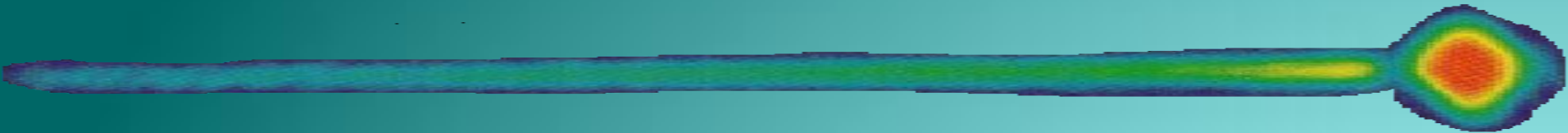


# Aero- und thermodynamische Verhältnisse in „tiefen Löchern“

unter Berücksichtigung der  
mikrometeorologischen Bedingungen  
innerhalb und außerhalb des Schachtes

# „Tiefe Löcher“ – Utopie oder Realität?

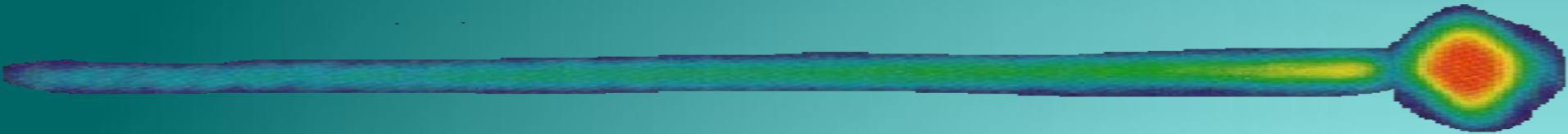


Die Erde wird für die wachsende Bevölkerung zu eng – es werden neue Platzreserven gesucht

- Platz für menschliches Leben
- Platz für Abfalldeponierung
- Platz für ungestörte wissenschaftliche Forschungstätigkeiten – z.B. Neutrinoforschung.

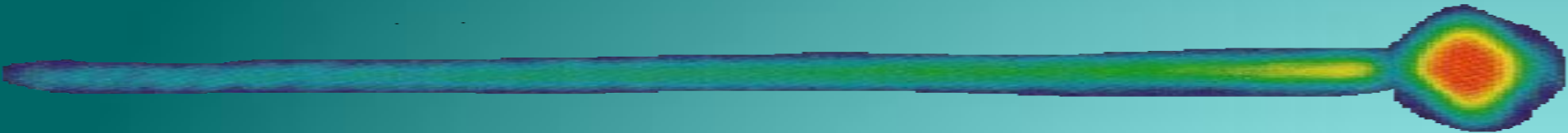
Der Blick führt uns ins All, aber auch in das Innere der Erde.

# „Tiefe Löcher“ – Realität der nahen Zukunft



Das Ziel des interdisziplinären Forschungsprojektes ist es, Methoden zu entwickeln, um „tiefe Löcher“ für die Menschheit in vielfältiger Weise nutzbar zu machen.

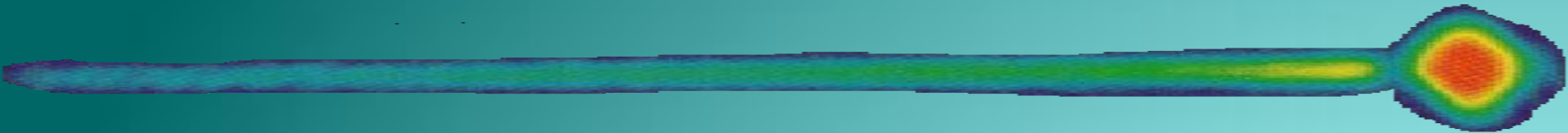
# Motivation zur Reise in die Erde



- Ressourcenknappheit
- Energiegewinnung
- Detektoren in der Elementarteilchenphysik (CERN)
- Sichere Endlagerung
- Lebensraumgewinnung
- Sicherheits- und Verkehrsbauten



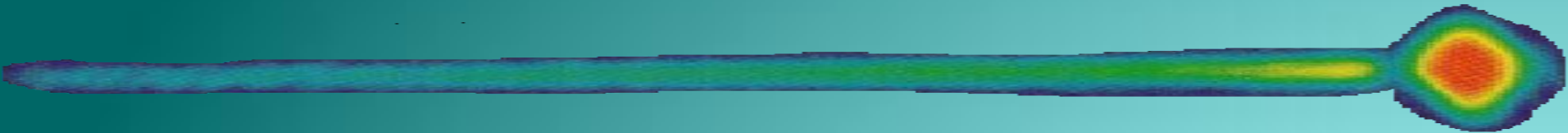
# „Tiefe Löcher“ – Ein Fall für Interdisziplinarität



Will man „tiefe Löcher“ in ihrer gesamten Komplexität verstehen, bedarf es der integrativen, kontinuierlichen Zusammenarbeit mehrerer Disziplinen

- \* Geologie
- \* Bergwerkstechnologie
- \* Physik und Chemie
- \* Strukturmechanik
- \* Elektro- und Magnetostatik
- \* Strömungsmechanik
- \* Vermessung
- \* Mikrometeorologie
- \* Technik des Bohrens und Verschmelzens

# Was sind „tiefe Löcher“?

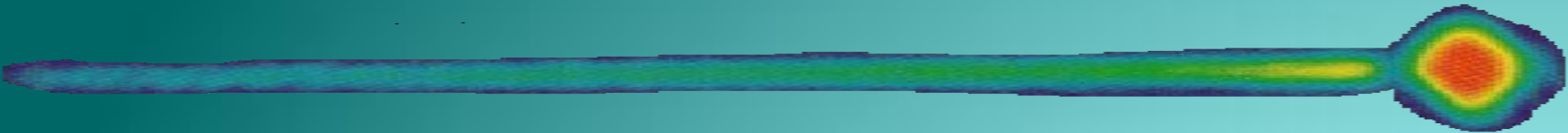


„Tiefe Löcher“ sind Abteufungen in die Erde.

Sie können tangential zur Erdoberfläche gebohrt werden – meist sind es hier Tunnel, die zwei Portale ins Freie aufweisen.

Lochbohrungen schräg in die Erde oder geradewegs auf den Erdmittelpunkt zu, aber auch Abteufungen, die einer Kurve folgen, haben nur ein Portal ins Freie.

# Wie sind „tiefe Löcher“?



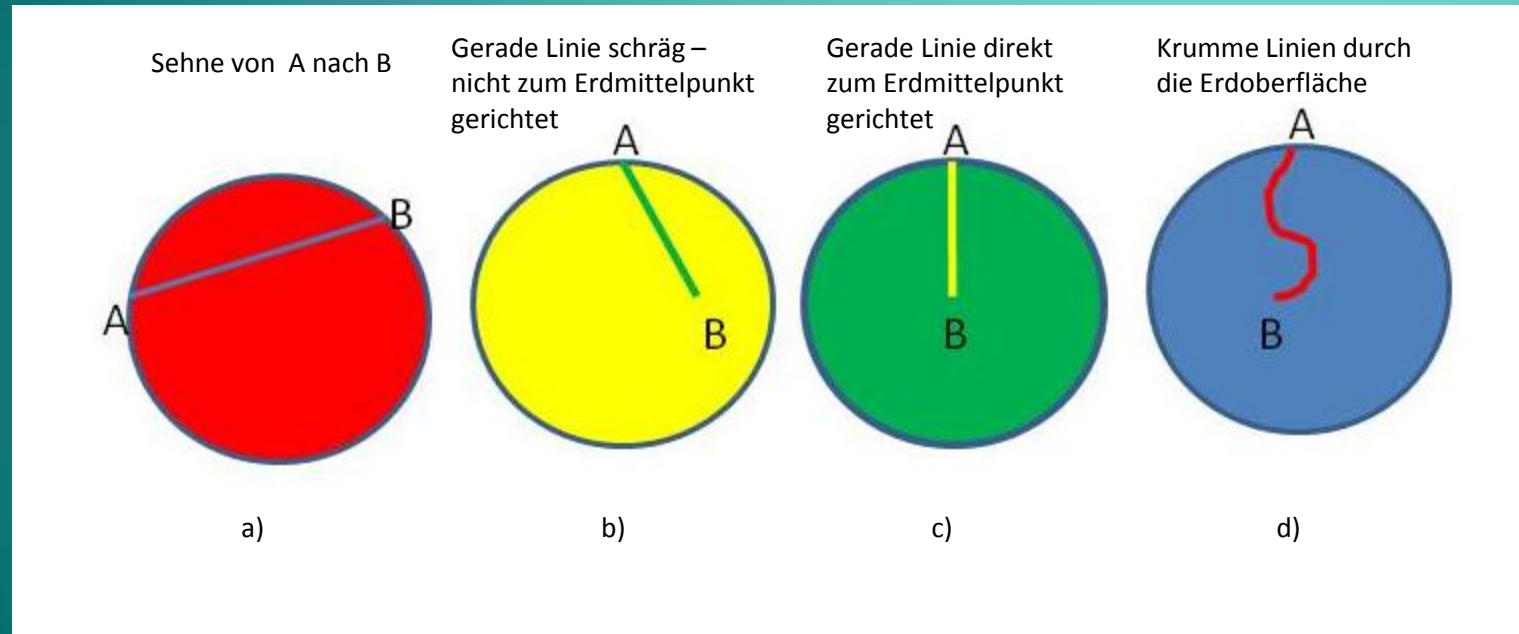
Differentialgeometrisch beschrieben sind sie geometrische Gebilde – in unserem Fall:

„Eine Kugel mit einem zylindrischen Loch“

Es gibt vier Möglichkeiten...



# Problemkreis Differentialgeometrie





# Differentialgeometrischer Ansatz

Um in diesem Gebilde (Loch) z.B. Abstände zu messen, verwendet man problemangepasst die Zylindergeometrie, d.h. alle krummlinigen Kurven oder krummen Flächen sind mathematisch behandelbar.

- Krümmung → Krümmungsradius – Krümmungstensor
- Parallelverschiebung von Kurven und Oberflächen
- Wechsel von einem Koordinatensystem in ein anderes, z.B. von Zylinderkoordinaten zu Polarkoordinaten.

# Differentialgeometrische Lösung

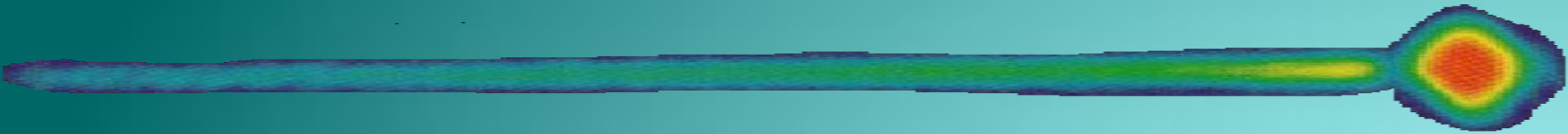


Differentialgeometrie beschreibt exakt unser zylinderförmiges Loch mit allen seinen geometrischen Eigenschaften.

→ Die geometrischen Eigenschaften des zylinderförmigen Loches fließen in ein physikalisches Simulationsmodell als Anfangs-, Rand- und Gebietsbedingungen ein.

# Krumme Wege durch die Erde

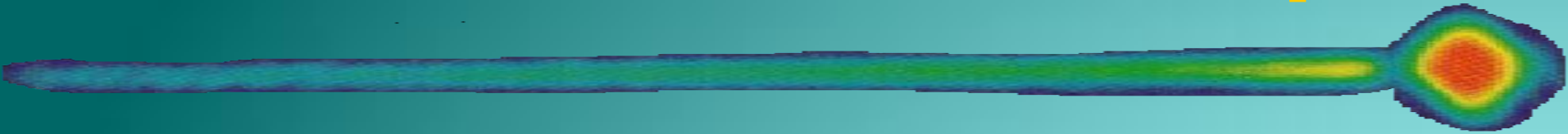
## Bahnen im Schwerfeld einer homogenen Massenverteilung



- Klassisch ist, dass unsere Eisenbahnen geradlinig, d.h. entlang von Sehnen durch die Erdkugel fahren.
  - Verläuft ein Schacht nicht genau in Richtung Erdmittelpunkt, zieht es einen Körper darin mit verminderter Kraft gegen die innere Schachtwand an.
- ➔ Die Erde hat im Inneren ein Kraftfeld, aufgebaut durch einen „kugelsymmetrischen harmonischen Oszillator“.

# Krumme Wege durch die Erde

## Zum Erdmittelpunkt



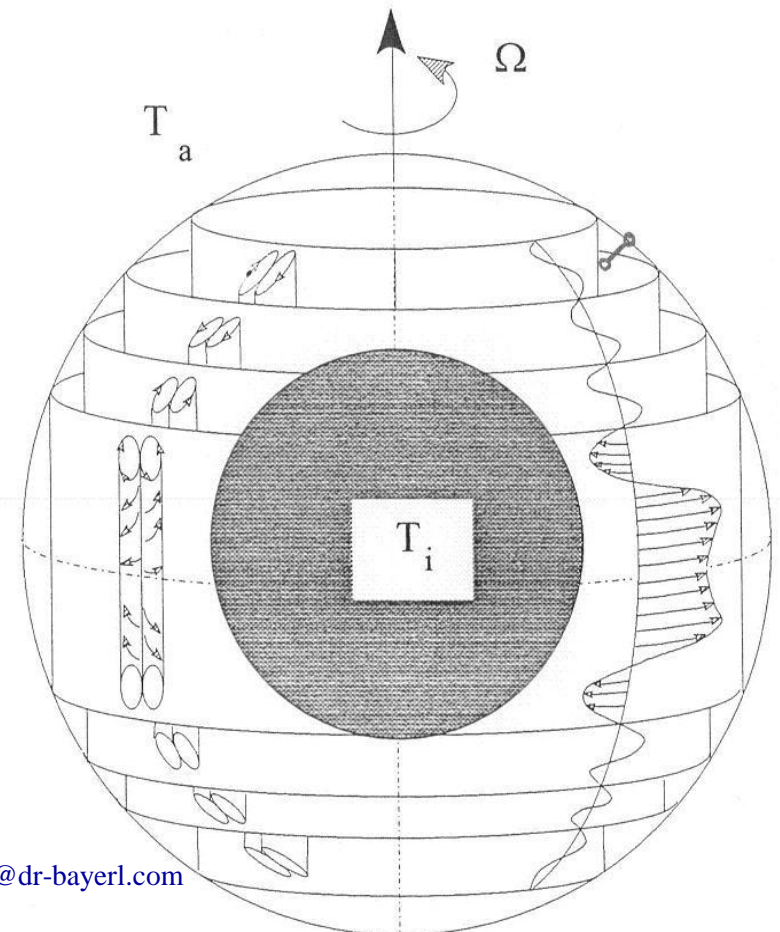
Jede Kraft ist auf den Erdmittelpunkt gerichtet und proportional zur Entfernung von demselben.

- Das reale Schwerefeld hat keine homogene Massenverteilung – diese gilt nur für kleine Raumbereiche – also für unser „Loch“.
- Das „tiefe Loch“ kann nur in der Erdkruste gebohrt werden – maximal 30 km bis 40 km tief = Mohorovicic'sche Diskontinuität - 1909

# Dynamik im Erdinneren

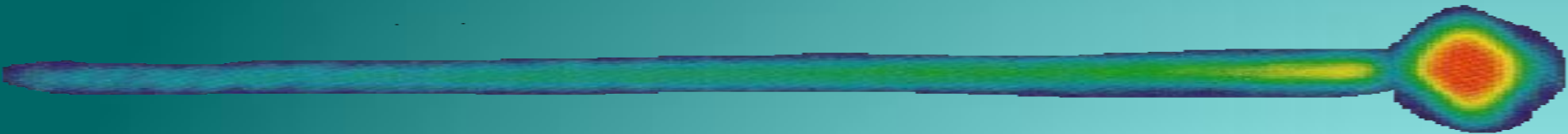
## Schematischer Aufbau der Erde mit einem heißen festen inneren Kern und einem kalten festen äußeren Kern

- Die Konvektionsrollen links werden durch die Erdrotation in Richtung der Rotationsachsen ausgerichtet.
- Das Strömungsmuster erzeugt das Erdmagnetfeld.
- Das Geschwindigkeitsprofil rechts beschreibt die relative Driftbewegung der Walzen gegeneinander



Dr. Manfred Bayerl - [bftu-bo@dr-bayerl.com](mailto:bftu-bo@dr-bayerl.com)

# Inneres und äußeres Magnetfeld

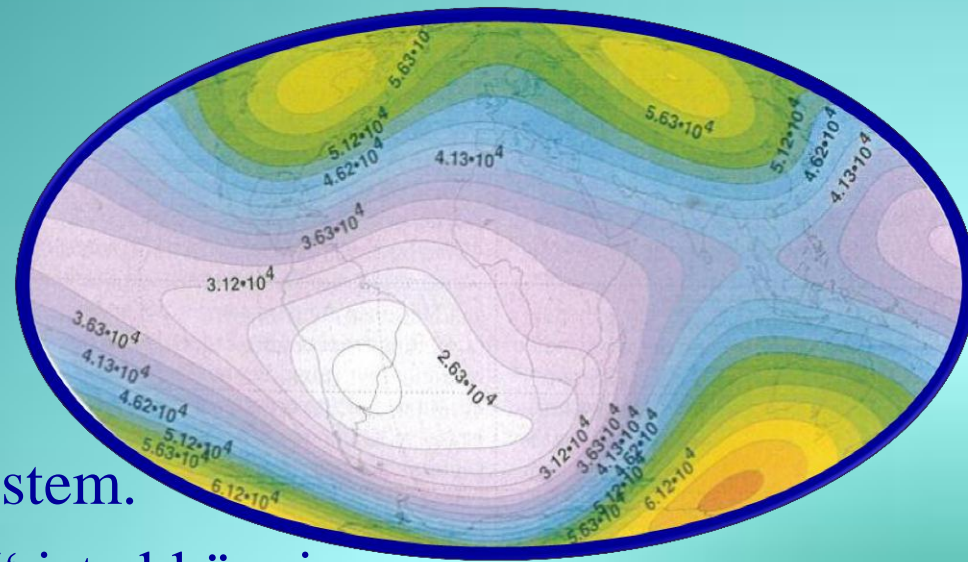


- Beschreibung durch die
- Maxwellgleichungen
  - Navier-Stokes'sche Gleichung

in einem rotierenden Bezugssystem.

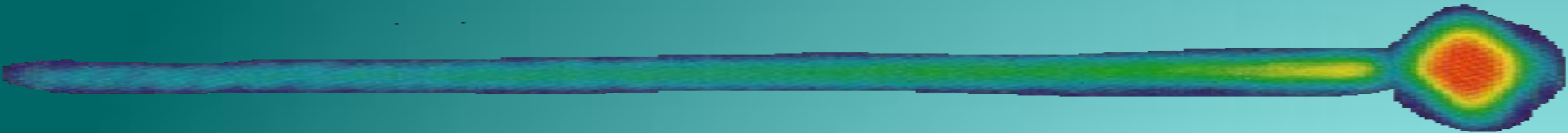
Das äußere „magnetische Feld“ ist abhängig vom 11- Jahres-Zyklus der Sonne (Protuberanzen)

→ Leitfähigkeitsverteilung der Oberfläche im Loch





# Aero- und Thermodynamik im „tiefen Loch“

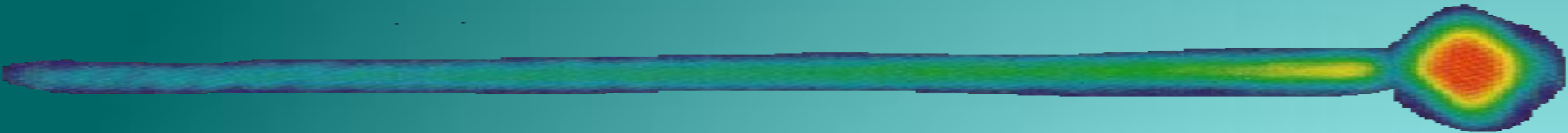


Warum Aero- und Thermodynamik des „tiefen Loches“ schon im Vorfeld?

- ❖ Planung der klimatischen Bedingungen für spätere Nutzung
- ❖ Planung der Energiegewinnung und bestmöglichen Nutzung der natürlichen energetischen Ressourcen im „tiefen Loch“
- ➔ Jedes „tiefe Loch“ hat seine eigenen aero- und thermodynamischen Verhältnisse.



# Aero- und Thermodynamik Simulation als multiaktives Werkzeug



Eine Simulation ist sinnvoll

- als Werkzeug für die Beschreibung verschiedener physikalischer Phänomene
- für die Prognose und die Nachweise der Realität ohne experimentelle Versuche
- für die Durchführung von Optimierungsaufgaben

# Aero- und Thermodynamik

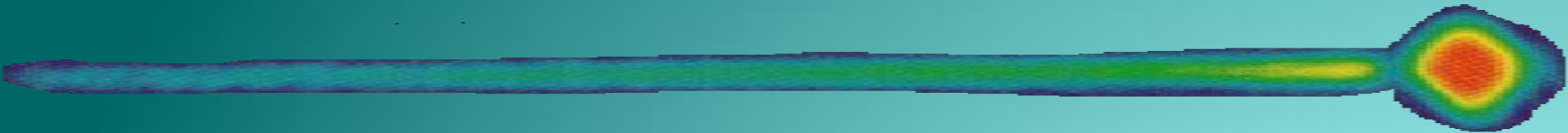
## Modellerstellung



- Definition des physikalischen Problems
- Wahl der Dimension (1-, 2- oder 3-dimensional)
- Erstellung der Geometrie (Zylinder, Kugel-, kartesische Koordinaten oder Mischsysteme)
- Erstellen der Materialparameter
- Anfangs-, Rand- und Gebietsbedingungen
- Vernetzung – Wahl des problemangepassten optimalen Netzes

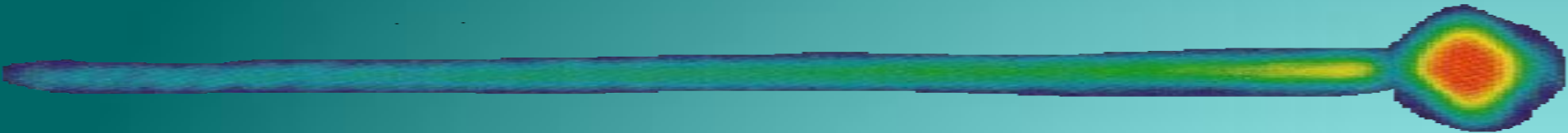
# Aero- und Thermodynamik

## Modellberechnung

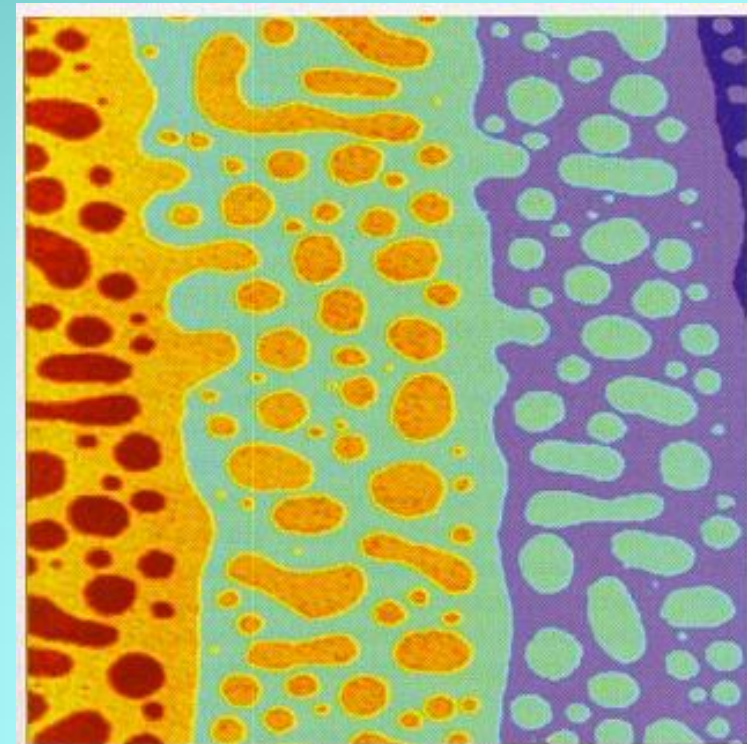


- Lösung und Lösungsmannigfaltigkeit
  - Auswertung der Ergebnisse
- 
- ➔ Änderung des physikalischen Modelldesigns
  - ➔ Variation der Anfangs- und Randparameter
  - ➔ Variation des Eingangsbereichs
  - ➔ Variation der Fragestellungen und Szenarien

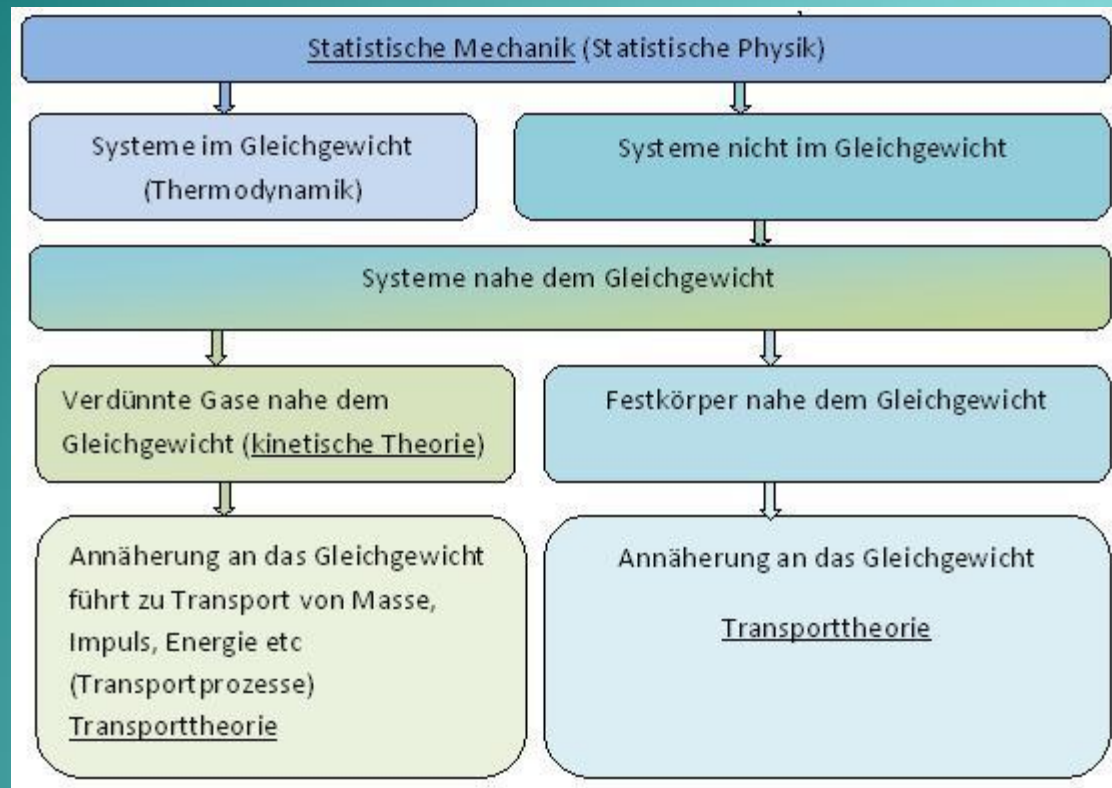
# Unterschiedliche Diffusionsbedingungen



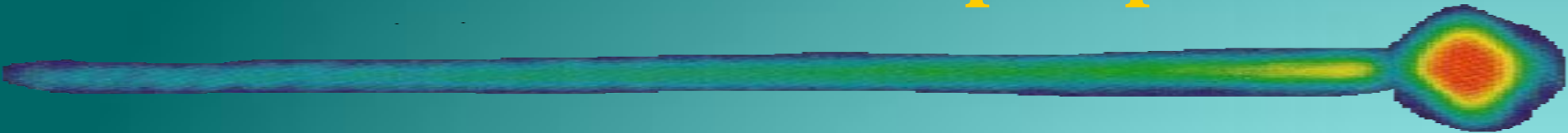
- Diffusion vom Rand in das Loch
- Unterschiedliche Temperatur- und Druckfelder bedingen zeitabhängig die Mikrometeorologie.
- Die Zähigkeit der Luft nach unten nimmt zu und ist nur mehr schwach kompressibel.



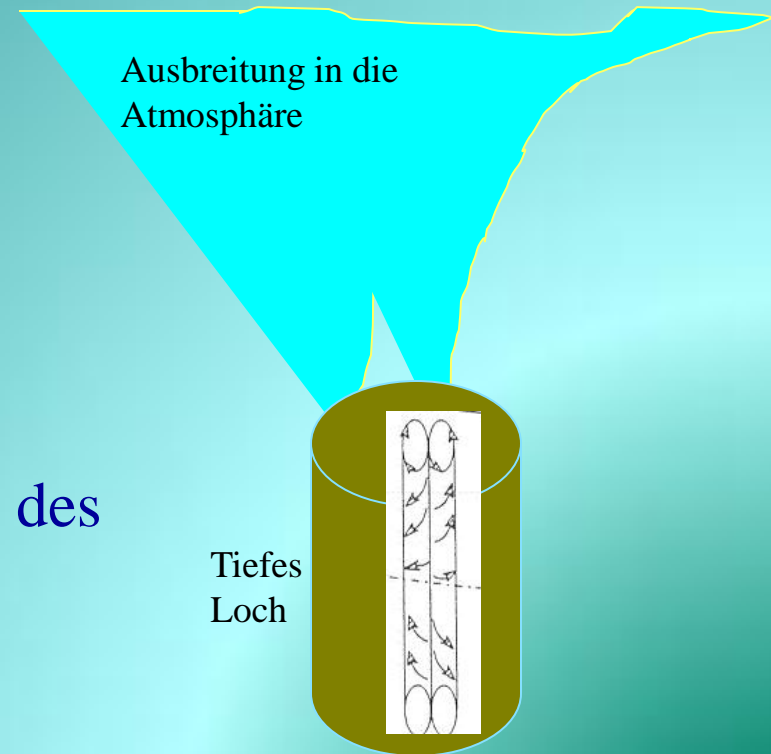
# Transportprozesse



# Transportprozesse

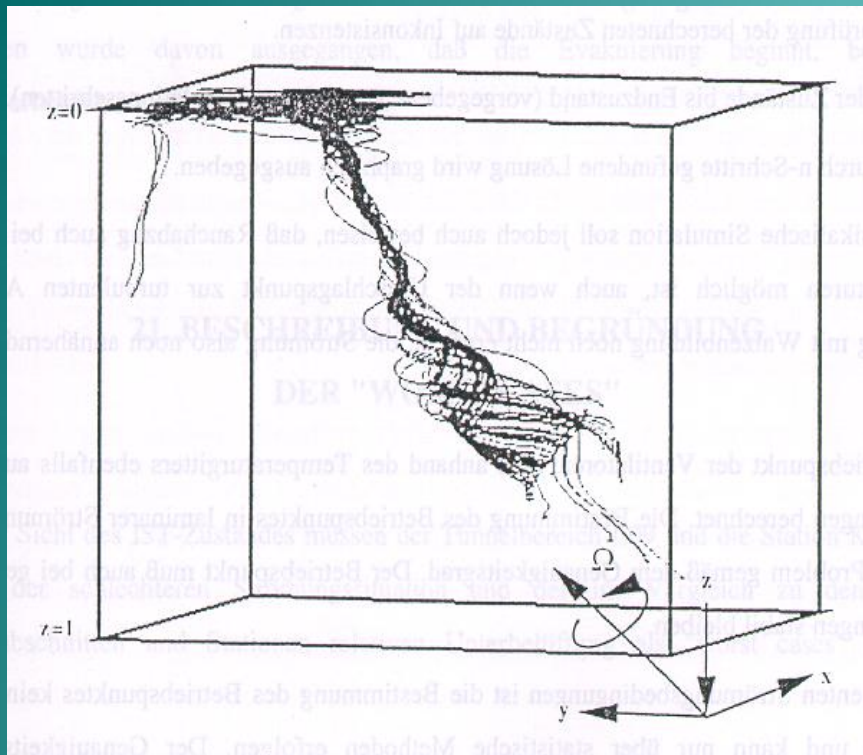
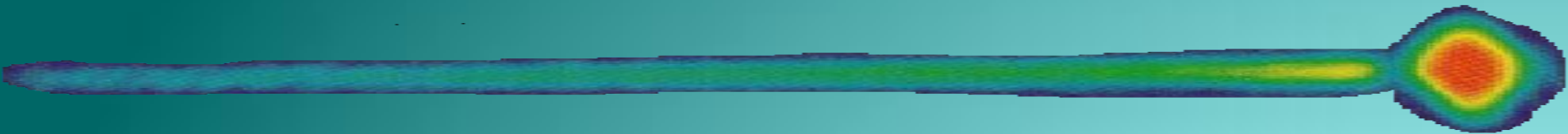


- Systeme im Nichtgleichgewicht
- Ausbreitung in die freie Atmosphäre.
- ➔ Abhängig von dem Standort (Nord-Südhalbkugel)
- ➔ Abhängig von der Mikrometeorologie des Standortes

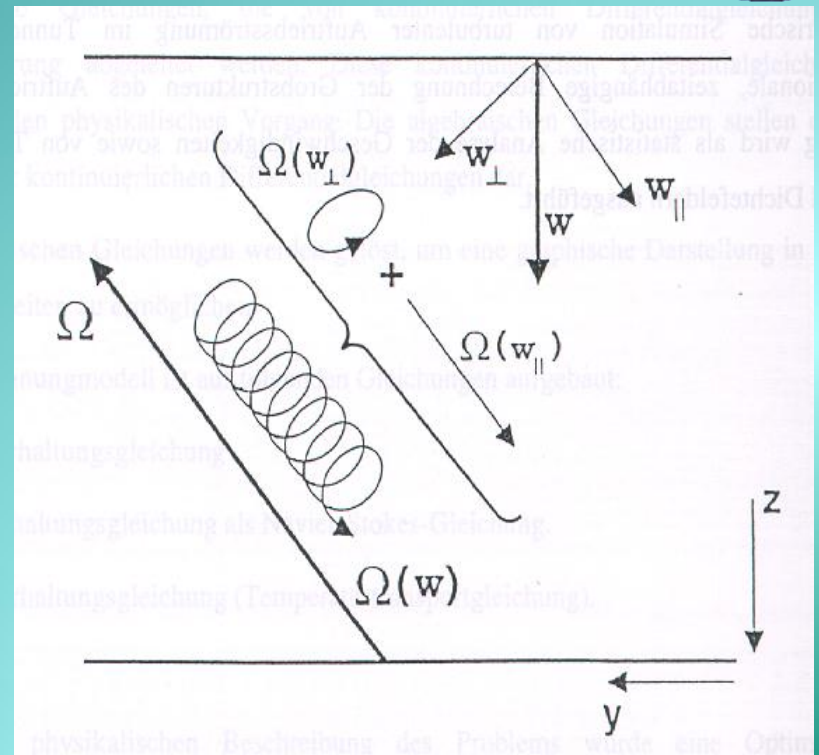




# Auftrieb im „tiefen Loch“ ein Modell



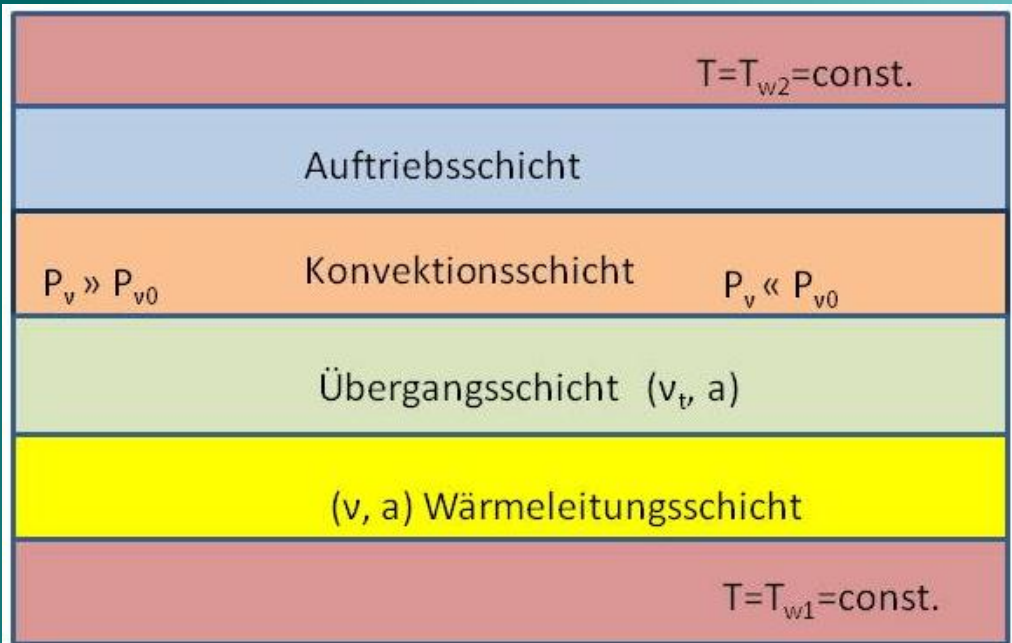
Auftrieb heißer Gase



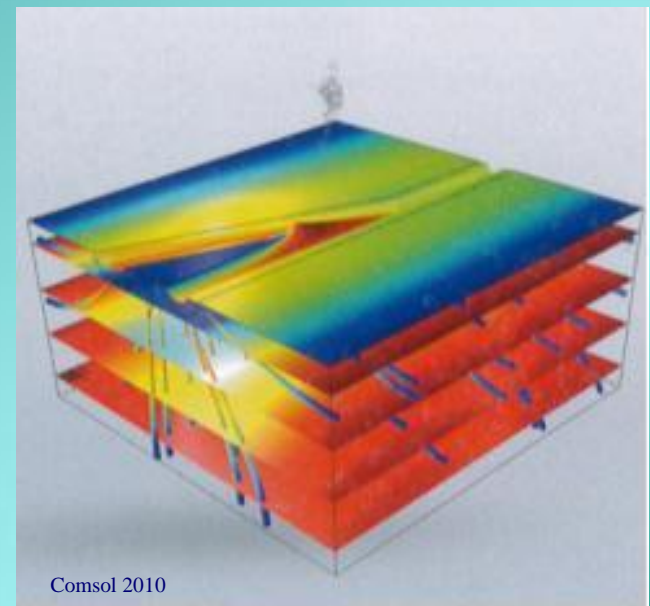
physikalisches Ersatzmodell



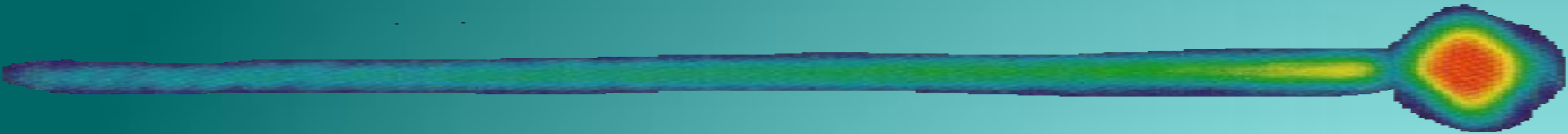
# Nutzen der Auftriebsströmung im „tiefen Loch“



4-Schichtmodell und Transportmechanismen in turbulenter Naturkonvektion



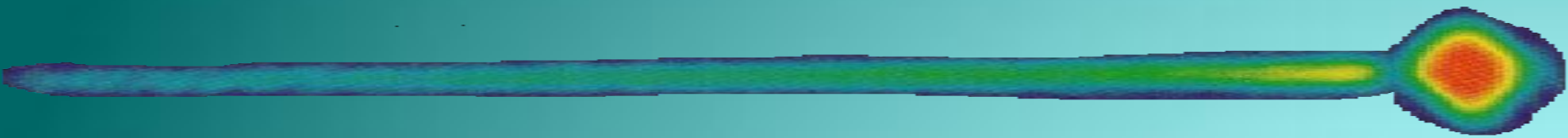
# Energiegewinnung



Systemimmanente Aero- und Thermodynamik eines „tiefen Loches“ führt zu:

- Strömung – Turbinen und Generatoren können betrieben werden
- Wärmetransport – Abwärme aus dem Inneren als Fernwärme für umgebendes Gebiet
- Klimatisierung des Innenraumes für menschliches Leben und Arbeiten im tiefen Loch.

# Erforderliche Bedingungen zum Leben und Arbeiten in einem tiefen Loch



## Mikrometeorologische Parameter

Luftdichte

Temperaturen 20°C bis 30 °C

Relative Feuchten 50 % bis 60 %

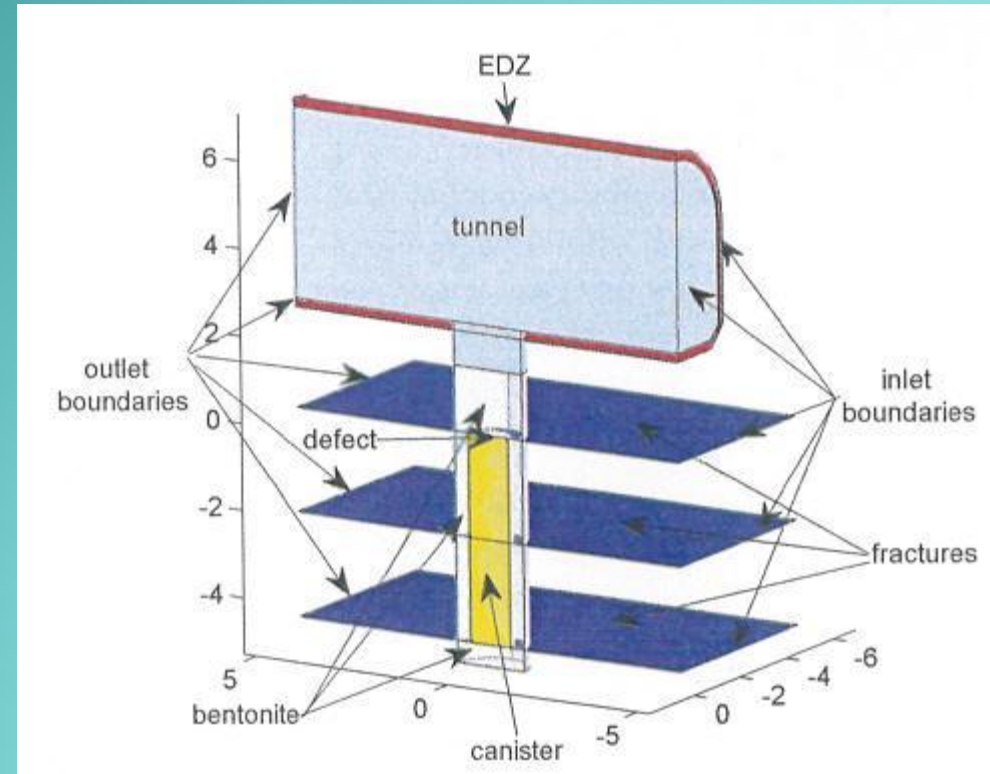
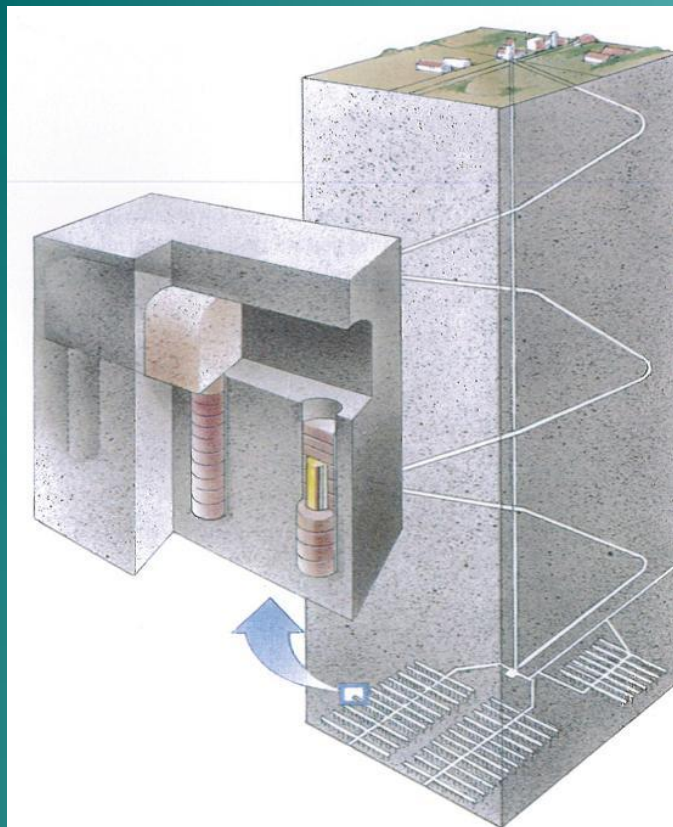
Barometrischer Druck 1000 hPa bis 1013,25 hPa

Windstärke und Windrichtung

Böenhäufigkeit und maximale Böenstärke (Scherwinde von oben)

# Ein breites Aufgabenfeld für die physikalische Simulation

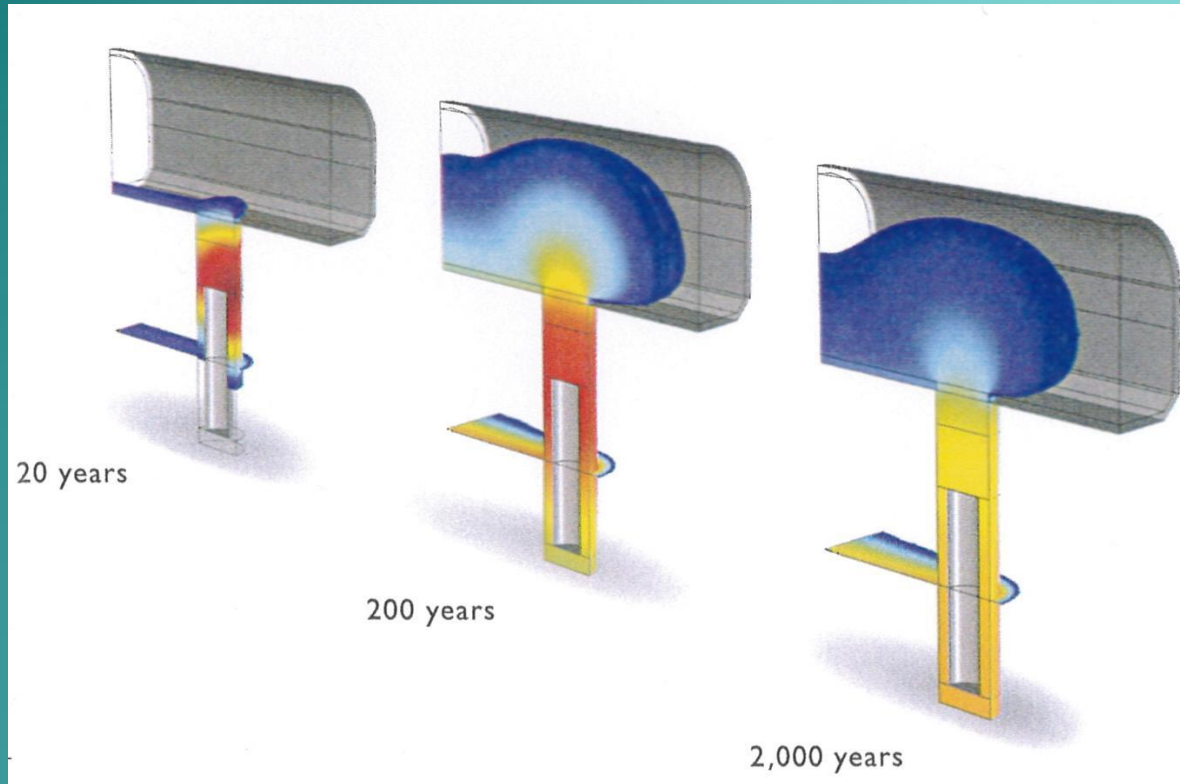
## Beispiel Lagerung hochradioaktiven Abfalls



Dr. Manfred Bayerl - [bftu-bo@dr-bayerl.com](mailto:bftu-bo@dr-bayerl.com)

# Ein breites Aufgabenfeld für die physikalische Simulation

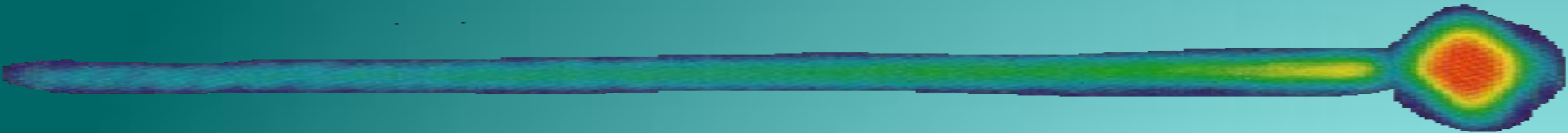
## Beispiel Lagerung hochradioaktiven Abfalls



Dr. Manfred Bayerl - [bftu-bo@dr-bayerl.com](mailto:bftu-bo@dr-bayerl.com)



# Fragen an das aero- und thermodynamische Modell



Im physikalischen Modell werden mehrere Fälle betrachtet:

- Das „tiefe Loch“ allein – ohne Nutzung, ohne Risiko, ohne Mehrwertnutzen (Energiegewinnung)
- Das „tiefe Loch“ für eine bestimmte Nutzungsart (z.B. Lagerung von radioaktiven Abfällen)
- Das „tiefe Loch“ mit einem bestimmten Risiko (Risiko wird durch die Nutzung in das Loch eingebracht)
- Das „tiefe Loch“ als Lieferant von Wärme und Energie
- Das „tiefe Loch“ mit bestimmter Nutzungsart, bestimmtem Risiko und bestimmtem Mehrwertnutzen

# Interdisziplinäre, integrative Zusammenarbeit

