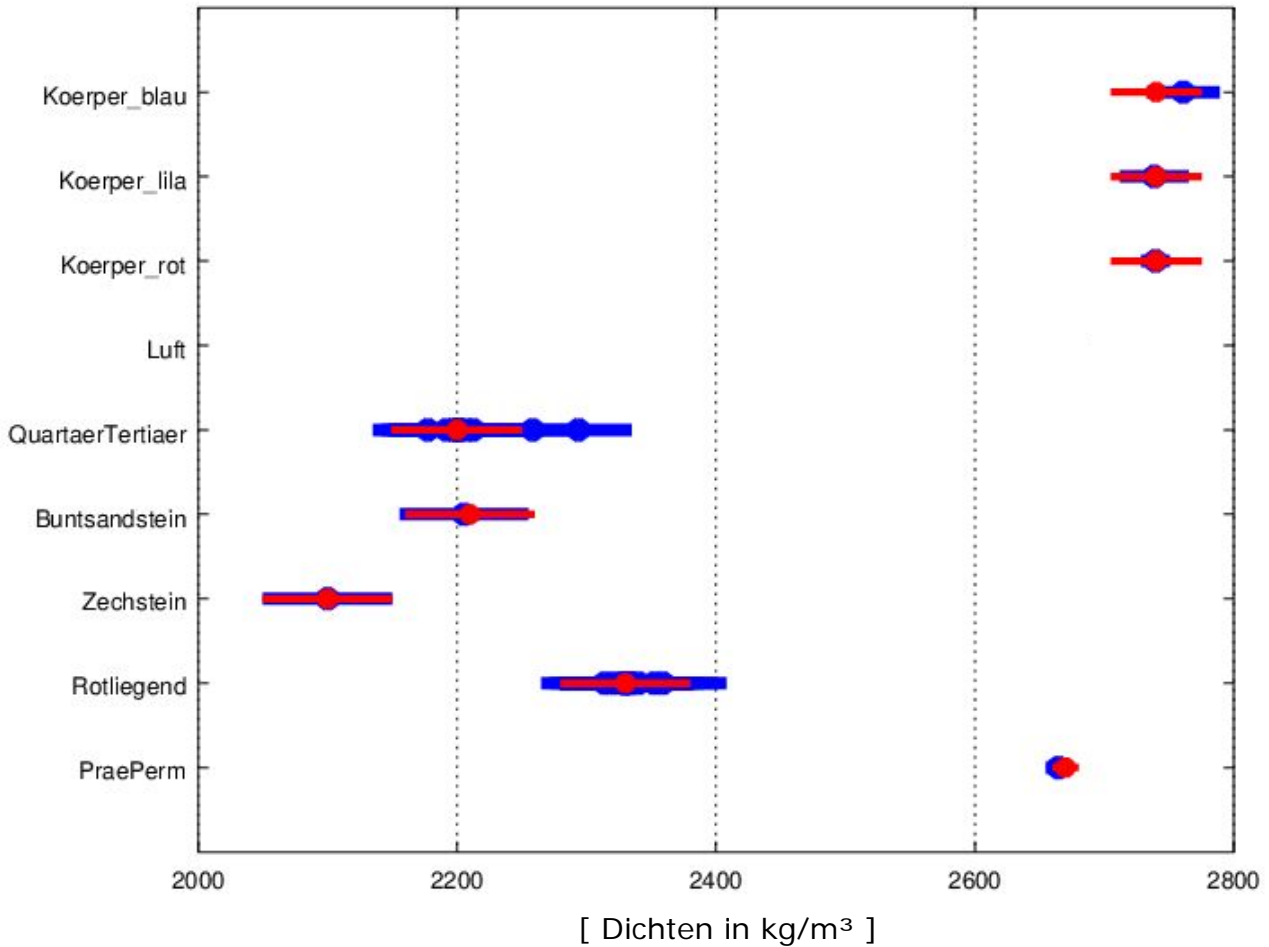
- » Das grüne Polygon zeigt wieder das Interessengebiet, außerhalb dessen die Modellierungsunsicherheit 5x höher gewählt wurde, um den Einfluss des schlecht angepassten Außenraum zu minimieren.
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 1.74mGal.





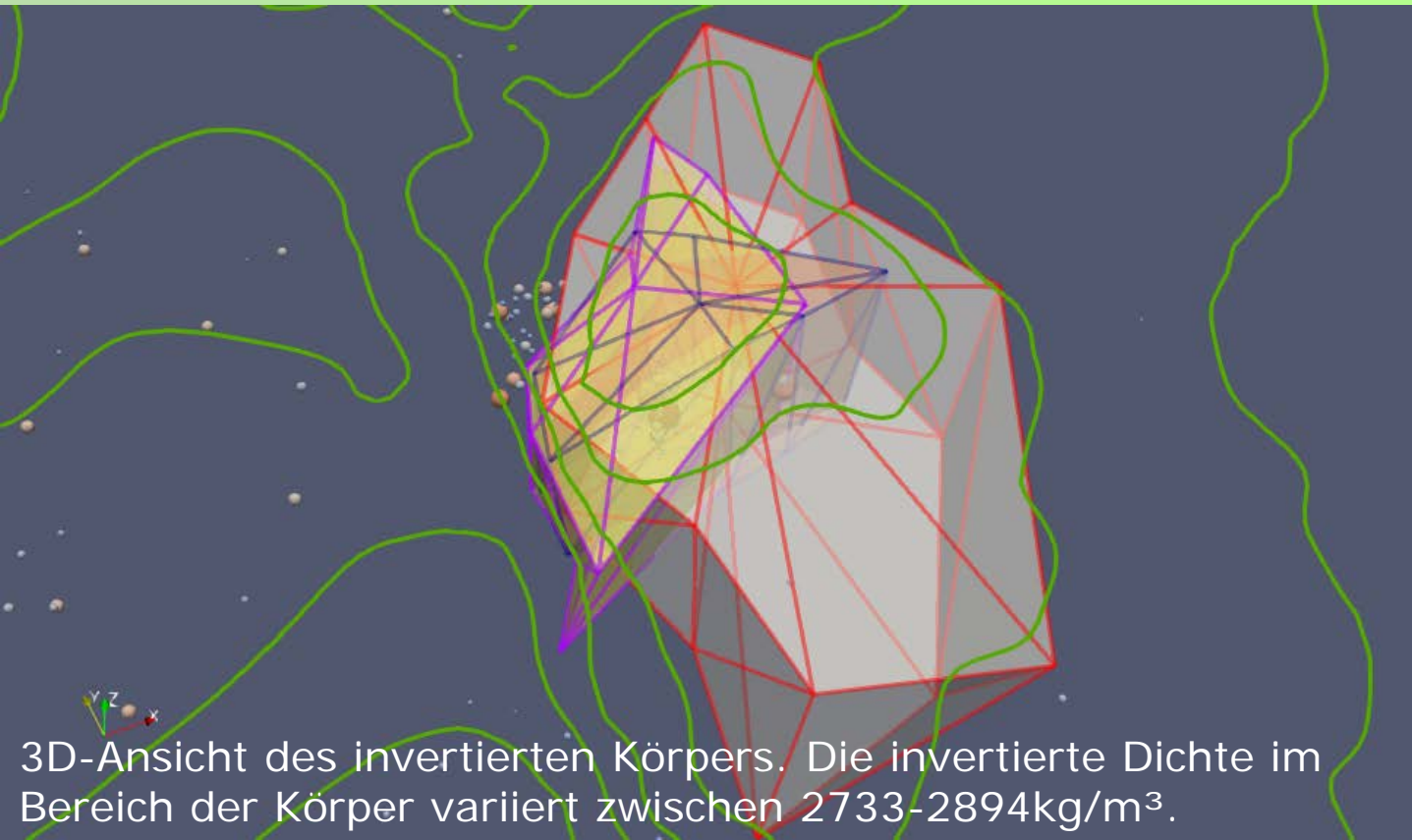
## » Inversionsstatistik des Modells

- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.



## » Modelldichten

- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.
- » Wo sich die Körper überlagern, addiert sich ihre Differenzdichte zu der invertierten Prä-Perm-Dichte von  $2665 \text{ kg/m}^3$ . Die maximale Dichte innerhalb der Körper beträgt deshalb  $2894 \text{ kg/m}^3$ .

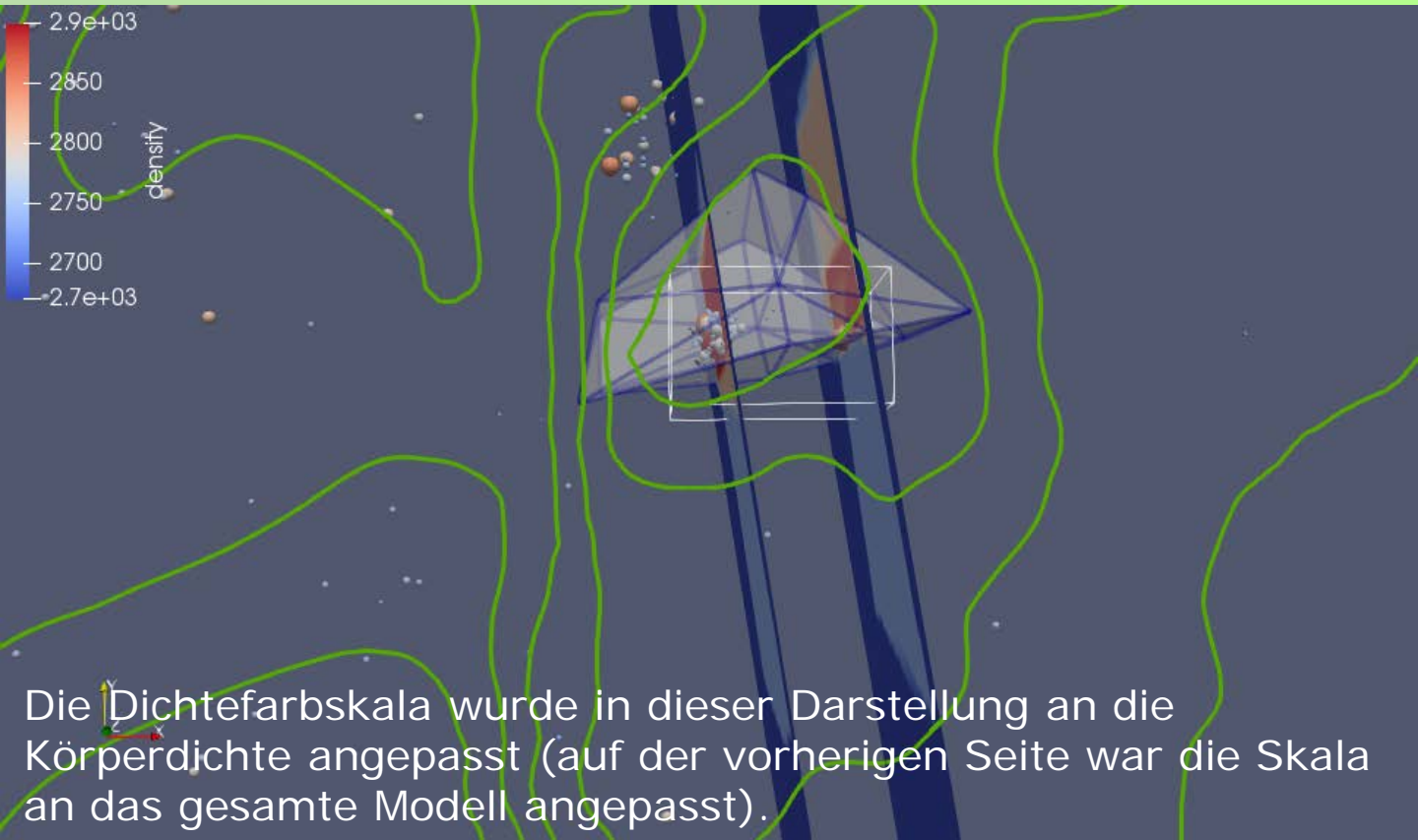


3D-Ansicht des invertierten Körpers. Die invertierte Dichte im Bereich der Körper variiert zwischen 2733-2894kg/m<sup>3</sup>.



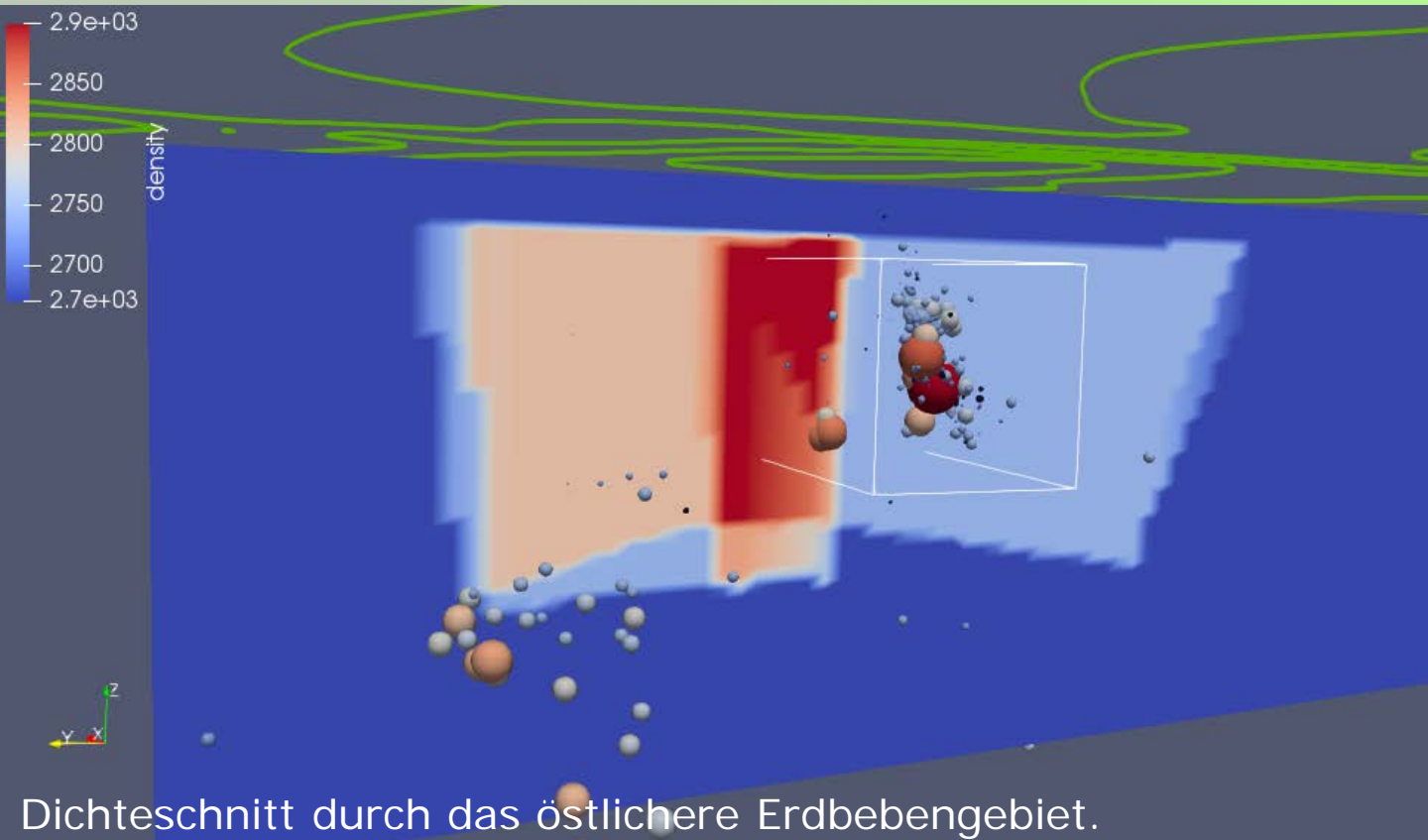
Das Haupt-Erdbebengebiet liegt im dichtesten Bereich. Auch ein Ergebnis mit den Erdbeben am Übergang zum dichtesten Bereich ließe sich mit gleich guter Anpassung produzieren.





Die Dichtefarbskala wurde in dieser Darstellung an die Körperdichte angepasst (auf der vorherigen Seite war die Skala an das gesamte Modell angepasst).

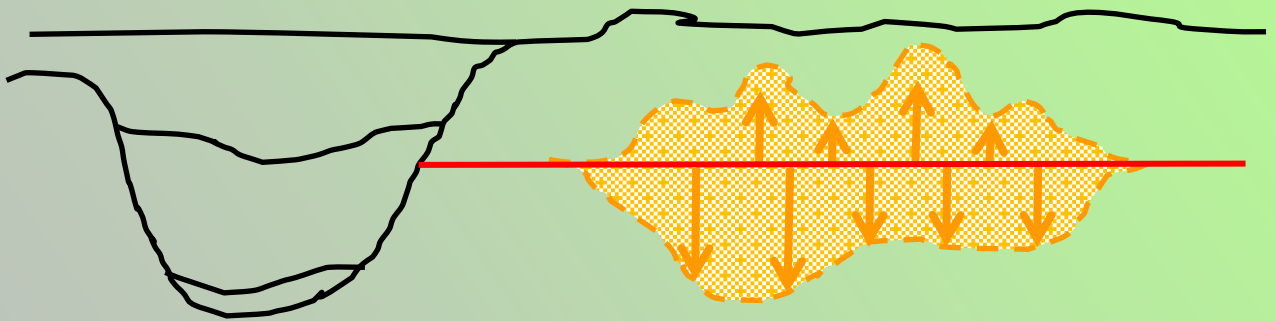
- » **3D-Ansicht von oben**
- » 3D-Ansicht des innersten invertierten Körpers zusammen mit zwei Dichteschnitten durch die Erdbebengebiete (siehe auch nächste Seite).
- » Die weiße Box zeigt den Bereich zwischen
  - x: 3478km / 3486km
  - y: 5518.5km / 5523.5km
  - z: -6.5km / -1.5km



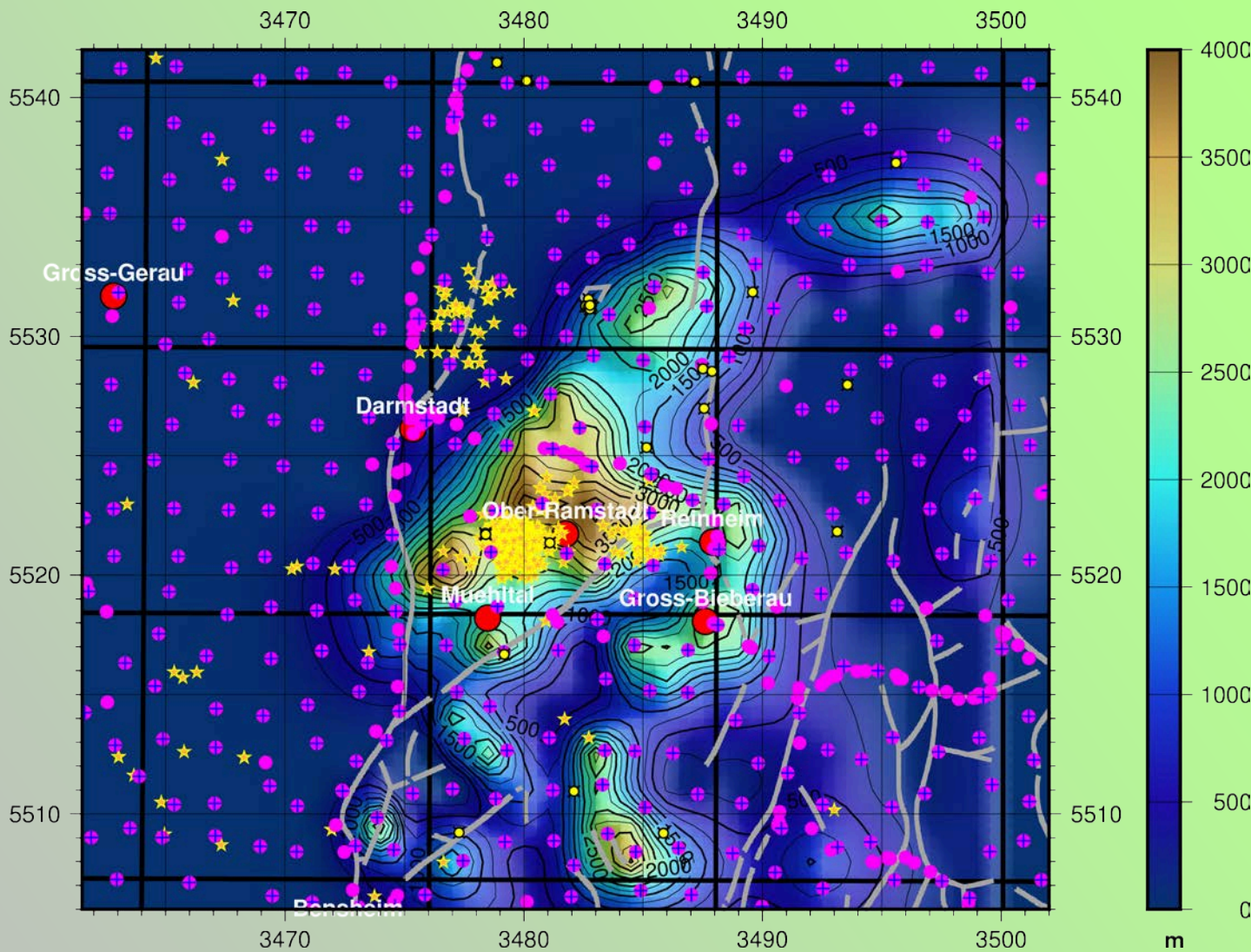
- » Aus dem Modell mit den drei Lineament-basierten Polygonkörpern kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Die nördliche Kante erhält auch hier einen stärkeren Dichtekontrast als die südliche.
  - » Die Erdbeben liegen am Rand des Bereichs mit der höchsten Dichte.
  - » Im Vergleich zu der erwarteten Genauigkeit sind die horizontalen Positionen der Eckpunkte besser bestimmt als die Tiefenlage.
  - » Den Dichten der Körper wurde bei dieser Inversion mehr Freiheit gegeben. Jetzt wird ersichtlich, dass die Inversion die Dichten ausreichend auflösen kann aber die Vorgaben auch bereits ganz gut zu passen scheinen. Nur der kleinste Körper erhält von der Inversion eine leicht abweichende, höhere Dichte.



- » In diesem Modell gibt es neben dem Schichtmodell einen Körper, dessen Geometrie sich aus einer sehr flachen Linse in 2km Tiefe aufspannt. Dafür werden an der Ober- und Unterkante Ankerpunkte platziert, die diese Flächen während der Inversion mit sich ziehen.
- » Invertierbar sind in diesem Modell neben den Schichtdichten des Basismodells und dem Regionaltrend die Lage der oben beschriebenen Ankerpunkte und die Dichte des so aufgespannten Körpers.
- » Es ist zu erwarten, dass die invertierbare Linse direkt die beobachtete Schwere widerspiegelt, da das Basismodell in diesem Bereich keinen Beitrag liefert. Dennoch kann die invertierte Geometrie eine gute Interpretationshilfe sein, da sie mit einfachen Mitteln sehr direkt anzeigt, an welchen Stellen eine Massenkonzentration erforderlich ist.



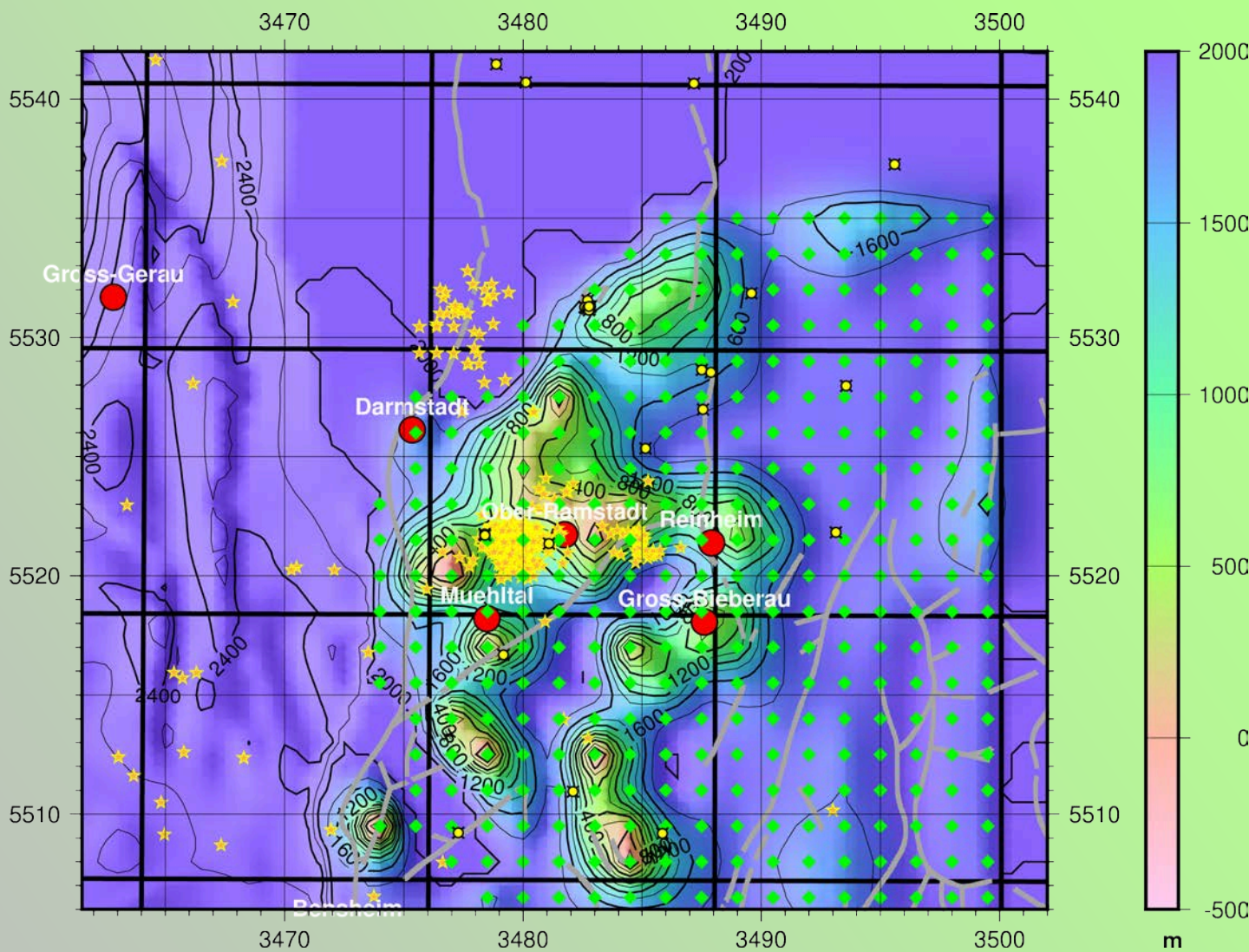
Skizze eines Profils durch das Modell. Die schwarzen Linien repräsentieren die Schichten des Basismodells, während die rote Linie die Startgeometrie der Linse darstellt: sie ist sehr flach und erscheint daher als Fläche in 2km Tiefe. Während der Inversion werden ihre Ober- und Unterkante verformt, so dass ein Volumen mit erhöhter Dichte entsteht. Dies ist in der Skizze als orange gemusterter Körper zu erkennen. Die Pfeile zeigen die Bewegung der Flächen an.



## » Mächtigkeit der invertierbaren Linse

- » Die magentafarbenen Punkte sind die Schweremesspunkte. Blaue Kreuze zeigen an, welche in der Inversion verwendet worden sind. Eine Ausdünnung ist sinnvoll, weil andernfalls die wenigen Bereiche mit hoher Messpunktdichte zu viel Gewicht auf diese Regionen legen würden.



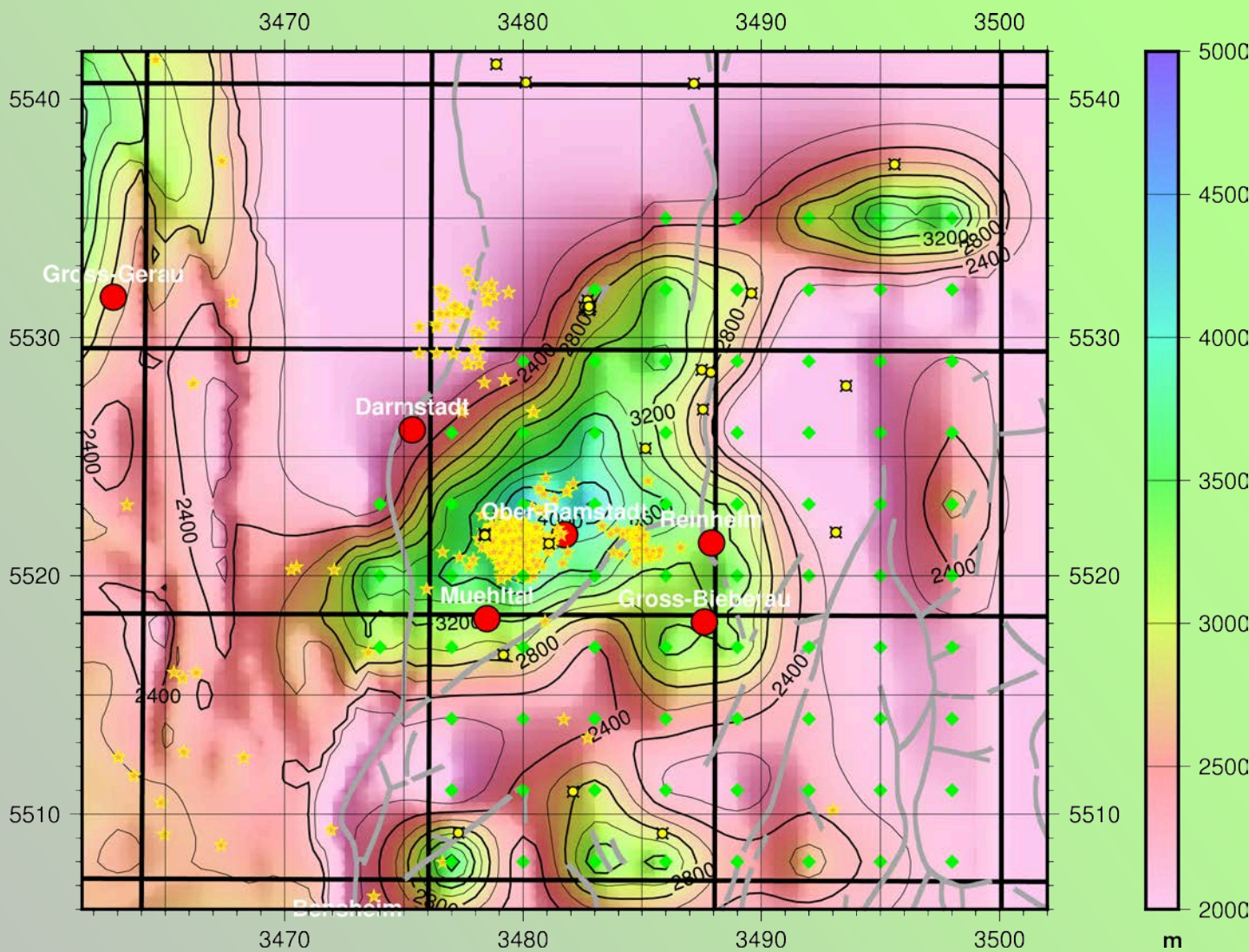


## » Oberkante der invertierbaren Linse

» Die grünen Rauten zeigen die Lokationen der Ankerpunkte zur Verschiebung der Linsen-Oberkante.

» Anmerkung zur Farbskala: In diesem Bild befinden sich größere Werte in größerer Tiefe (z-Achse zeigt nach unten).

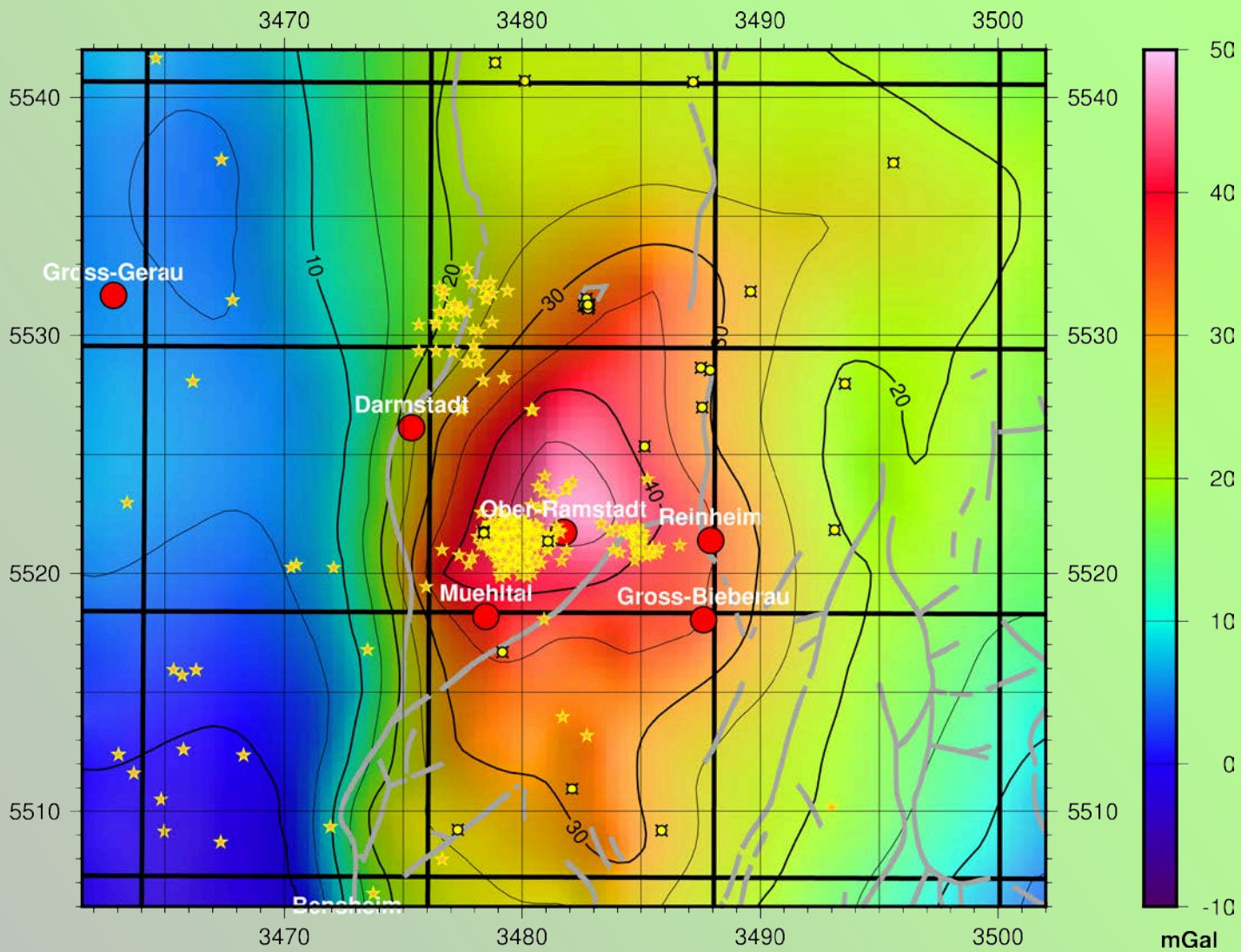




## » Unterkante der invertierbaren Linse

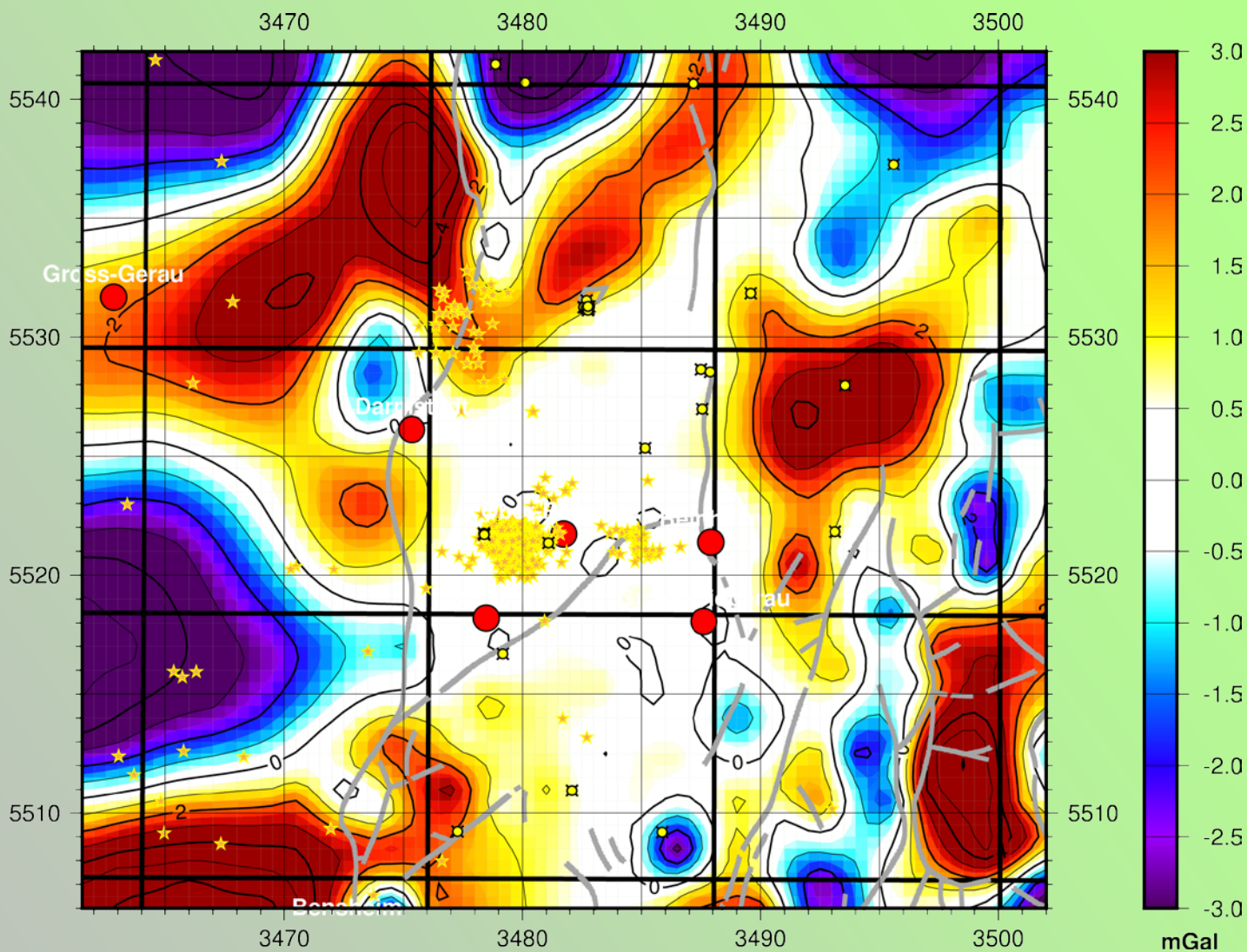
- » Die grünen Rauten zeigen die Lokationen der Ankerpunkte zur Verschiebung der Linsen-Unterkante. Für die Basis sind sie in größerem Abstand zueinander definiert, um die Anzahl der Variablen zu reduzieren und eine glattere Lösung zu fördern.
- » Anmerkung zur Farbskala: In diesem Bild befinden sich größere Werte in größerer Tiefe (z-Achse zeigt nach unten).

# Invertierbare Linse



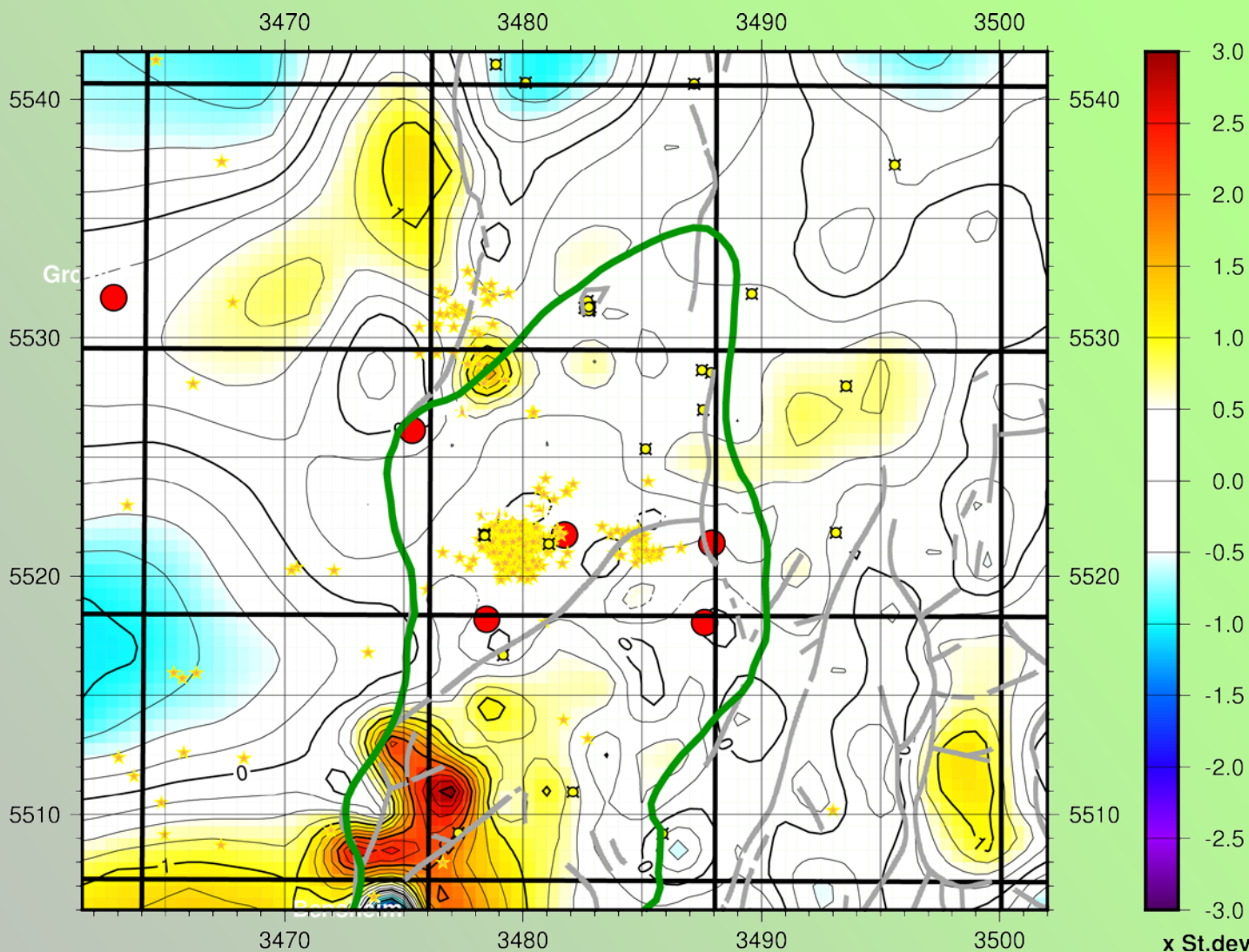
» Berechnete Schwere des Modells mit invertierbarer Linse





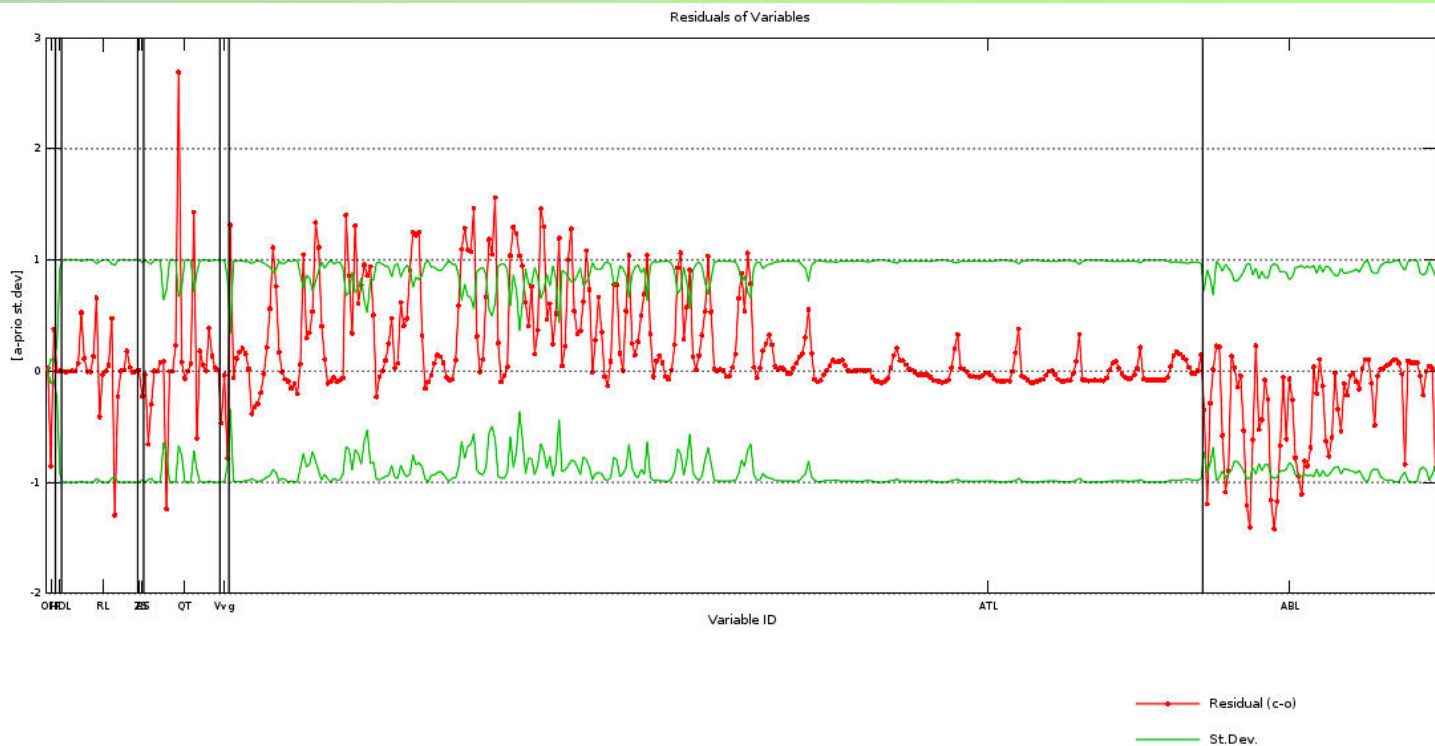
- » **Schwereresiduum des Modells mit invertierbarer Linse**
- » Durch die invertierbare Ober- und Unterkante hat die Inversion gute Möglichkeiten, das Modell direkt an die Schwere anzupassen. Da im Interessengebiet nahezu nur dieser Körper vorhanden ist, spiegelt er direkt die Beobachtungsschwere wieder.





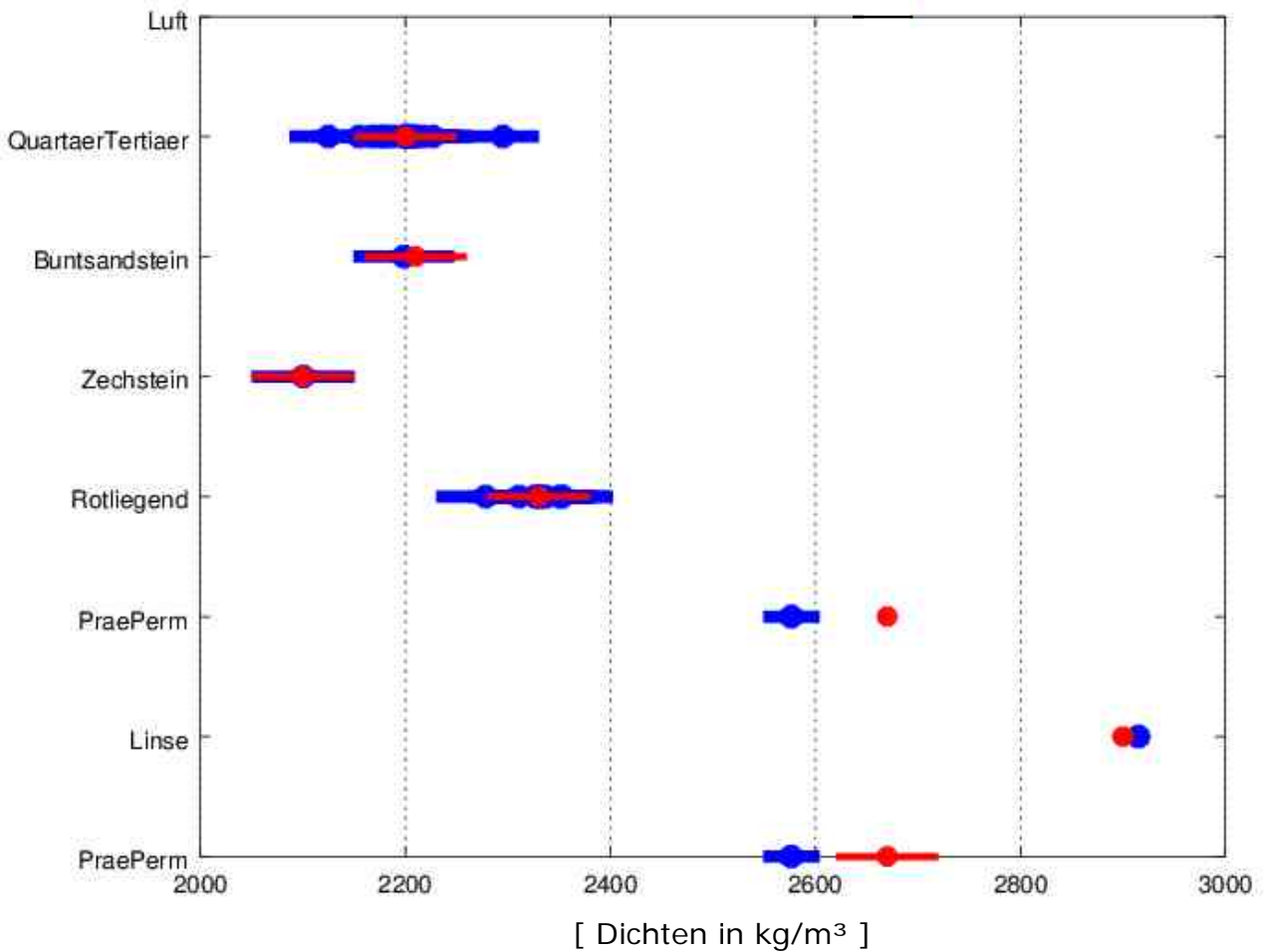
## » Normiertes Schwereresiduum des Modells mit invertierbarer Linse

- » Da von guten Anpassungsmöglichkeiten im Interessengebiet (grünes Polygon) ausgegangen wurde, beträgt die Modellierungsunsicherheit in diesem Bereich 1mGal und außerhalb 5mGal. Somit ist der innere Bereich gleich der vorherigen Seite (hier ist der Isolinienabstand 0.25 statt 1).
- » Im grünen Polygon beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 0.77mGal.



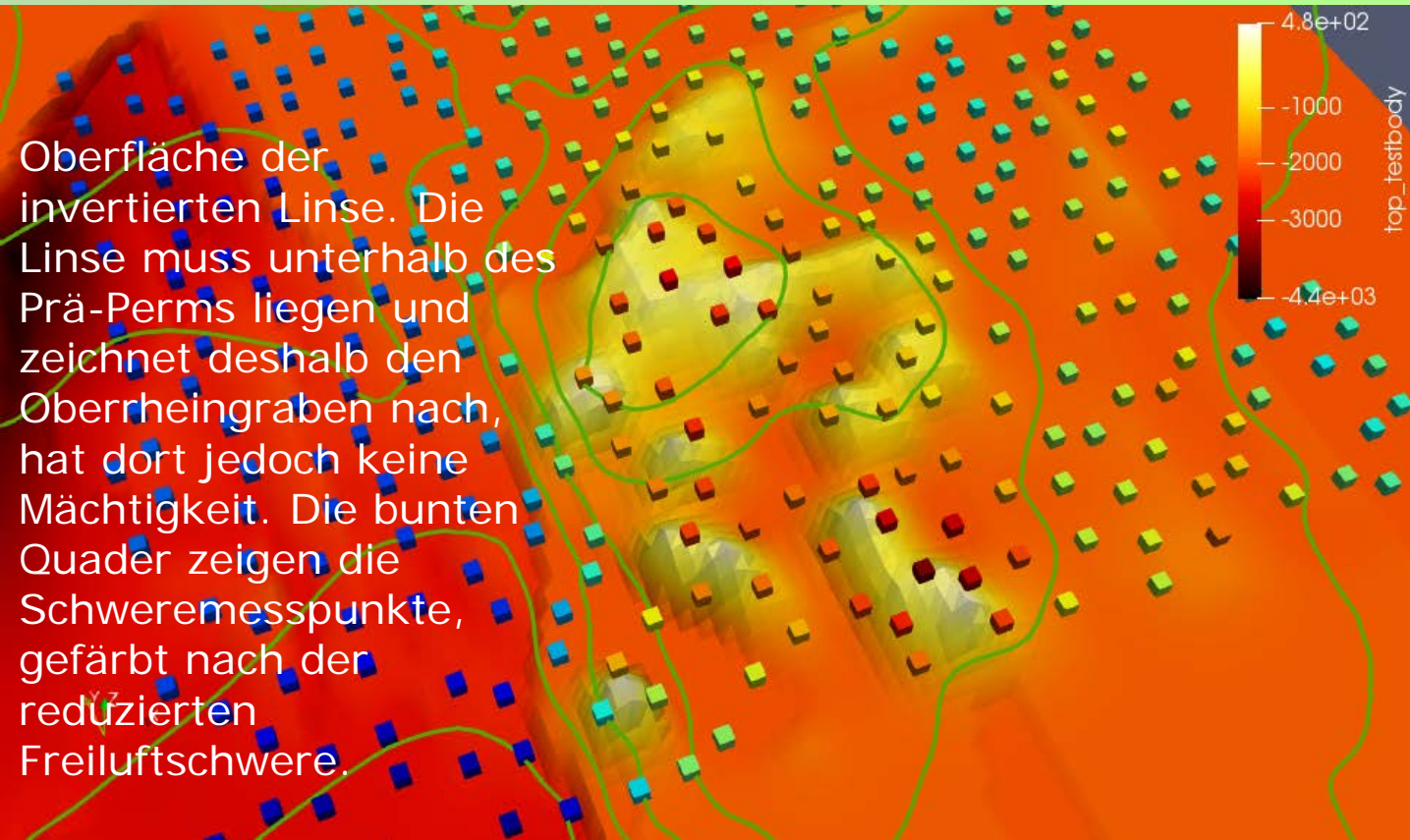
## » Inversionsstatistik des Modells

- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.



- » Startwerte (rot) und invertierte Werte (blau) für die Dichten des Modells. Wo die Dichte in der Tiefe veränderlich ist, ist die Dichte der mittleren Tiefe angegeben.
- » Während die Dichten der meisten Schichten nicht stark verändert wurden, fällt auf, dass die Prä-Perm Dichte erniedrigt und die der Linse erhöht wurde, um einen größeren Dichtekontrast zu erreichen.

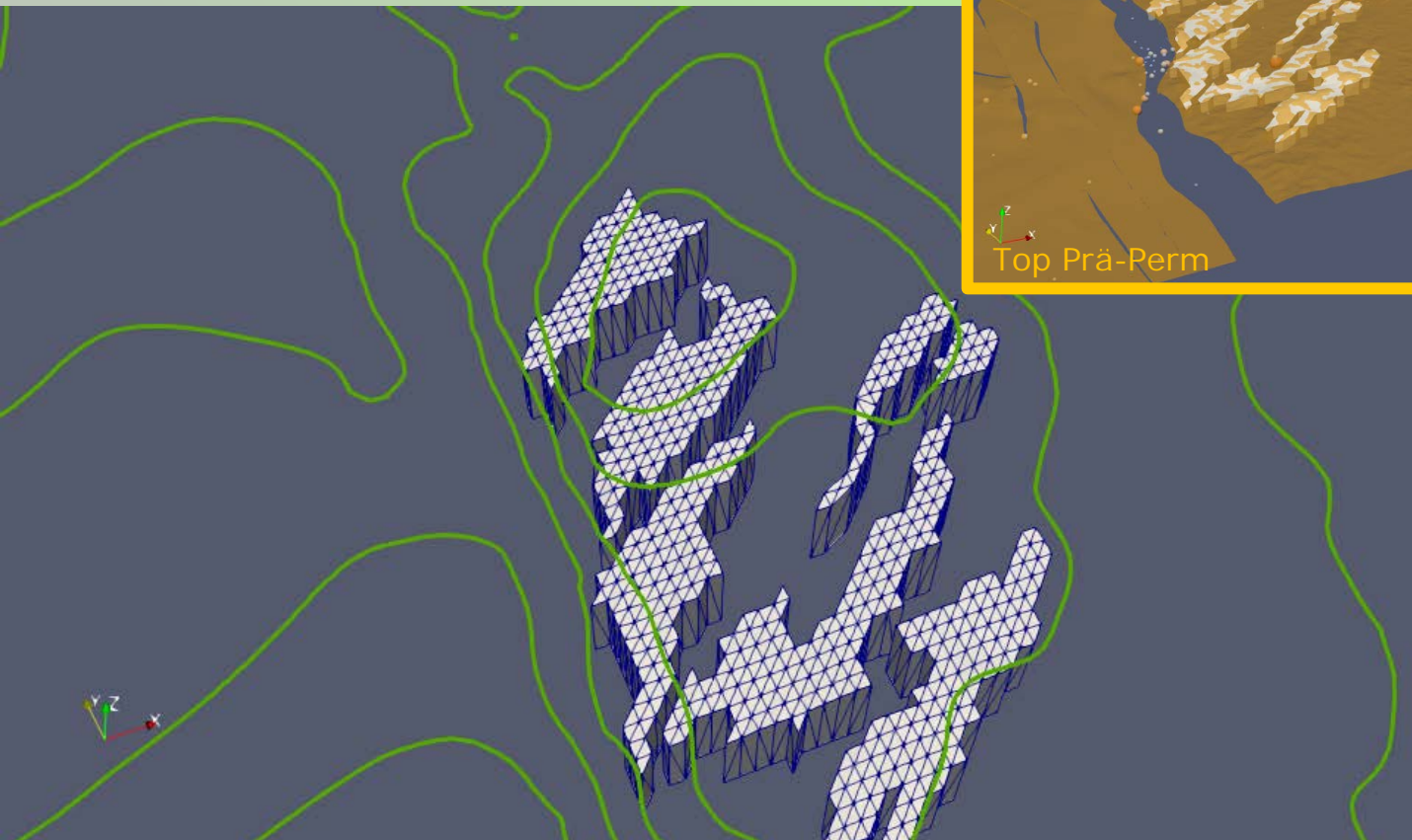
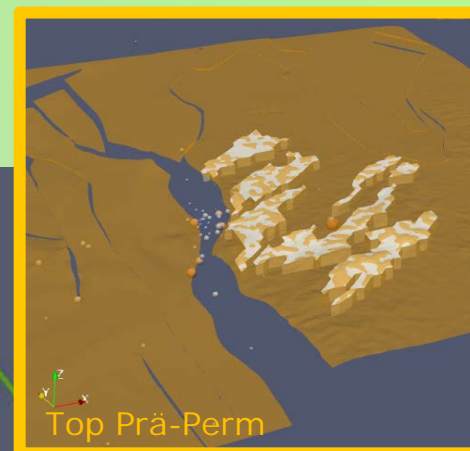




- » Aus dem Modell mit der invertierbaren Linse kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Mit einem hohen Dichtekontrast von über  $300\text{kg/m}^3$  zum Prä-Perm wird die Linse bis zu 4 Kilometer mächtig.
  - » Die Erdbeben liegen am Rand des mächtigsten Bereichs.
  - » Anhand der Mächtigkeitsverteilung kann direkt abgelesen werden, wo im Basismodell wieviel Masse fehlt. Dabei ist natürlich zu beachten, dass bei geringerem Dichtekontrast höhere Mächtigkeiten erforderlich wären. Die berechneten 4km sind somit als minimale Mächtigkeit zu betrachten.
  - » Zusätzlich durchgeführte Modelltests haben jedoch ergeben, dass der zentrale Bereich zwischen den Erdbeben mit geringerer Dichte und größerer Mächtigkeit das Schwerfeld zwar ausreichend, aber nicht ganz so gut wie die dargestellte Variante reproduziert.



- » In diesem Modell gibt es neben dem Schichtmodell aus der Oberflächengeologie digitalisierte Körper, die an der Oberfläche beginnen und senkrechte Kanten zu einer söhligen Basis besitzen. Dies wurde aufgrund von gefundenen Literaturangaben für einen Test als gerechtfertigt angesehen.
- » Zwischen und neben diesen Körpern befindet sich eine Schicht erhöhter Dichte mit variabler Tiefenlage (siehe Skizze auf der nächsten Seite). Diese dient dazu, eine erhöhte Dichte zwischen und neben den bekannten Körpern erzeugen zu können. Warum dies notwendig ist, wird auf Seiten 78 und 79 verdeutlicht.
- » Die Vorgabedichten der Oberflächenkörper richten sich nach den vorhandenen Informationen.
- » Neben den Dichten der Schichten und Körper wird die vertikale Lage der Körperunterkanten sowie die Basis der Schicht zwischen den Körpern invertiert.



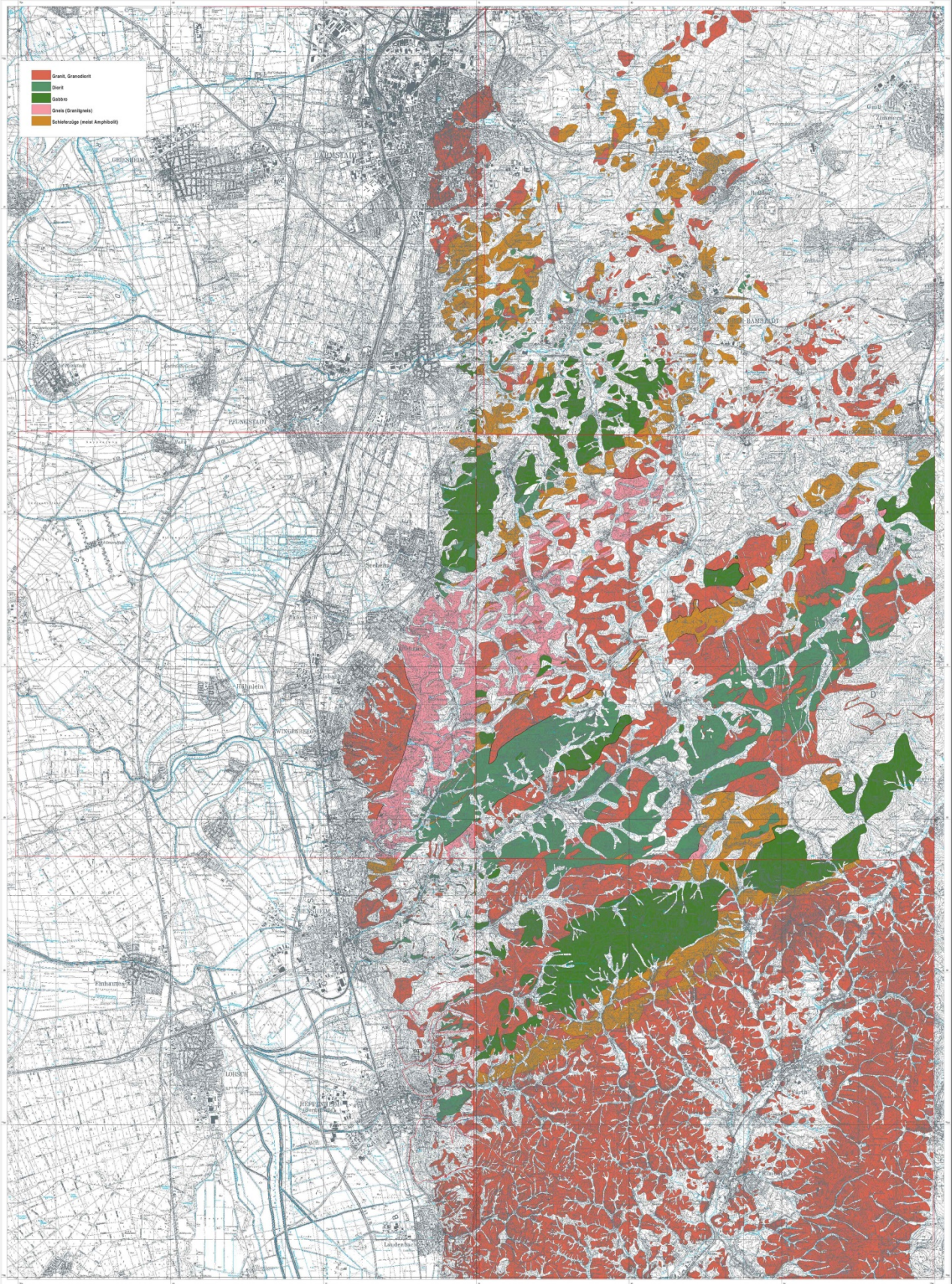




Skizze eines Profils durch das Modell. Die schwarzen Linien repräsentieren die Schichten des Basismodells, während die rote Linie die Startgeometrie der Schicht erhöhter Dichte darstellt: ihre Oberkante ist das Top Prä-Perm, welches als schwarze Linie direkt über der roten, welche die invertierbare Basis zeigt, eingezeichnet ist. Am Anfang trägt die Schicht mit erhöhter Dichte also nichts zum Modell bei. Während der Inversion wird die Basis an den gesetzten Ankerpunktlokalationen verformt, so dass ein Volumen mit erhöhter Dichte entsteht. Dies ist in der Skizze als orange gemusterter Körper zu erkennen. Die Pfeile zeigen die Bewegung der Fläche an.

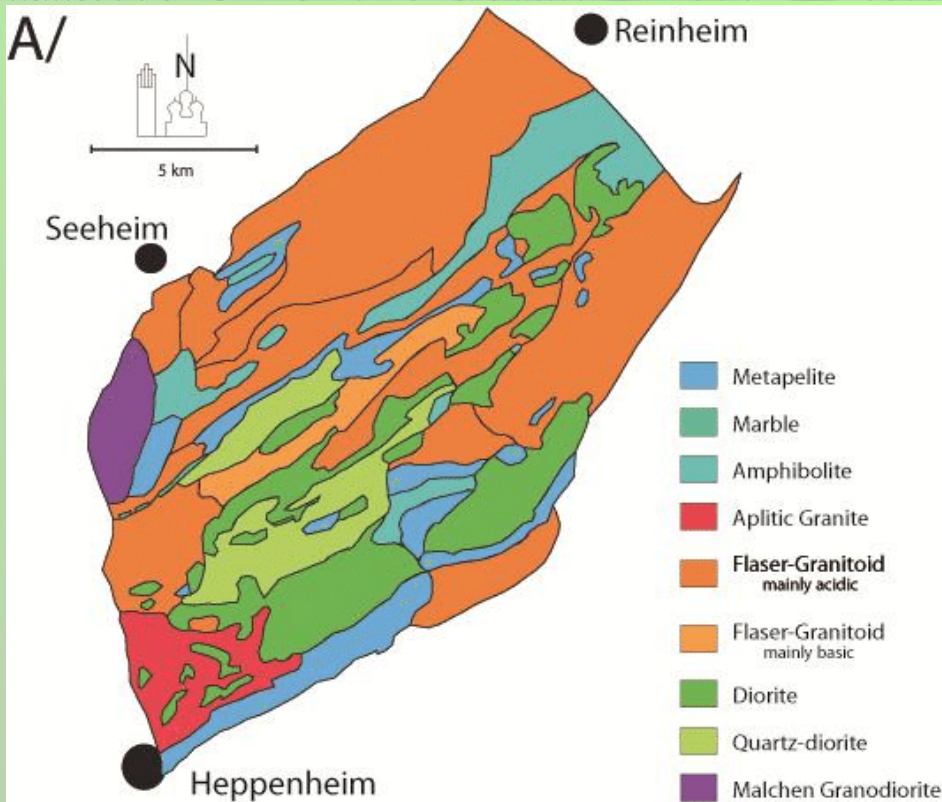
Die Oberflächengeologie-Körper sind in der Skizze als blaue Rechtecke gezeigt. Wo sie vorhanden sind, überschreiben sie die Schicht erhöhter Dichte. Die blauen Pfeile deuten die Bewegung der Körperunterkanten in der Inversion an. Im linken Fall wird die Basis tiefer gelegt, im rechten Fall wird die Basis in geringere Tiefe verschoben.



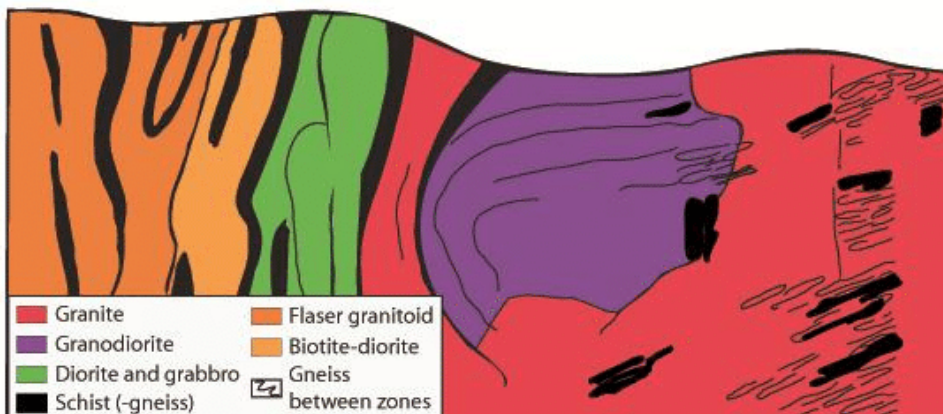


Masse 1:25 000





B/

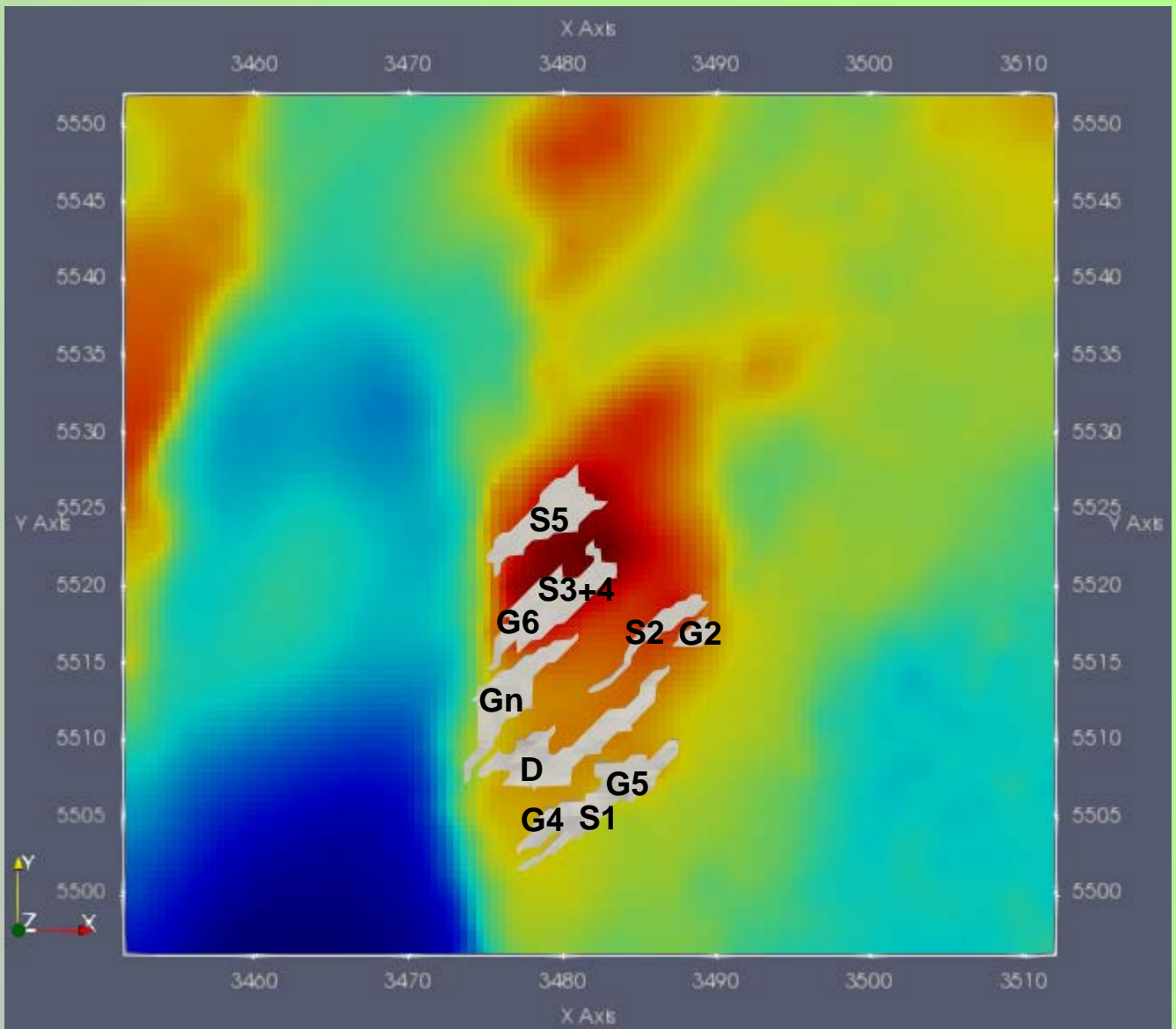


## » Vereinfachte geologischen Karte aus der Dissertation von Mélanie Forien (\*)

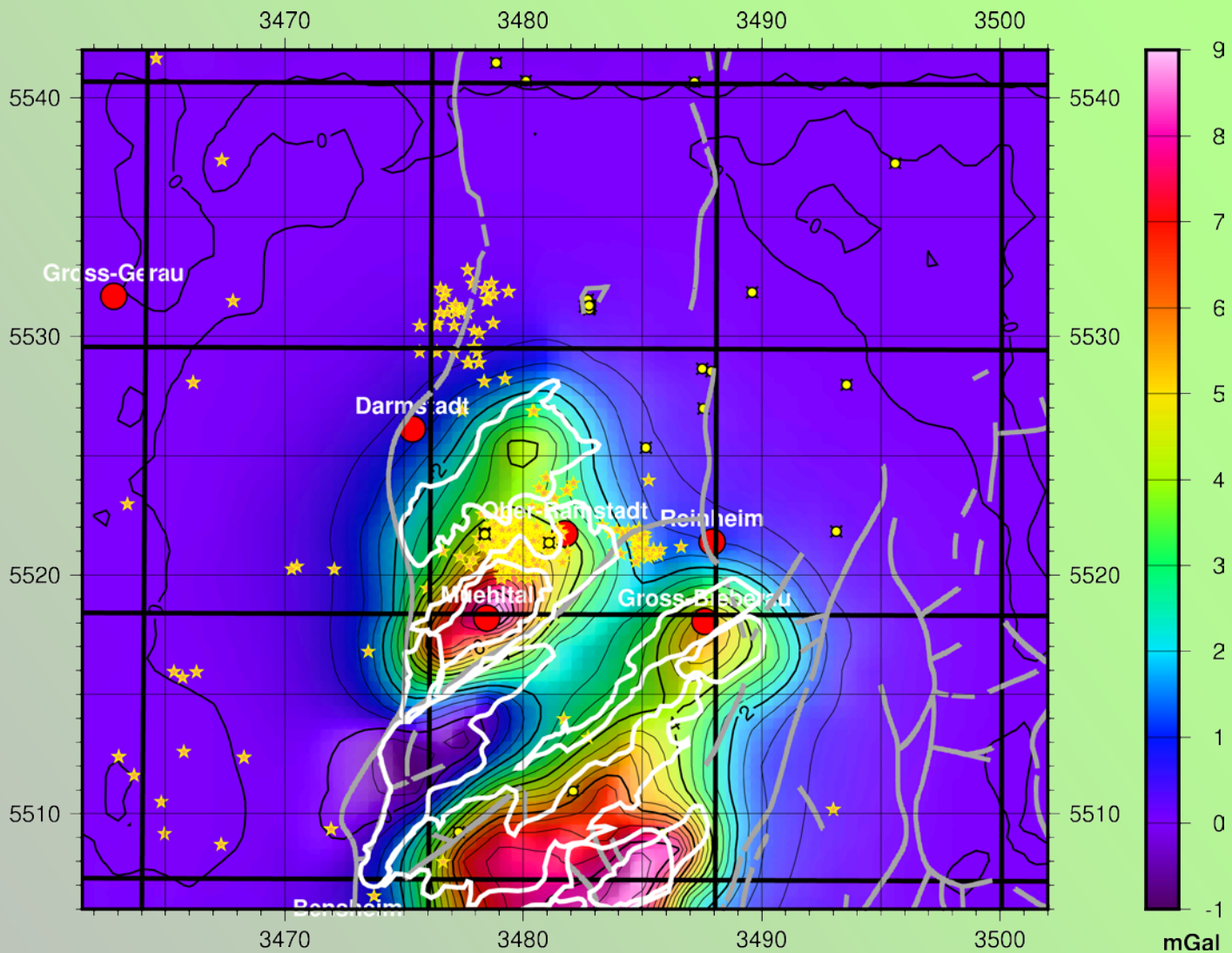
- » In der Literatur findet man Hinweise auf steil stehende Strukturen, die sich von der Oberfläche aus in ein paar Kilometer Tiefe ausdehnen können. Daher wurde für diesen Test 2.5km als Starttiefe für die invertierbaren Körperunterkanten gewählt.

(\*) Centrifuge experiments with magmatic systems: from melt segregation to pluton emplacement, Mélanie Forien, PhD Thesis, March 2001, The Arctic University of Norway. Abbildung nach Stein, E., 2001. The geology of the Odenwald Crystalline Complex. Mineralogy and Petrology, 72: 7-28.





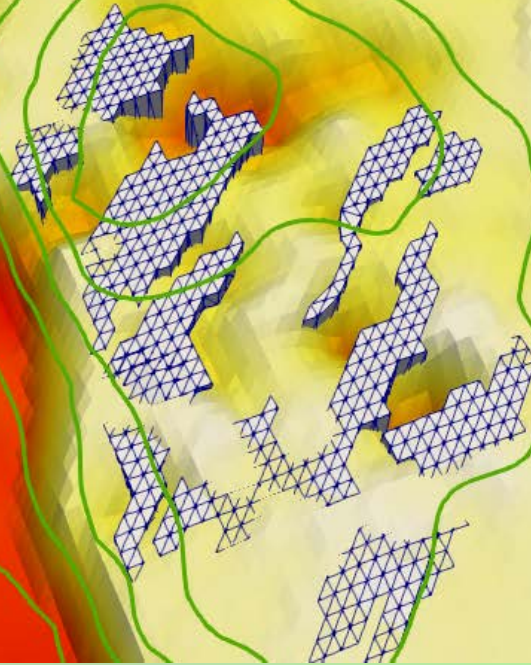
- » **Modellansicht von den aus der Oberflächengeologie gewonnenen Körpern zusammen mit der Bouguerschwerekarte**
- » Das zentrale Maximum wird von zwei Körpern flankiert. Es ist vorauszusehen, dass das Maximum nicht allein von den hier gezeigten Körpern erklärt werden kann.
- » Abkürzungen: Gn = Gneis, D = Diorit, S = Schiefer, G = Gabbro



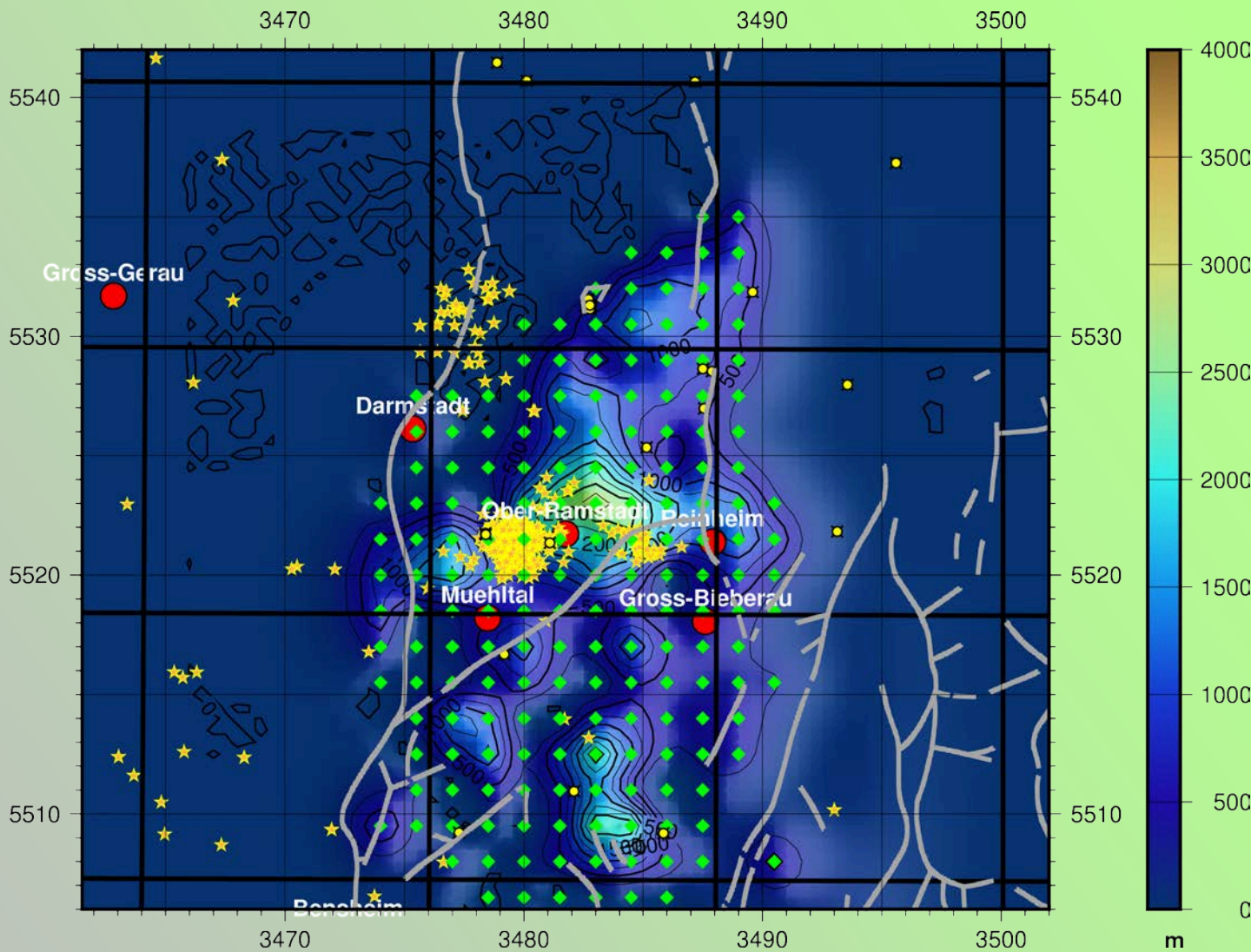
- » **Schwereeffekt der Körper. Ihre Dichten wurden anhand der vorgegebenen Dichteinformationen zugewiesen.**
- » Die Körper sind als weiße Polygone eingezeichnet. Sie haben als Startwert ihre Unterkanten in 2.5km Tiefe (unter NN). Die folgende Inversion durfte die Lage der Unterkante verändern.
- » Durch die invertierbare Schicht werden die Körper quasi zu den Seiten hin erweitert, so dass sie das Schweremaximum nachbilden können.



3D-Ansicht des invertierten Modells. Die invertierte Schicht muss unterhalb des Prä-Perms liegen und zeichnet deshalb den Oberrheingraben nach, hat dort jedoch keine Mächtigkeit. Zwischen den Oberflächenkörpern sorgt sie für erhöhte Dichte an Stellen, wo keine Körper vorhanden sind.

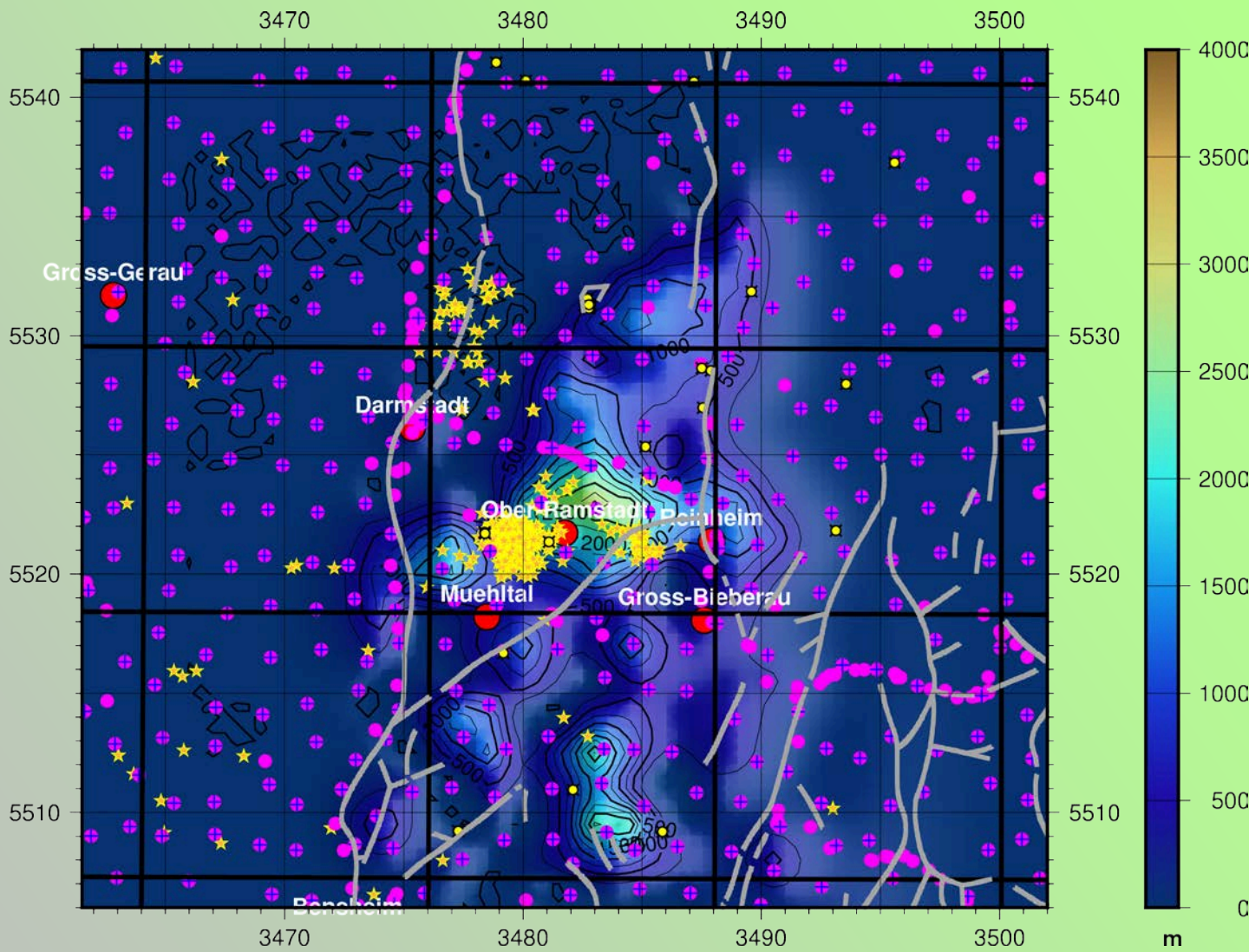






## » Invertierte Schichtmächtigkeit

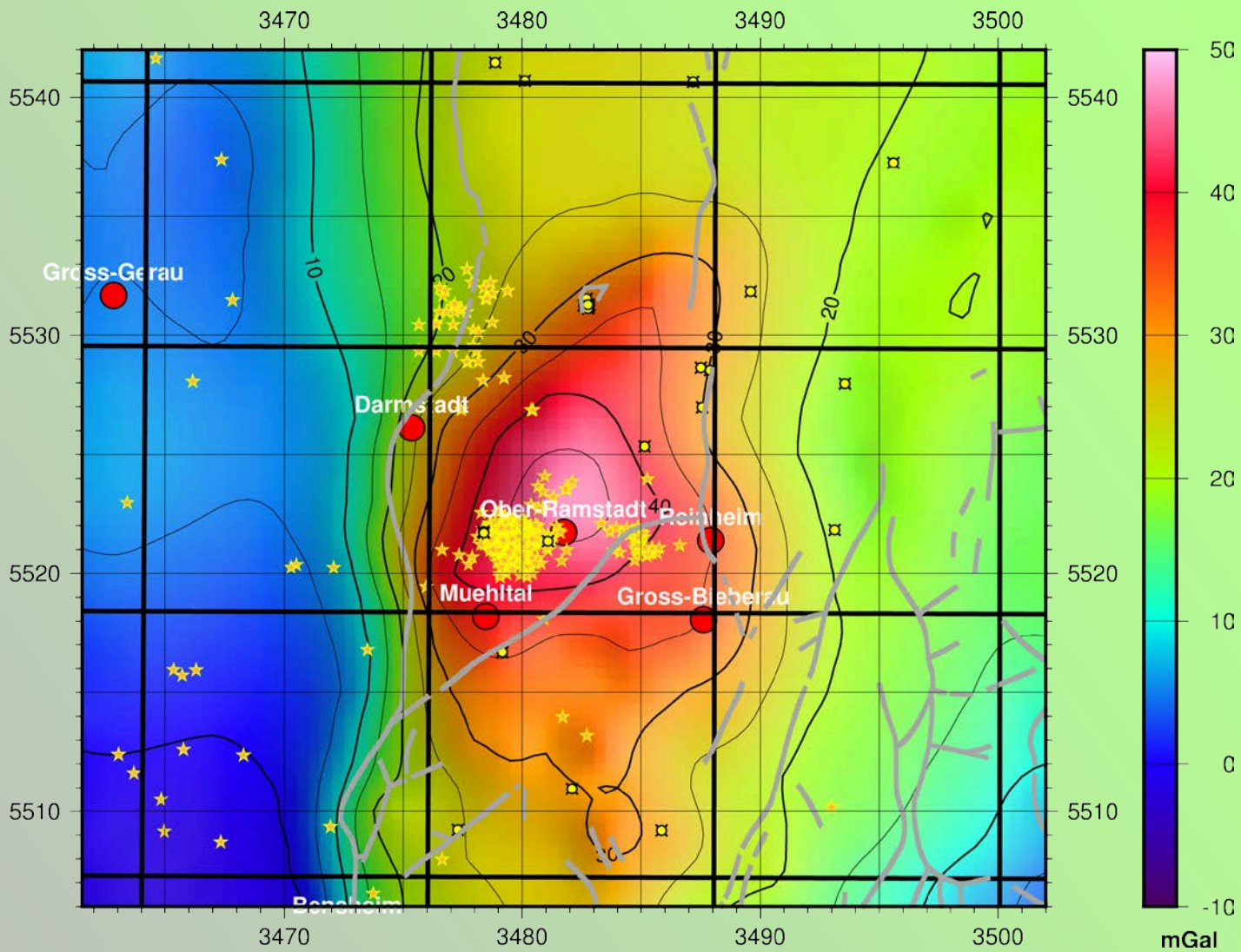
- » Zusätzlich zu den Körpern wurde eine Schicht mit invertierbarer Basis unter das Top Prä-Perm gelegt. Diese erklärt einen großen Teil der Schwere im Interessengebiet.
- » Die grünen Rauten sind die Lokationen der Ankerpunkte, an denen die Schicht nach unten gezogen werden durfte.



## » Invertierte Schichtmächtigkeit.

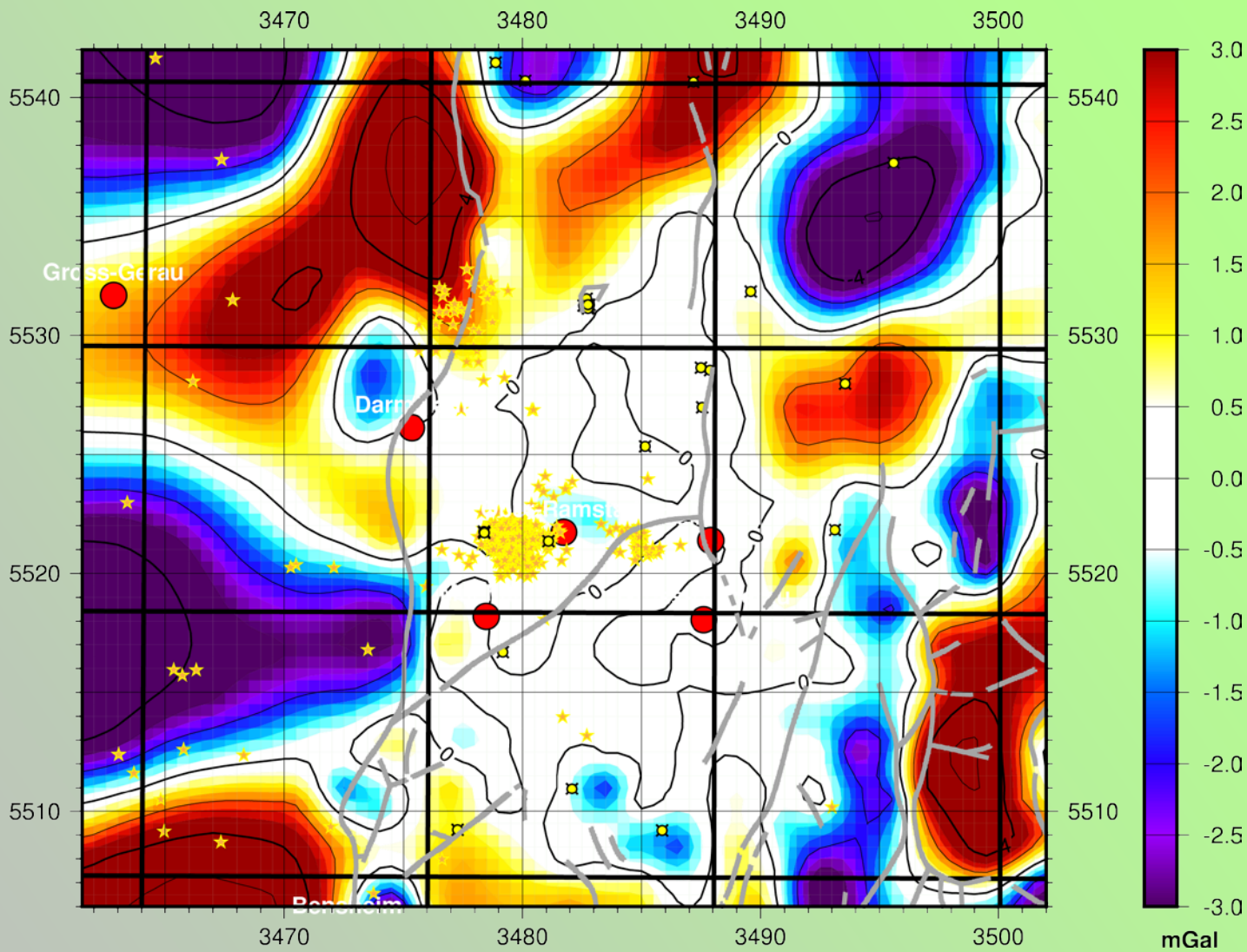
- » Die magentafarbenen Punkte sind die Schweremesspunkte. Blaue Kreuze zeigen an, welche in der Inversion verwendet worden sind. Eine Ausdünnung ist sinnvoll, weil sonst die wenigen Bereiche mit hoher Messpunktdichte zu viel Gewicht auf diese Regionen legen würden.



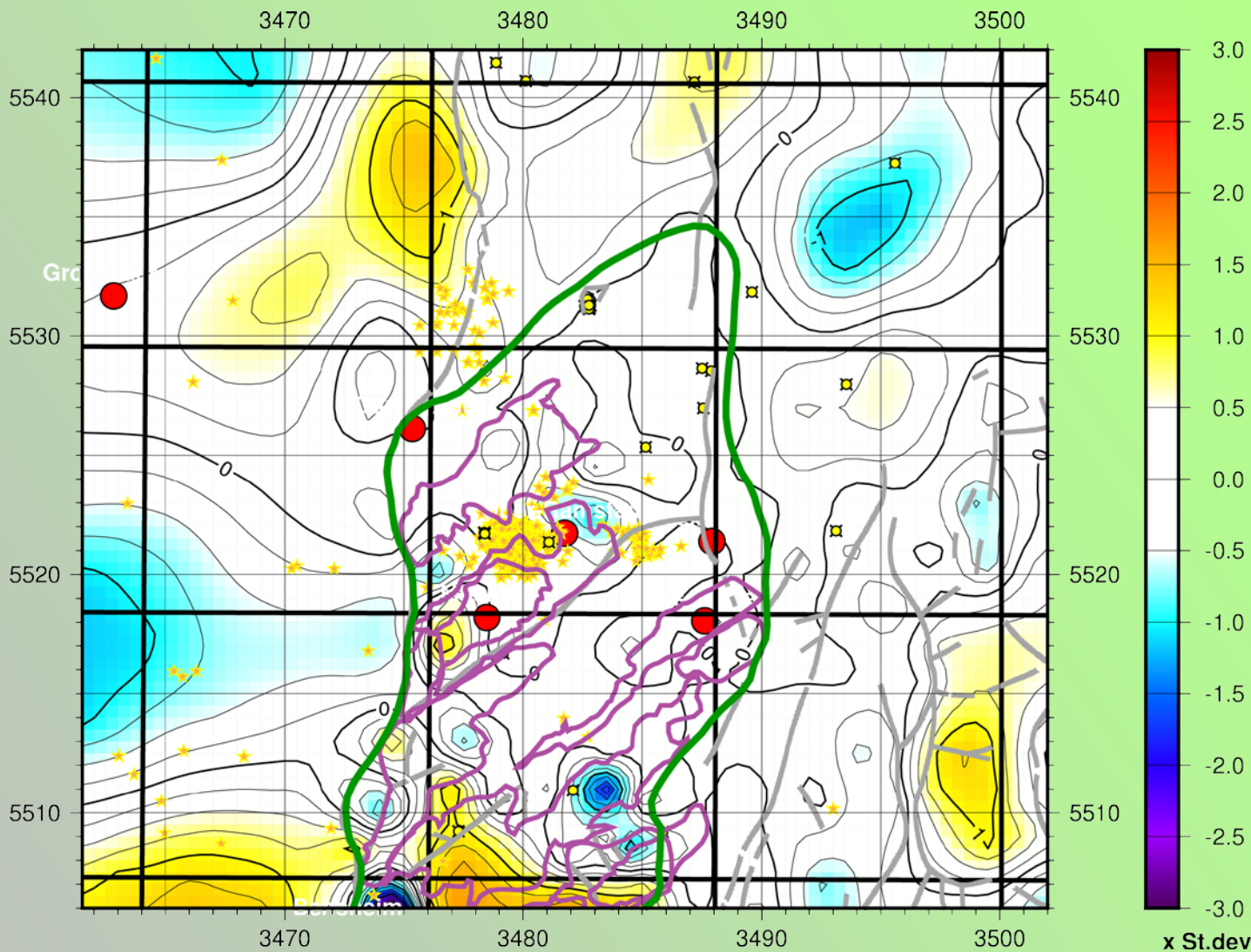


- » Modellschwerewirkung des Modells mit Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.

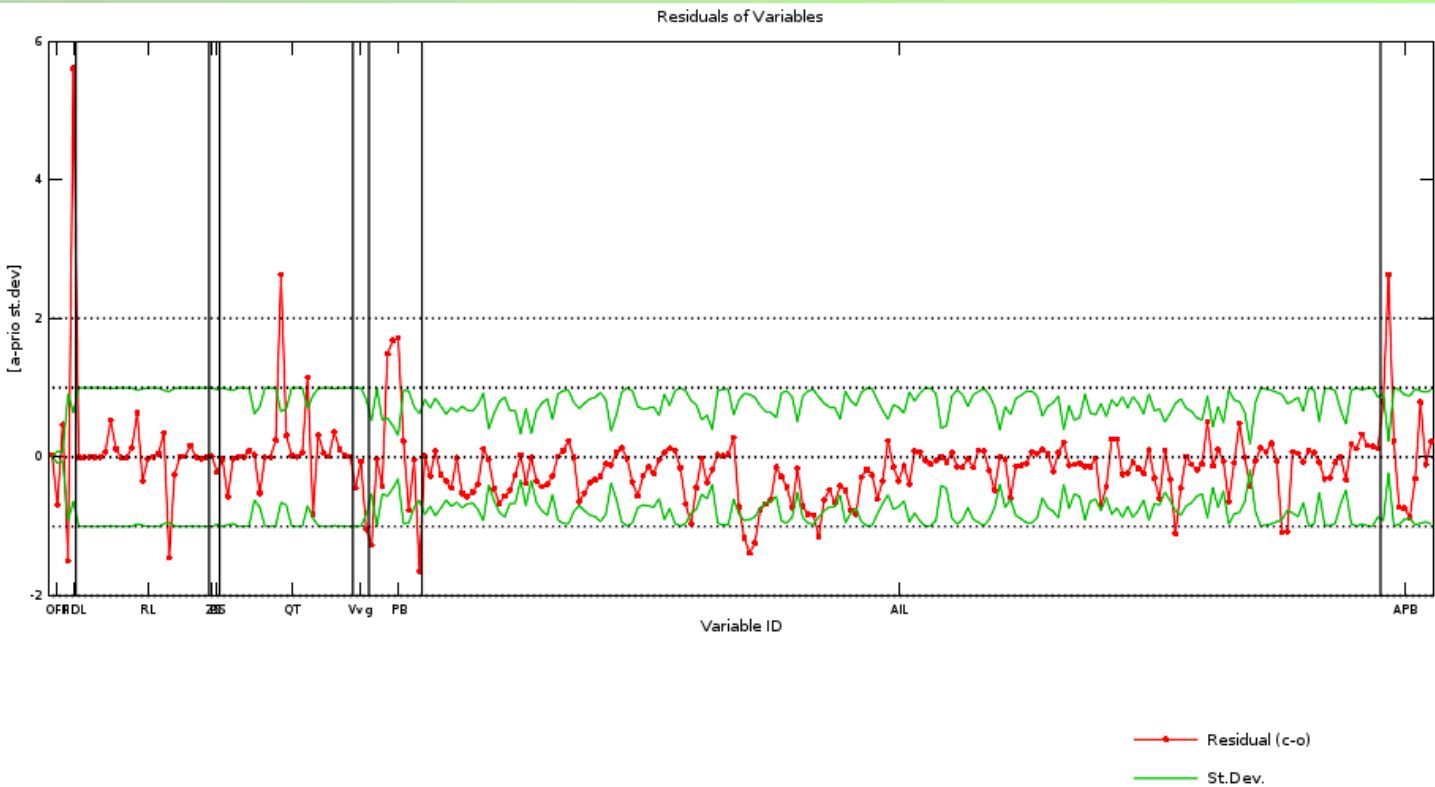




- » **Schwereresiduum des Modells mit Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.**
- » Dort, wo die Schicht erhöhter Dichte die größte Mächtigkeit hat, verbleibt ein kleines negatives Residuum. Ihre invertierte Dichte beträgt  $3030\text{kg/m}^3$ .



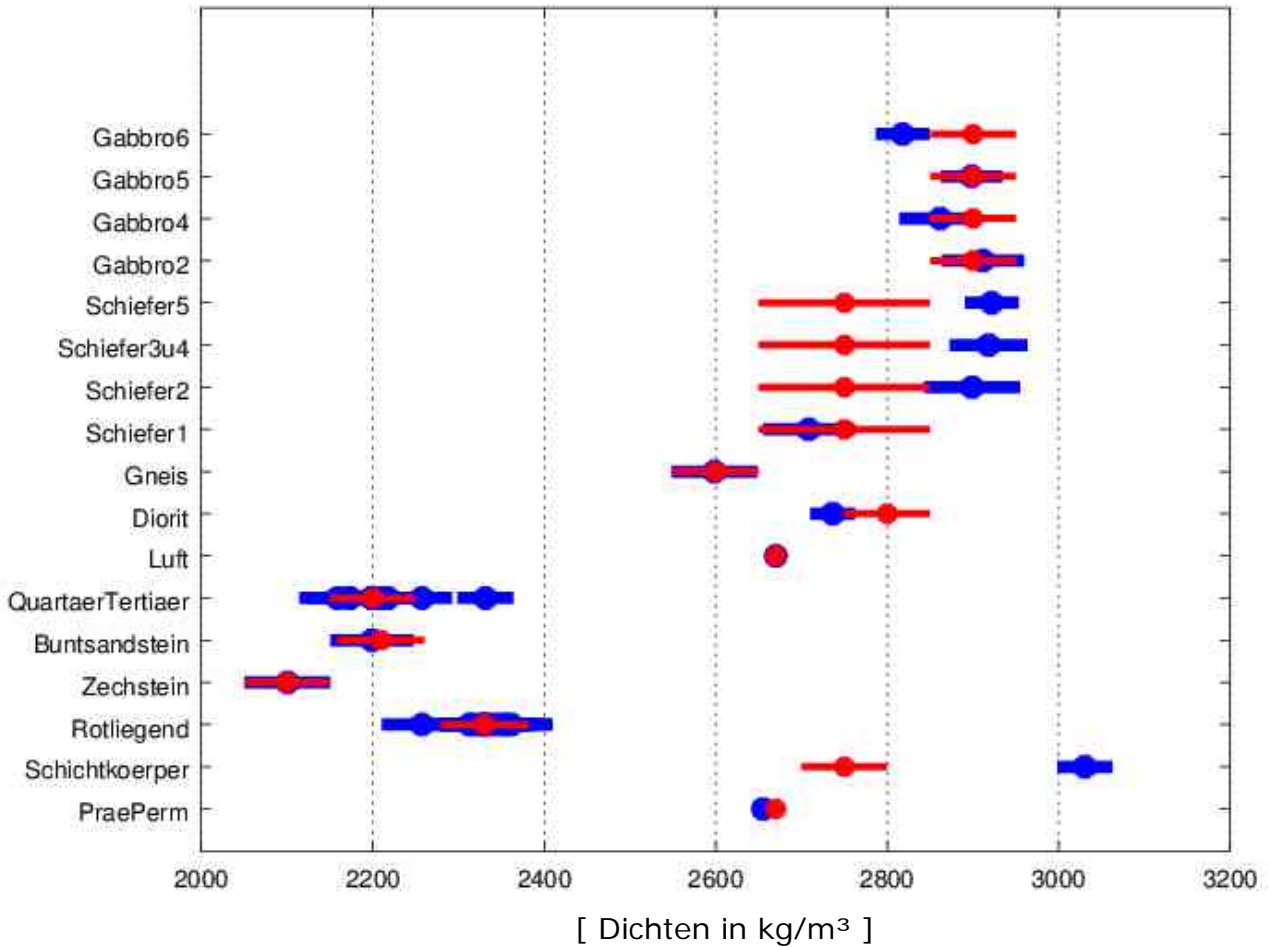
- » **Normiertes Schwereresiduum des Modells mit Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.**
- » Da von guten Anpassungsmöglichkeiten im Interessengebiet (grünes Polygon) ausgegangen wurde, beträgt die Modellierungsunsicherheit in diesem Bereich 1mGal und außerhalb 5mGal. Somit ist der innere Bereich gleich der vorherigen Seite (hier ist der Isolinienabstand 0.25 statt 1).
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 0.74mGal.



## » Inversionsstatistik des Modells

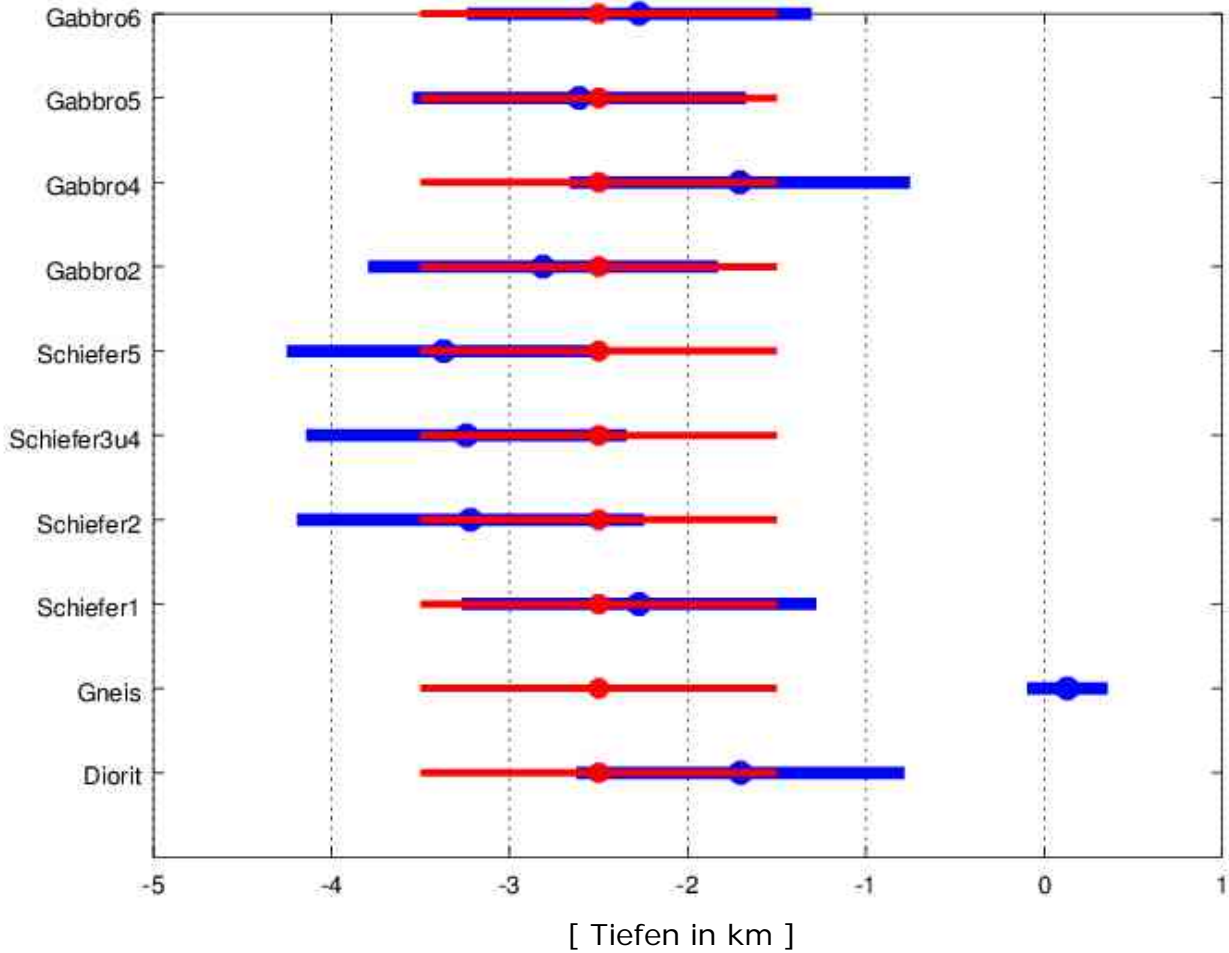
- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.





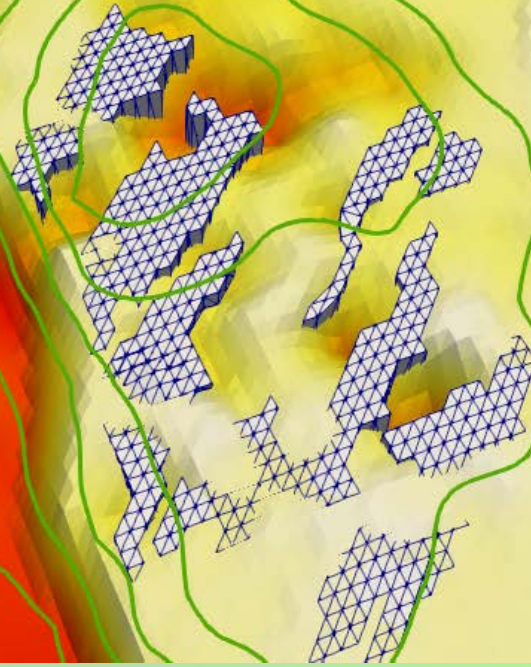
## » Modelldichten

- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.



- » **Bewegung der Körperunterkanten**
- » Gezeigt sind die Startwerte in rot und die invertierten Tiefen in blau, jeweils mit Standardabweichungen.
- » Die Starttiefe der Unterkanten lag in 2.5km Tiefe (Wert: -2.5).
- » Der leichte Gneis wird durch die Bewegung seiner Unterkante sehr flach zusammengedrückt.

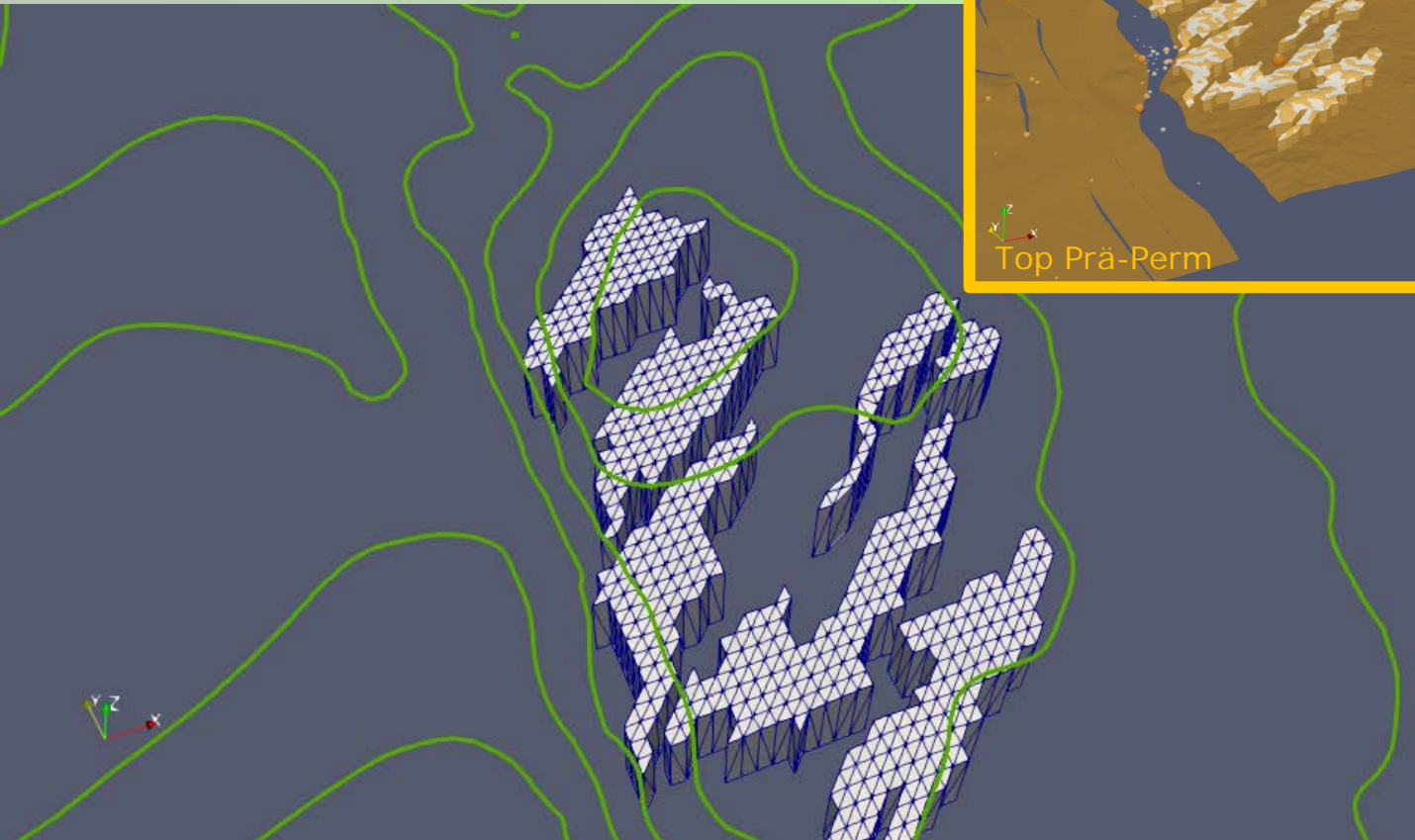
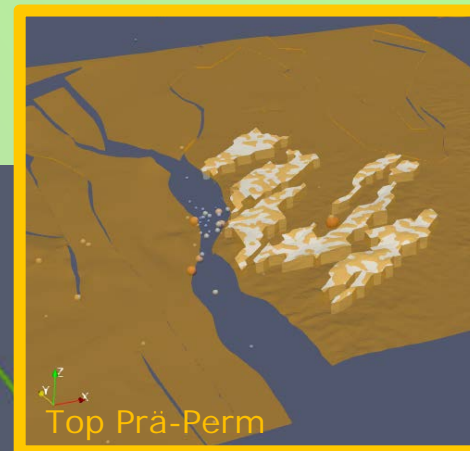
3D-Ansicht des invertierten Modells. Die invertierte Schicht muss unterhalb des Prä-Perms liegen und zeichnet deshalb den Oberrheingraben nach, hat dort jedoch keine Mächtigkeit. Zwischen den Oberflächenkörpern sorgt sie für erhöhte Dichte an Stellen, wo keine Körper vorhanden sind.





- » Aus dem Modell mit den Oberflächengeologie-Körpern kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Die digitalisierten Oberflächenkörper alleine reichen nicht aus, um das Schweremaximum zu erklären.
  - » Der Bereich erhöhter Dichte ist jedoch mit den Oberflächengeologie-Körpern sehr viel weniger mächtig als im Modell der invertierbaren Linse.
  - » Die Schicht erhöhter Dichte zwischen und neben den Körpern kann als fehlende Körper interpretiert werden. Möglicherweise sind die kartierten Körper unter der Oberfläche weiter ausgedehnt als an der Oberfläche ersichtlich. Insbesondere im nord-östlichen Teil liegt in der geologischen Karte keine Bezeichnung an dieser Stelle vor. Somit könnte der entsprechende Körper nur leicht mit Sediment bedeckt sein.
  - » Der Gneis scheint nur sehr flach zu sein.
  - » Die meisten Schiefer erhalten die gleiche Dichte wie die Gabbros. Wahrscheinlich bestehen sie aus dichterem Material als erwartet.

- » Dieses Modell gleicht dem vorher gezeigten, jedoch darf hier auch die horizontale Lage der Körperunterkanten verschoben werden. Außerdem wird die Dichte der zwischen und neben den Körpern befindlichen Schicht in der Nähe der Gabbro-Dichte gehalten. Da die meisten Schiefer-Körper diese Dichte von der Inversion erhalten, kann eine erhöhte Mächtigkeit dieser füllenden Schicht als Erweiterung von sowohl Gabbro als auch Schiefer angesehen werden.
- » Die Verschiebung der Körperunterkanten lässt die Körper verkippt erscheinen. Da eine Korrelation der Verkippungsrichtungen der einzelnen Körper aus geologischer Sicht nicht notwendig erscheint, wird diese der Inversion auch nicht vorgegeben.
- » Neben den Dichten der Schichten und Körper wird die Lage der Körperunterkanten (vertikal und horizontal) sowie die Basis der Schicht zwischen den Körpern invertiert.

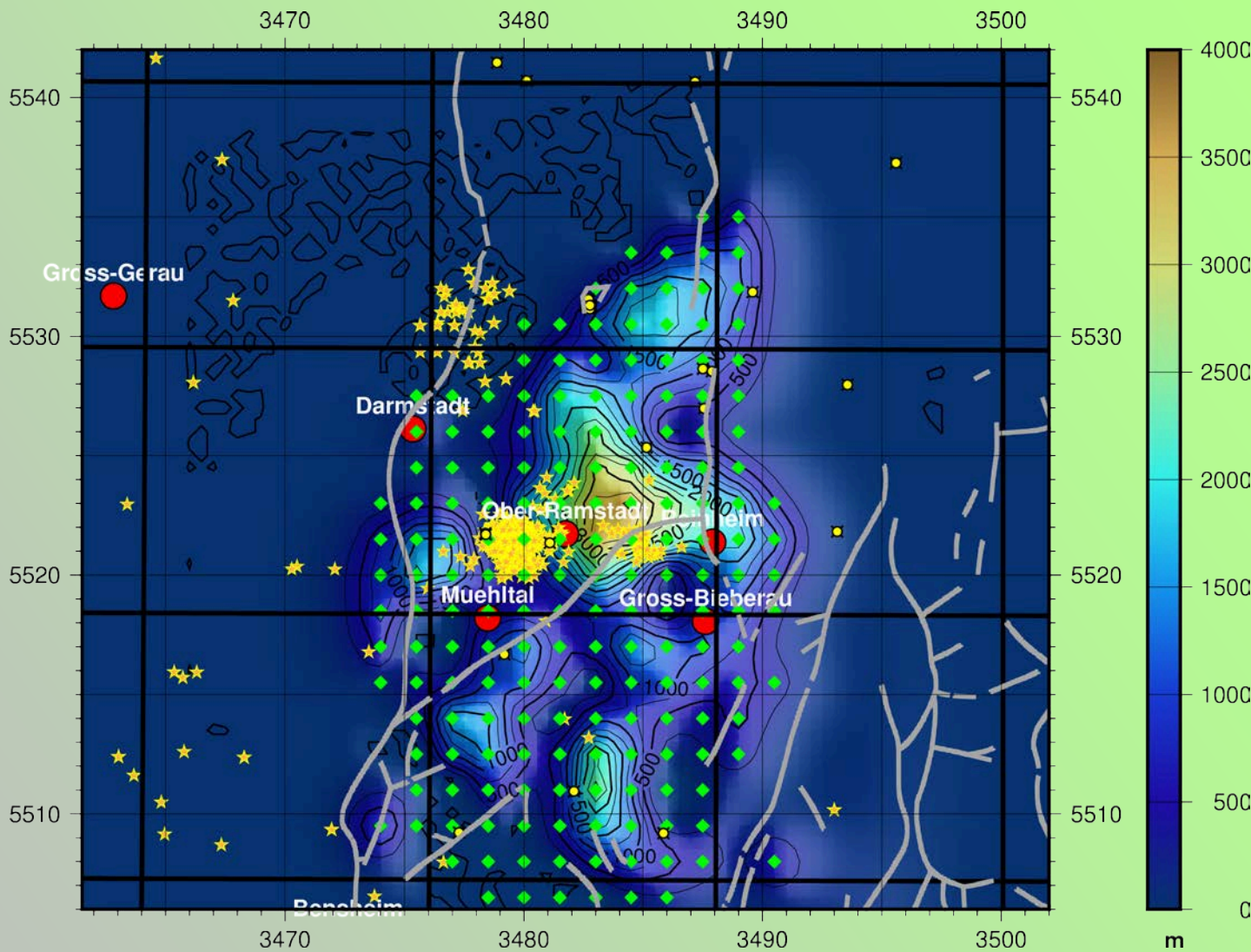




Skizze eines Profils durch das Modell. Die schwarzen Linien repräsentieren die Schichten des Basismodells, während die rote Linie die Startgeometrie der Schicht erhöhter Dichte darstellt: ihre Oberkante ist das Top Prä-Perm, welches als schwarze Linie direkt über der roten, welche die invertierbare Basis zeigt, eingezeichnet ist. Am Anfang trägt die Schicht mit erhöhter Dichte also nichts zum Modell bei. Während der Inversion wird die Basis an den gesetzten Ankerpunktlokalationen verformt, so dass ein Volumen mit erhöhter Dichte entsteht. Dies ist in der Skizze als orange gemusterter Körper zu erkennen. Die Pfeile zeigen die Bewegung der Fläche an.

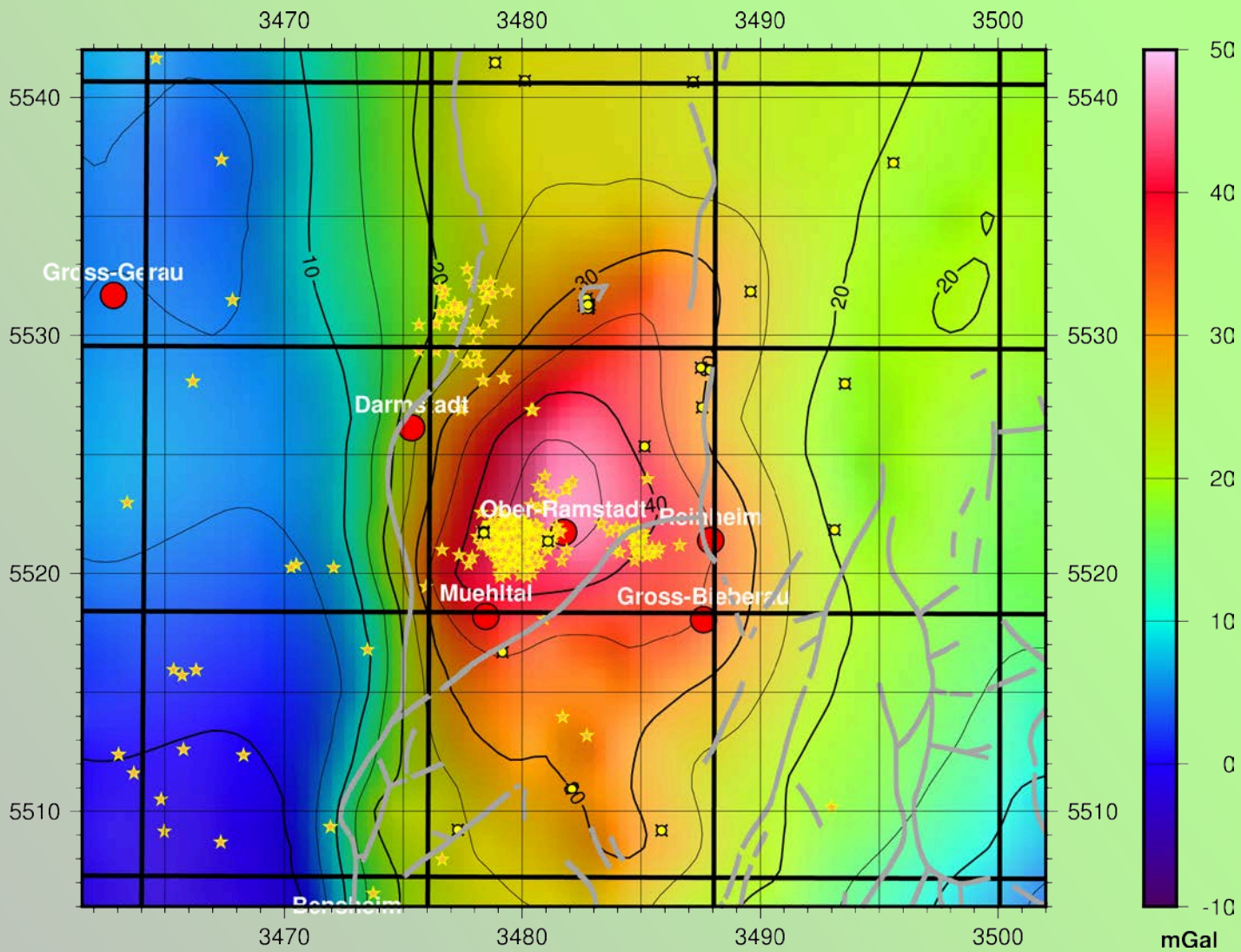
Die Oberflächengeologie-Körper sind in der Skizze als blaue Rechtecke gezeigt. Wo sie vorhanden sind, überschreiben sie die Schicht erhöhter Dichte. Die blauen Pfeile deuten die Bewegung der Körperunterkanten in der Inversion an. Im linken Fall wird die Basis tiefer gelegt und nach links verschoben, im rechten Fall wird die Basis in geringere Tiefe und ebenfalls nach links gesetzt (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist hier der Bewegungspfeil in Cyan eingezeichnet).





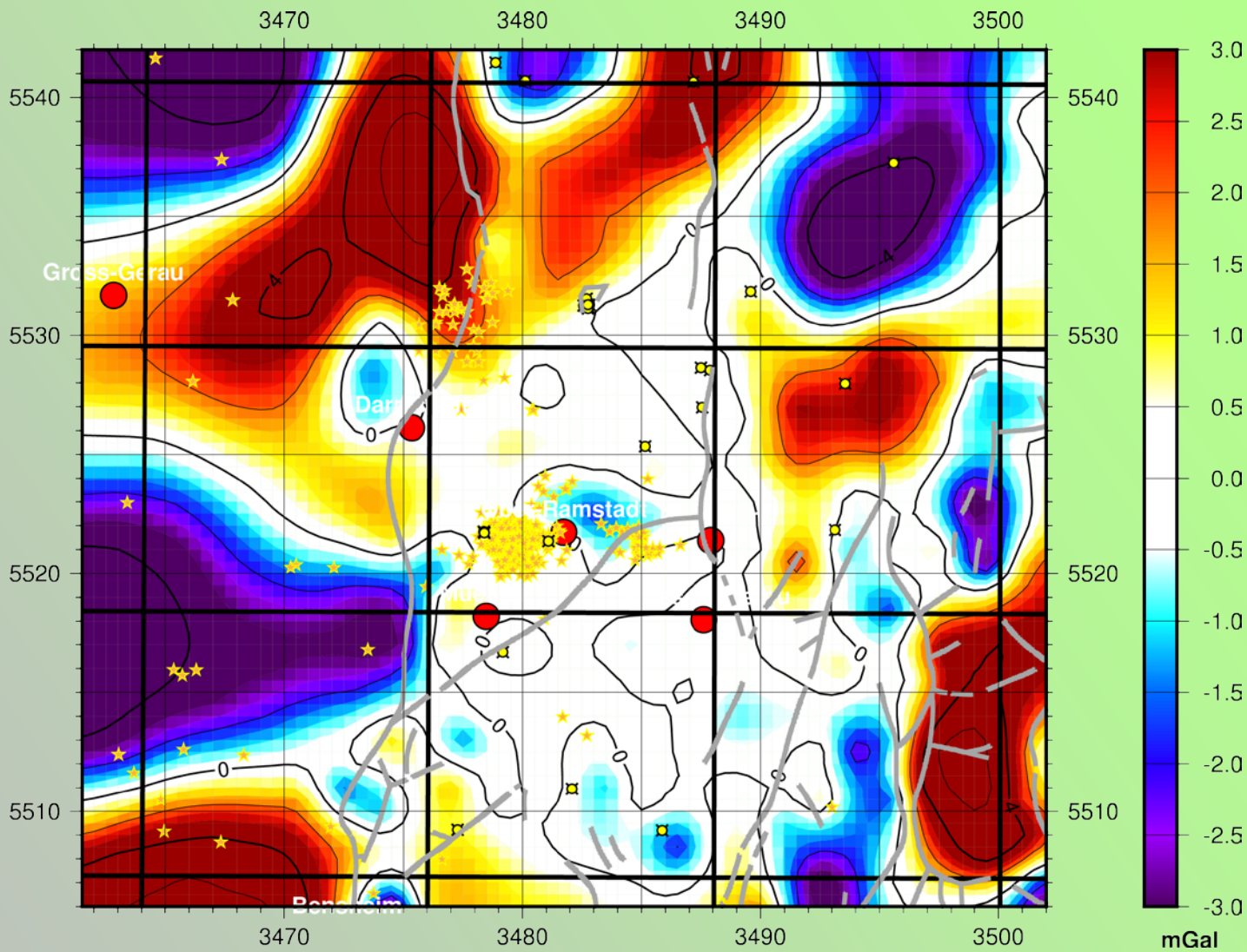
## » Invertierte Schichtmächtigkeit

- » Zusätzlich zu den Körpern wurde eine Schicht mit invertierbarer Basis unter das Top Prä-Perm gelegt. Diese erklärt einen großen Teil der Schwere im Interessengebiet.
- » Die grünen Rauten sind die Lokationen der Ankerpunkte, an denen die Schicht nach unten gezogen werden durfte.
- » Von den Dichten her kann die Schicht als Erweiterung der Gabbro- und Schiefer-Körper angesehen werden.



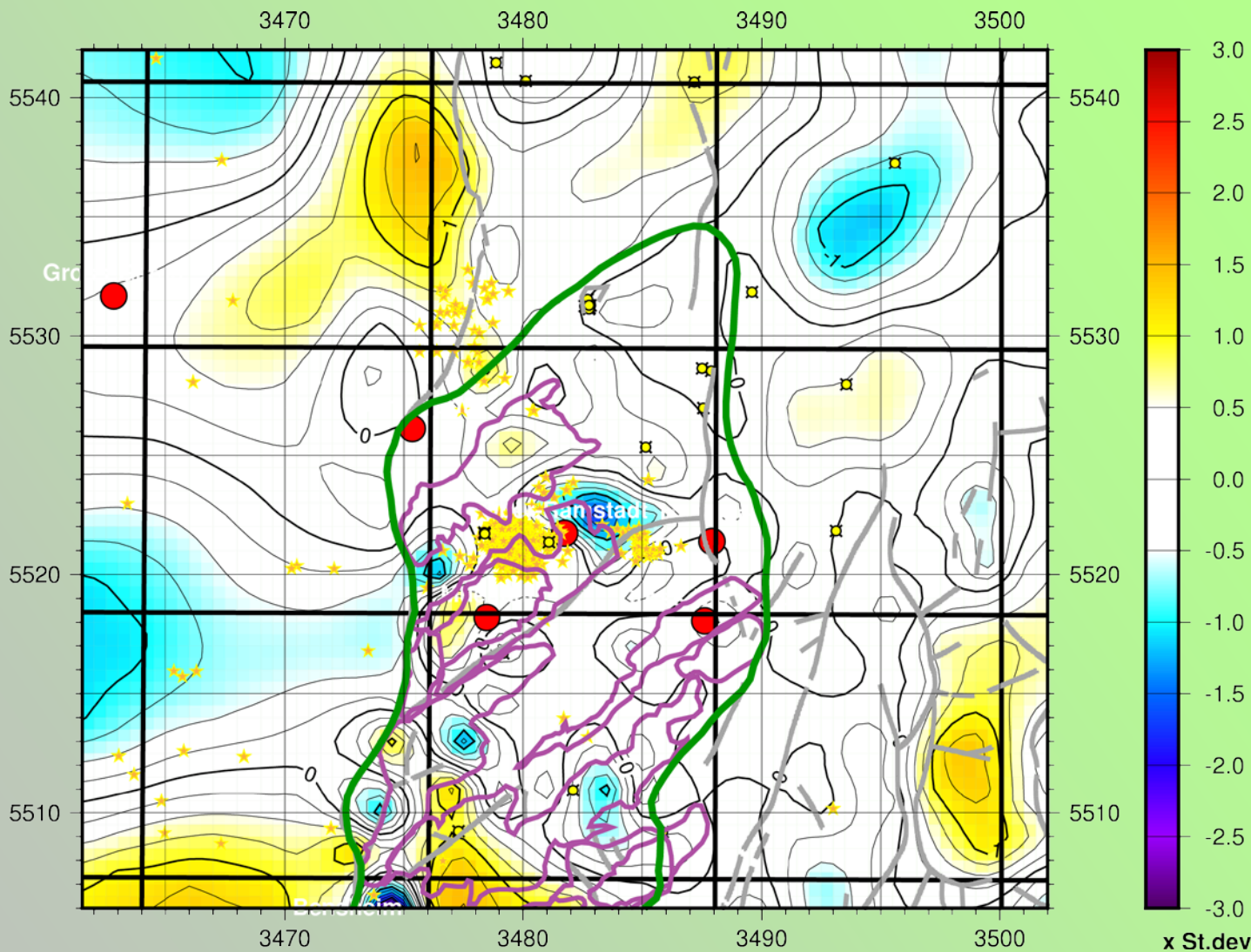
- » Modellschwerewirkung des Modells mit verkippten Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.



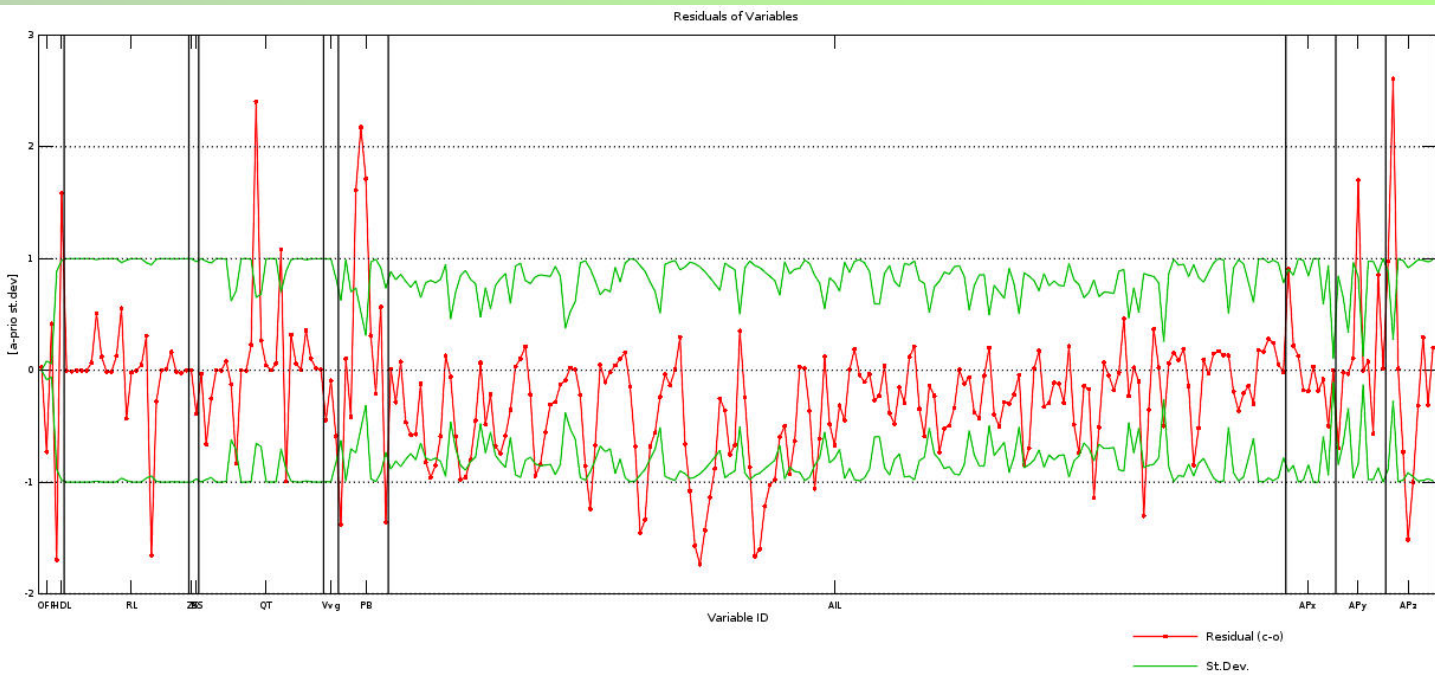


- » **Schwereresiduum des Modells mit verkippten Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.**
- » Dort, wo die Schicht erhöhter Dichte die größte Mächtigkeit hat, verbleibt ein negatives Residuum. Ihre invertierte Dichte beträgt  $2908\text{kg/m}^3$ .



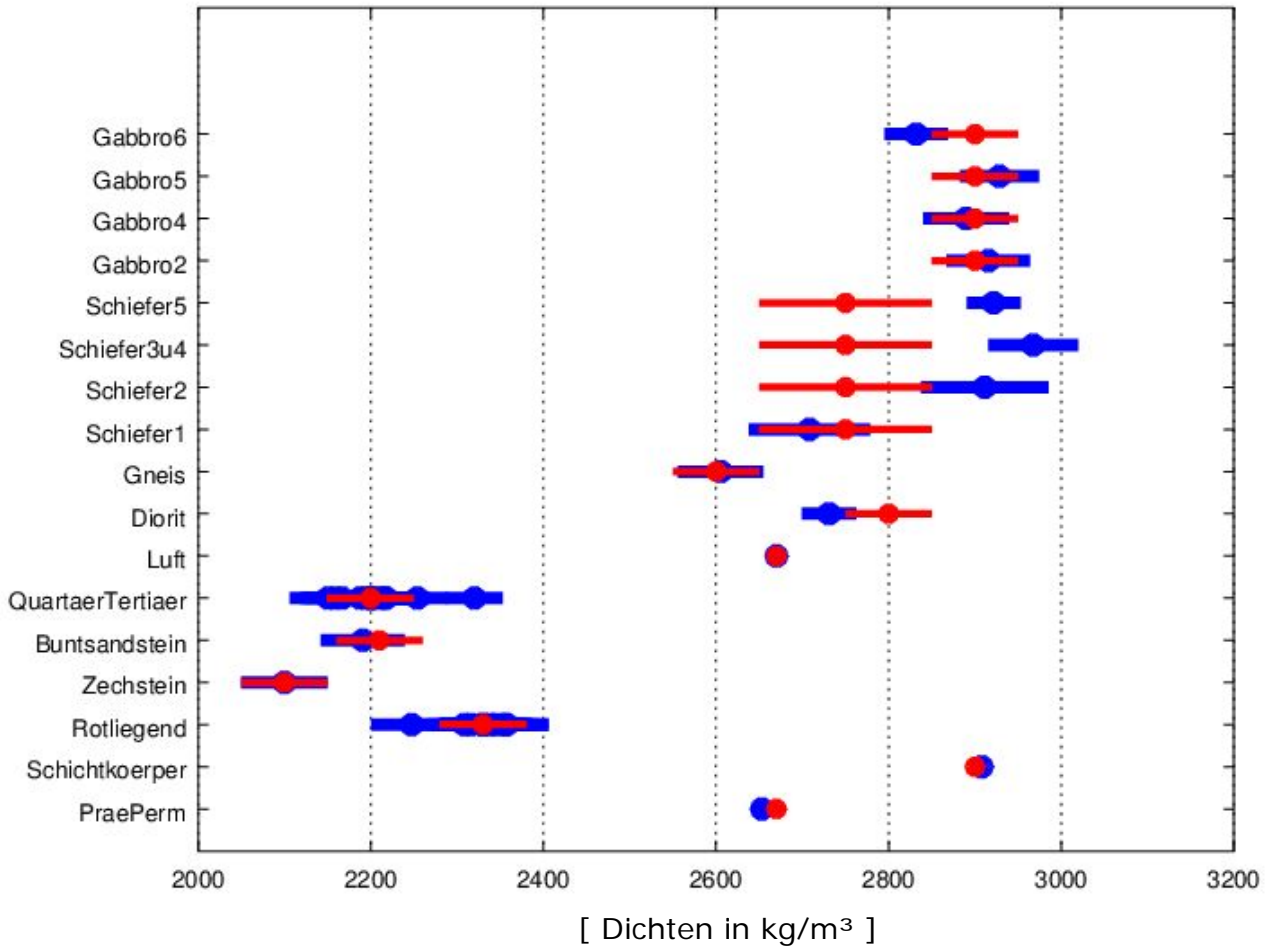


- » **Normiertes Schwereresiduum des Modells mit verkippten Oberflächengeologie-Körpern und invertierter Schichtbasis.**
- » Da von guten Anpassungsmöglichkeiten im Interessengebiet (grünes Polygon) ausgegangen wurde, beträgt die Modellierungsunsicherheit in diesem Bereich 1mGal und außerhalb 5mGal. Somit ist der innere Bereich gleich der vorherigen Seite (hier ist der Isolinienabstand 0.25 statt 1).
- » Im Polygonbereich beträgt das mittlere Residuum (RMSE) 0.76mGal.



## » Inversionsstatistik des Modells

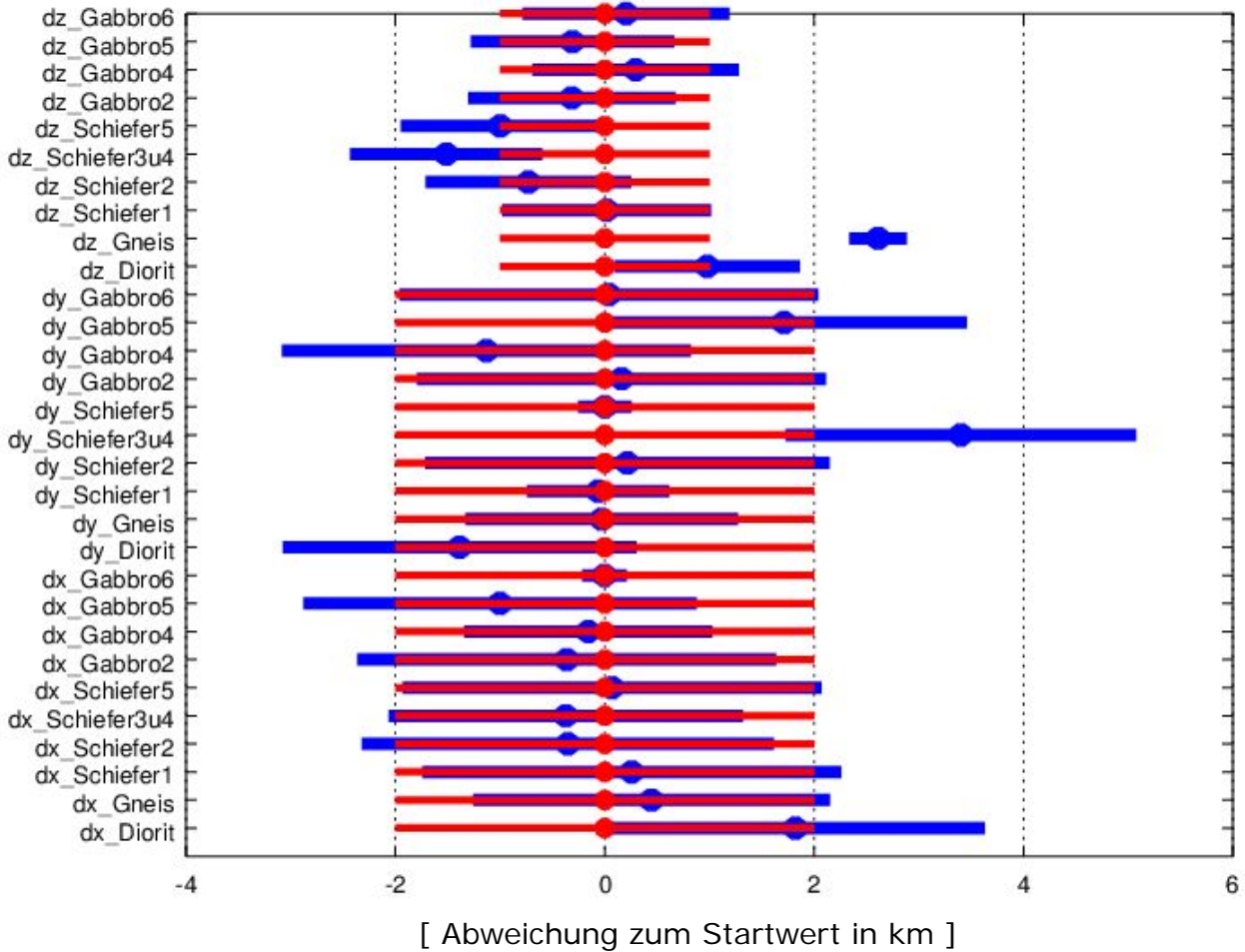
- » Hier sieht man einen Teil der Inversionsstatistik des Modells. Anhand der roten Linie kann man sehen, um wieviele a-priori Standardabweichungen sich die Variable durch die Inversion verändert hat. Die grüne Linie zeigt an, wie sich die a-posteriori Standardabweichung relativ zur a-priori Standardabweichung verhält.
- » 1 und -1 auf der vertikalen Achse entsprechen einer a-priori Standardabweichung.



## » Modelldichten

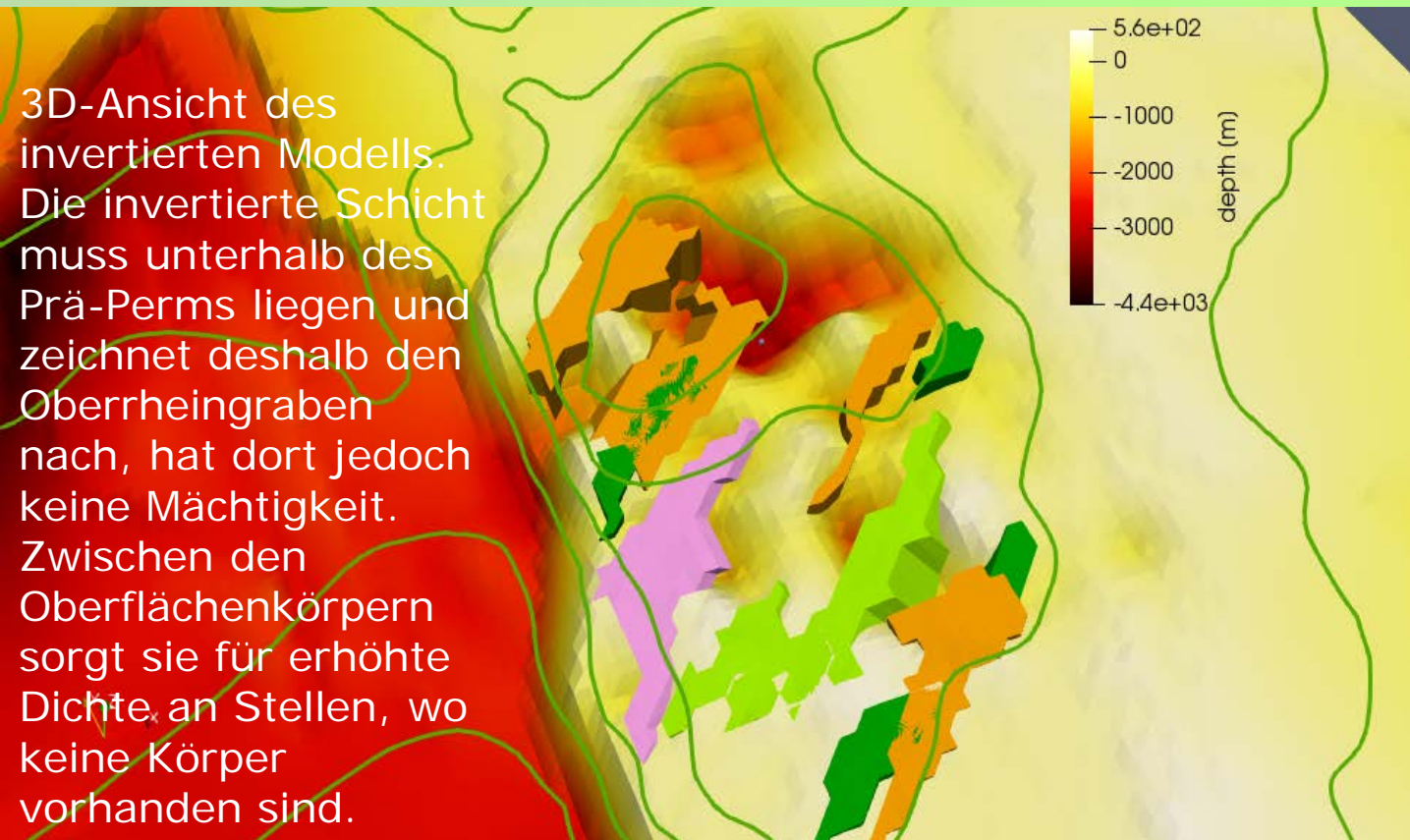
- » Gezeigt sind die Startdichten und Standardabweichungen in rot und die invertierten Dichten und Standardabweichungen in blau.
- » Der Dichte der Schicht, dessen Basis von der Inversion verändert werden durfte, wurde in der Nähe der Gabbro-Dichte gehalten.





## » Bewegung der Körperunterkanten

- » Gezeigt sind die Startwerte in rot und die invertierten Bewegungen in blau, jeweils mit Standardabweichungen.
- » Die Starttiefe der Unterkanten lag in 2.5km Tiefe (Wert: -2.5).
- » Der leichte Gneis wird durch die Bewegung seiner Unterkante (dz) sehr flach zusammengedrückt.







- » Aus dem Modell mit den verkippten Oberflächengeologie-Körpern kann folgendes abgeleitet werden:
  - » Die verkippten Oberflächenkörper alleine reichen nicht aus, um das Schweremaximum zu erklären.
  - » Der Bereich erhöhter Dichte ist jedoch mit den Oberflächengeologie-Körpern sehr viel weniger mächtig als im Modell der invertierbaren Linse.
  - » Die Schicht erhöhter Dichte zwischen und neben den Körpern kann als fehlende Körper interpretiert werden. Möglicherweise sind die Körper unter der Oberfläche weiter ausgedehnt als an der Oberfläche ersichtlich. Insbesondere im nord-östlichen Teil liegt in der geologischen Karte keine Bezeichnung an dieser Stelle vor. Somit könnte der entsprechende Körper nur leicht mit Sediment bedeckt sein.
  - » Der Gneis scheint nur sehr flach zu sein.
  - » Die meisten Schiefer erhalten die gleiche Dichte wie die Gabbros. Wahrscheinlich bestehen sie aus dichterem Material als erwartet.
  - » Das Haupterdbebengebiet liegt an der Unterkante eines verkippten Schiefers. Er ist der einzige Körper, dessen Unterkante deutlich nach Norden verschoben worden ist. Die anderen Körperunterkanten wurden entweder kaum oder nach Süden verschoben. Möglicherweise möchte die Inversion an dieser Stelle aber auch die Lücke zwischen den zwei Schiefen füllen, und die Verschiebung nach Norden sollte nicht als solche interpretiert werden, sondern vielmehr als eine Verbindung der beiden Schiefer unter der Oberfläche.

- » Die Ursache des Schweremaximums ist auf ein großes Volumen erhöhter Dichte zurückzuführen. Um es mit vernünftiger Dichte erklären zu können (maximal 3000 kg/m<sup>3</sup>), beträgt die Mächtigkeit mehrere Kilometer.
- » Die genaue Tiefenlage der Unterkante dieses Volumens ist vorerst noch schwer bestimmbar, liegt jedoch nicht flacher als ca. 3km unter NN.
- » Die Nord-West Flanke ist in der Bouguerschwere sehr deutlich und zeigt einen Bereich, wo die Dichte auf kleinem Raum von Umgebungsdichte zu erhöhter Dichte ansteigt.
- » Der südliche Bereich ist schlechter von der Schwere auflösbar, hier ist ein weicherer Dichtegradient denkbar.
- » Die Erdbeben liegen am Rand der zentralen Anomalie, wo die Mächtigkeit und/oder Dichte des Störkörpers am größten ist.
- » Die an der Oberfläche kartierten Gesteine setzen sich sehr wahrscheinlich zu den Seiten hin unter einer dünnen Auflage fort. An welchen Stellen dies der Fall sein müsste, kann an der invertierten Schicht erhöhter Dichte in den Oberflächengeologie-Modellen abgelesen werden.
- » Modelleigenschaften, die gravimetrisch noch mehrdeutig sind, könnten mit erweiterten geologischen Vorinformationen besser bestimmt werden.

- » Auf den folgenden Seiten werden die Modelldichten der in diesem Dokument gezeigten Modelle aufgeführt. In den meisten Fällen sind sie sehr ähnlich.



# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-155.65
Buntsandstein	2186.9	-0.399	-102.22
Zechstein	2098.8		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-11.46
Prä-Perm	2668.0		
Turm	2893.9		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2200.2 2208.7 2202.8 2200.1 2200.1

5538 2203.5 2269.7 2198.1 2205.4 2200.3

5524 2207.3 2294.1 2193.3 2197.1 2199.8

5510 2203.0 2202.5 2121.1 2200.7 2199.9

5496 2199.7 2185.7 2179.6 2200.0 2200.0

Min: 2121.11 / Max: 2294.14 / Mean: 2202.9

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2330.3 2334.2 2330.9 2329.7 2330.0

5538 2332.6 2356.2 2309.9 2329.9 2330.0

5524 2334.5 2359.4 2316.8 2329.3 2330.0

5510 2331.7 2340.9 2331.3 2329.5 2329.5

5496 2330.0 2329.9 2329.9 2329.9 2329.9

Min: 2309.86 / Max: 2359.37 / Mean: 2331.84

- » **Dichten für das Modell mit einem konischen Trochoiden-Turm**
- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-151.41
Buntsandstein	2188.6	-0.399	-101.93
Zechstein	2099.1		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-11.22
Prä-Perm	2670.0		
Körper Rot	2770.7		
Körper Lila	2769.1		
Körper Blau	2769.6		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552	2200.1	2207.3	2202.0	2200.2	2200.1
5538	2202.9	2254.3	2191.3	2205.5	2200.5
5524	2206.4	2284.0	2199.9	2192.3	2199.8
5510	2202.4	2196.4	2130.4	2200.4	2199.9
5496	2199.7	2184.7	2178.9	2200.0	2200.0

Min: 2130.40 / Max: 2283.97 / Mean: 2201.58

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552	2330.2	2333.5	2330.0	2329.6	2330.0
5538	2332.2	2349.5	2305.8	2330.1	2330.0
5524	2333.9	2355.4	2320.4	2330.9	2330.0
5510	2331.4	2339.9	2331.4	2329.6	2329.6
5496	2330.0	2329.9	2329.9	2329.9	2329.9

Min: 2305.77 / Max: 2355.37 / Mean: 2331.32

- » **Dichten für das Modell mit den drei konischen Trochoiden**
- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-168.54
Buntsandstein	2202.6	-0.399	-100.52
Zechstein	2099.6		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-11.31
Prä-Perm	2664.2		
Körper Rot	2755.4		
Körper Lila	2762.2		
Körper Blau	2764.0		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552	2200.1	2207.5	2202.4	2200.5	2200.1
5538	2202.9	2257.1	2196.7	2206.9	2201.1
5524	2206.7	2289.1	2218.6	2198.6	2200.0
5510	2202.3	2202.1	2168.6	2200.6	2199.9
5496	2199.6	2187.7	2188.2	2200.1	2200.0

Min: 2168.60 / Max: 2289.14 / Mean: 2205.50

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552	2330.2	2333.6	2330.8	2329.9	2330.0
5538	2332.2	2351.4	2312.1	2329.2	2330.0
5524	2334.1	2357.3	2321.5	2328.7	2330.0
5510	2331.4	2340.1	2332.5	2329.8	2329.7
5496	2330.0	2329.9	2329.9	2329.9	2330.0

Min: 2312.15 / Max: 2357.29 / Mean: 2331.77

## » Dichten für das Modell mit den viereckigen Polygonkörpern

- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.



# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-175.81
Buntsandstein	2205.4	-0.399	-100.51
Zechstein	2100.0		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-11.32
Prä-Perm	2664.5		
Körper Rot	2734.0		
Körper Lila	2733.1		
Körper Blau	2755.4		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2200.1 2207.4 2202.5 2200.6 2200.2

5538 2202.9 2258.4 2199.6 2207.2 2201.3

5524 2207.0 2293.7 2203.2 2196.8 2200.0

5510 2202.4 2212.6 2177.3 2200.2 2199.9

5496 2199.6 2191.6 2196.8 2200.0 2200.0

Min: 2177.29 / Max: 2293.69 / Mean: 2206.46

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2330.2 2333.6 2331.0 2329.9 2330.0

5538 2332.2 2352.1 2314.0 2328.8 2330.0

5524 2334.3 2359.0 2321.5 2328.5 2330.0

5510 2331.5 2340.3 2331.9 2329.9 2329.8

5496 2330.0 2329.9 2330.0 2330.0 2330.0

Min: 2313.97 / Max: 2359.03 / Mean: 2331.93

- » **Dichten für das Modell mit den lineament-basierten Polygonkörpern**
- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-141.54
Buntsandstein	2198.4	-0.399	-100.00
Zechstein	2100.3		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-11.37
Prä-Perm	2576.4		
Linse	2915.1		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

**3451.5 3462.8 3474 3493 3512**

**5552** 2200.3 2215.4 2205.1 2201.6 2200.5

**5538** 2202.0 2226.8 2154.8 2207.7 2202.3

**5524** 2210.0 2295.0 2175.6 2198.1 2200.0

**5510** 2203.2 2179.6 2125.0 2199.9 2199.9

**5496** 2198.4 2166.4 2187.5 2200.0 2200.0

Min: 2124.96 / Max: 2294.97 / Mean: 2198.2

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

**3451.5 3462.8 3474 3493 3512**

**5552** 2330.5 2337.1 2332.3 2330.0 2330.0

**5538** 2331.6 2335.8 2278.3 2326.3 2330.0

**5524** 2335.6 2350.8 2310.8 2329.0 2330.0

**5510** 2333.1 2353.1 2334.4 2329.7 2329.7

**5496** 2329.9 2329.5 2329.9 2330.0 2330.0

Min: 2278.35 / Max: 2353.08 / Mean: 2329.9

## » Dichten für das Modell mit invertierbarer Linse

- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-176.15
Buntsandstein	2199.1	-0.399	-100.00
Zechstein	2100.5		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-12.22
Prä-Perm	2655.0		
Schichtkörper	3030.4		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2200.3 2217.9 2205.6 2200.8 2200.3

5538 2203.1 2257.3 2158.8 2216.1 2203.1

5524 2212.1 2331.5 2215.6 2201.2 2200.2

5510 2204.7 2201.8 2174.0 2199.8 2199.8

5496 2198.5 2171.4 2199.0 2200.0 2200.0

Min: 2158.76 / Max: 2331.55 / Mean: 2206.92

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2330.5 2338.4 2330.0 2328.9 2330.0

5538 2332.5 2347.5 2257.5 2317.3 2330.0

5524 2336.9 2361.9 2312.6 2328.8 2330.0

5510 2333.6 2356.4 2335.9 2329.5 2329.6

5496 2329.9 2329.5 2330.0 2330.0 2330.0

Min: 2257.48 / Max: 2361.87 / Mean: 2329.87

## » Dichten für das Modell mit Oberflächengeologie-Körpern (Teil 1)

- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.



# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Tiefe der Unterkante[km]
Diorit:	2736.4	-1.70
Gneis:	2598.5	0.13
Schiefer1:	2708.4	-2.27
Schiefer2:	2898.9	-3.22
Schiefer3u4:	2918.0	-3.24
Schiefer5:	2921.7	-3.37
Gabbro2:	2911.5	-2.81
Gabbro4:	2861.6	-1.71
Gabbro5:	2898.4	-2.61
Gabbro6:	2817.8	-2.27

## » Dichten für das Modell mit Oberflächengeologie-Körpern (Teil 2)

- » Hier sind die (homogenen) Dichten der Körper gezeigt sowie die invertierte Lage ihrer Unterkante unter NN.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenztiefe[km]	Dichtegradient[(kg/m <sup>3</sup> )/km]
Quartär+Tertiär	s.u.	-0.205	-164.69
Buntsandstein	2190.7	-0.399	-102.27
Zechstein	2100.0		
Rotliegend	s.u.	-1.018	-12.23
Prä-Perm	2653.0		
Schichtkörper	2907.9		

## Dichte Quartär+Tertiär [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2200.3 2217.8 2205.3 2200.8 2200.3

5538 2203.1 2254.0 2150.4 2215.9 2203.1

5524 2211.4 2320.1 2213.3 2202.2 2200.1

5510 2204.1 2193.7 2158.3 2200.0 2199.8

5496 2198.5 2166.9 2187.5 2200.0 2200.0

Min: 2150.39 / Max: 2320.12 / Mean: 2204.28

## Dichte Rotliegend [kg/m<sup>3</sup>] :

3451.5 3462.8 3474 3493 3512

5552 2330.5 2338.2 2329.3 2328.7 2330.0

5538 2332.5 2345.3 2247.3 2316.1 2330.0

5524 2336.4 2357.7 2308.4 2329.1 2330.0

5510 2333.4 2355.6 2336.2 2329.4 2329.4

5496 2329.9 2329.5 2329.9 2329.9 2329.9

Min: 2247.30 / Max: 2357.75 / Mean: 2328.90

## » Dichten für das Modell mit verkippten Oberflächengeologie-Körpern (Teil 1)

- » Die gezeigte Dichte gilt bei Schichten mit vertikaler Dichteänderung in der Referenztiefe. Nach oben hin ist die Dichte gemäß des Dichtegradienten verringert, in größerer Tiefe erhöht.
- » Für die Schichten mit lateraler Dichteveriation sind die Koordinaten in Kilometer in grün beigefügt.

# Addendum: Modelldichten

Name	Dichte[kg/m <sup>3</sup> ]	Tiefe der Unterkante[km]	dx[km]	dy[km]
Diorit:	2730.9	-1.52	1.82	-1.39
Gneis:	2605.3	0.11	0.45	-0.03
Schiefer1:	2708.3	-2.48	0.26	-0.06
Schiefer2:	2911.3	-3.23	-0.35	0.22
Schiefer3u4:	2967.4	-4.01	-0.37	3.40
Schiefer5:	2921.5	-3.50	0.07	-0.00
Gabbro2:	2915.6	-2.82	-0.36	0.16
Gabbro4:	2889.7	-2.21	-0.16	-1.13
Gabbro5:	2928.3	-2.81	-1.00	1.71
Gabbro6:	2832.0	-2.30	-0.00	0.04

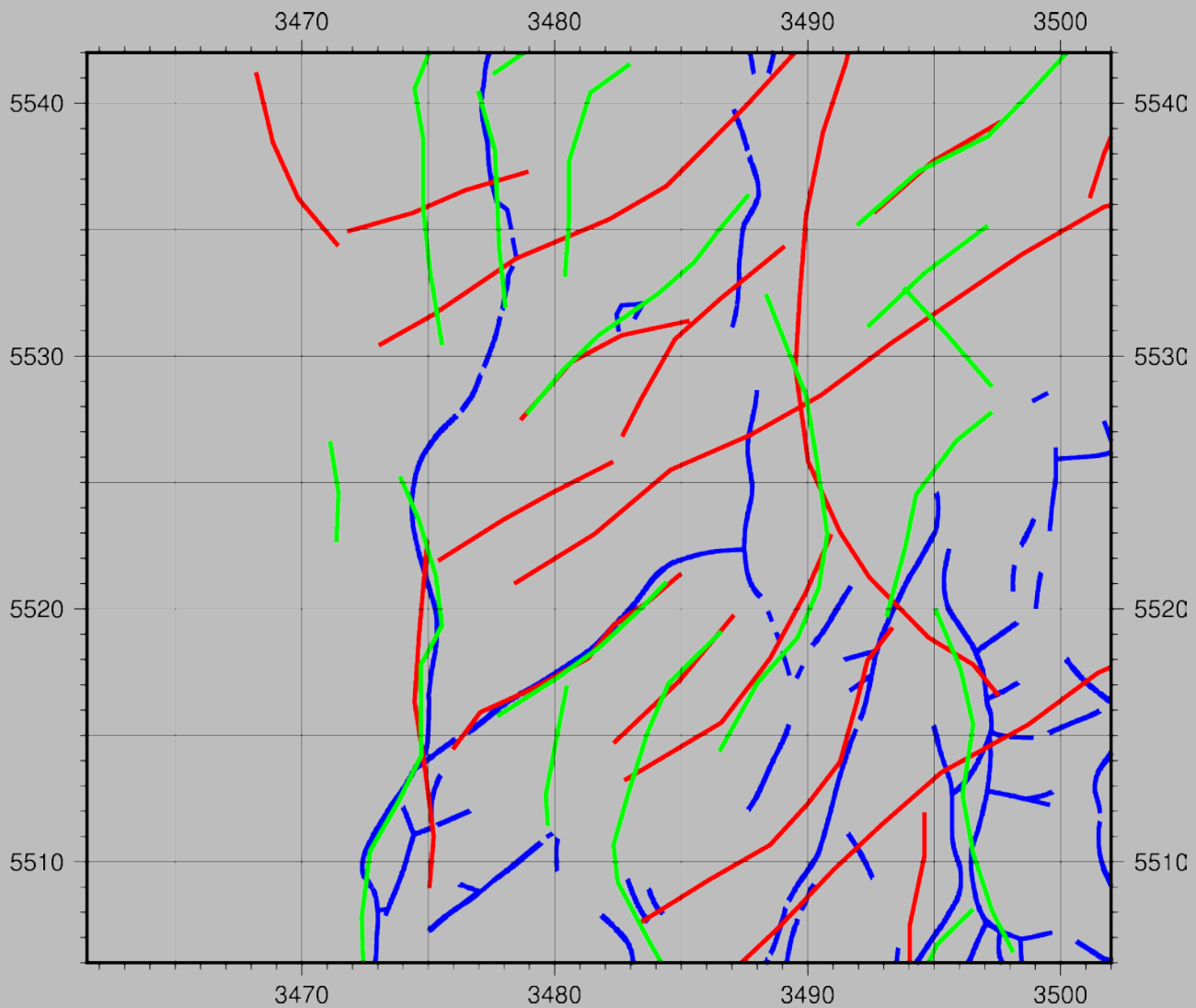
## » Dichten für das Modell mit verkippten Oberflächengeologie-Körpern (Teil 2)

- » Hier sind die (homogenen) Dichten der Körper gezeigt sowie die invertierte Lage ihrer Unterkante unter NN und die Verschiebung der Unterkante in Ost- (dx) und Nord-Richtung (dy).



- » Die hier im Appendix bereitgestellte Seite zeigt die vorhandenen Lineamente aus der Tektonik sowie Interpretationen aus Schwere und Magnetik. Sie kann (innerhalb von PowerPoint) kopiert und über die in der Präsentation gezeigten Karten gelegt werden.
- » Dieses Overlay unterscheidet sich von dem aus dem ersten Berichtteil insofern, als dass es nur das Ergebnisgebiet zeigt, also den gleichen Bereich abdeckt wie die meisten in diesem Dokument gezeigten Karten. Für Karten, die das ganze Modellgebiet abdecken, ist das Overlay aus Teil 1 zu verwenden.

# Lineamente (als Overlay)



- » **Lineament-Overlay zur Benutzung innerhalb der Präsentation**
- » **Blau:** Tektonik (aus vorhandener Datenbasis)
- » **Rot:** Lineamente aus der Magnetik (neu interpretiert)
- » **Grün:** Lineamente aus der Gravimetrie (neu interpretiert)

*Hinweis zur Benutzung: Auf die Abbildung klicken, kopieren und auf beliebiger Karte (gleichen Maßstabs) einfügen*