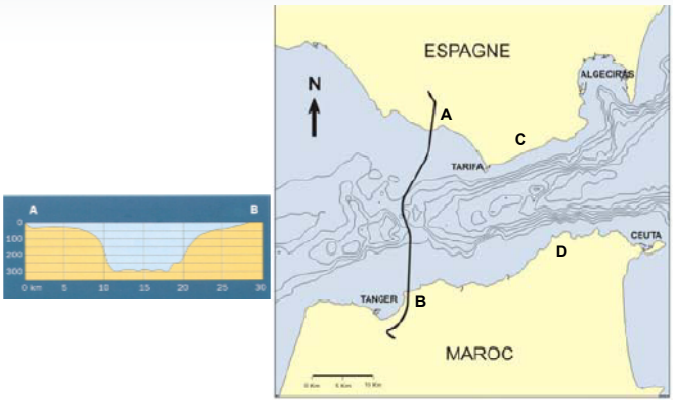
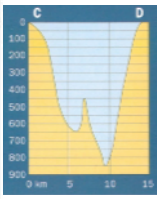
GIBRALTAR TUNNEL
Herausforderungen bei der Planung eines Tunnels an der Grenze der Machbarkeit





ETH Zürich
07 May 2009

Andrea Panciera

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

1. TEIL

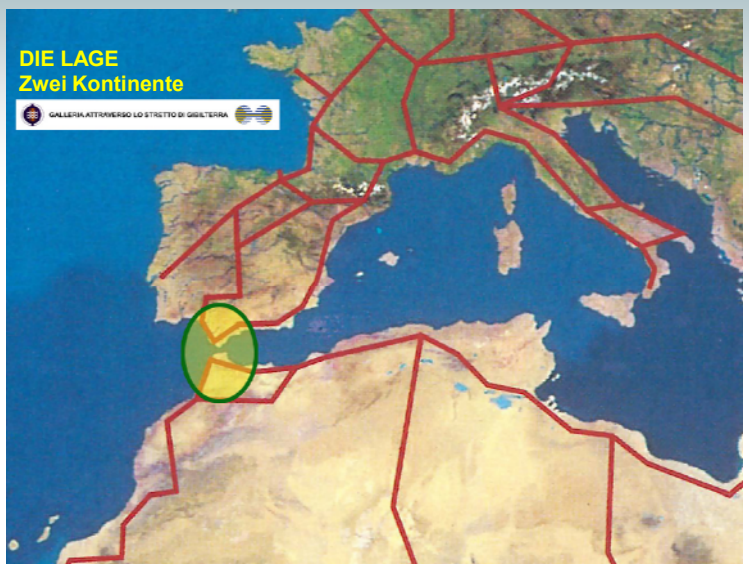
- ✓ **DAS PROJEKT (seit seinem Beginn bis heute)**

2. TEIL

- ✓ **GEOMECHANIK**
- ✓ **SCHLUSSFOLGERUNGEN**

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 3

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

DIE BAUHERREN

sned

Société Nationale
d'Etude du Détroit

Morocco

SECEG

Sociedad Española de estudios
para la Comunication fija a través
del Estrecho de Gibraltar
Spain

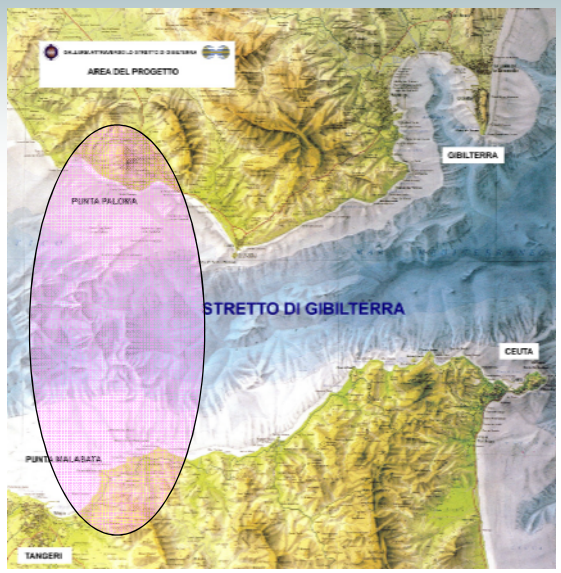
LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 4

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

DER TUNNEL

Vorprojekt schon im 1996



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 5

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Die Geologie

Das Flysch

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 6

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Die Geologie

Das Flysch

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 7

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Die Geologie

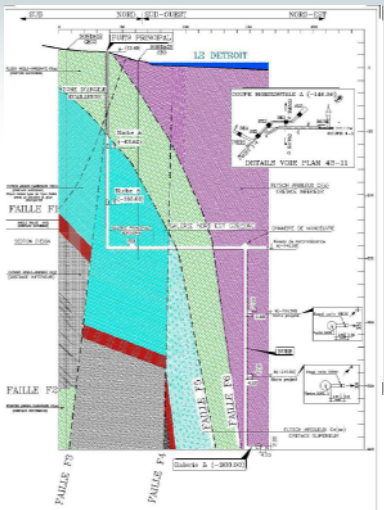
Mehr oder weniger tektonisierte Zonen

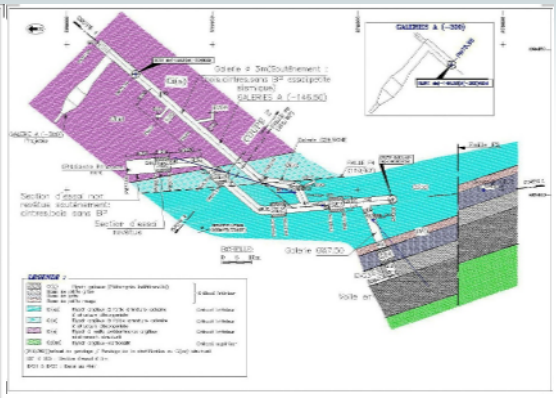
LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 8

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

DAS MALABATA SCHACHTSYSTEM





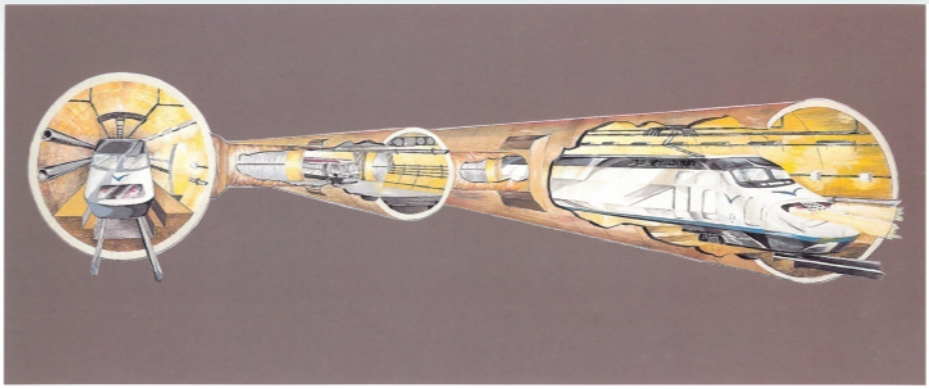
Und
Versuchsschacht in Bolonia, 80 m Tiefe, 4 m Durchmesser
TBM Versuchstollen Tarifa, 500 m lang, 3.5 m Durchmesser

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 9

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

DER TUNNELQUERSCHNITT



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

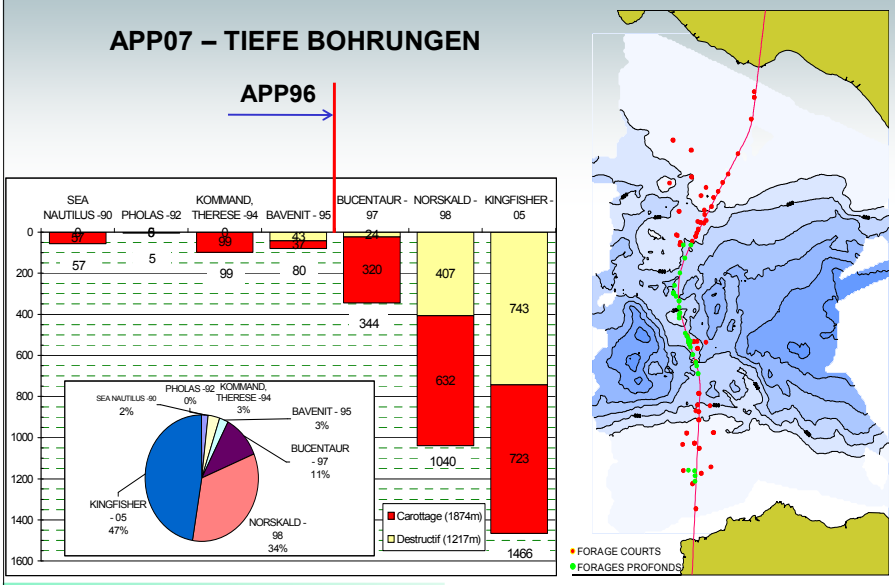
07.05.2009 - 10

APP07

Warum ?

Bucentaur	**1997**
Norskald	**1998**
Kingfisher	**2005**

APP07 – TIEFE BOHRUNGEN



FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR

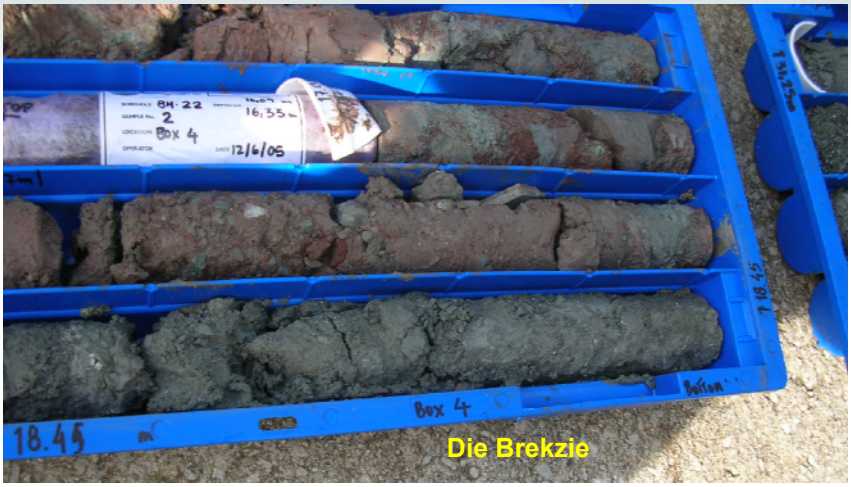
Lumachellenkalk und darausergebender Sand

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 13

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR



Die Brekzie

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 14

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 15

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 16

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 17

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

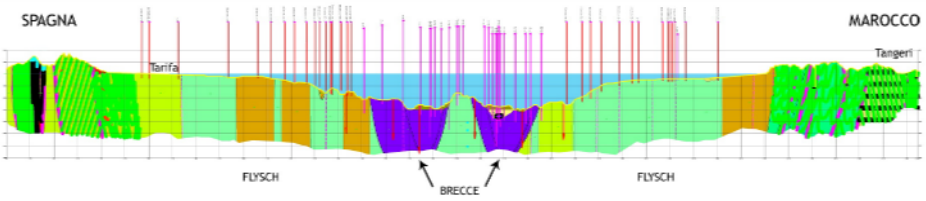
APP07 – DIE GRÜNDE DAFÜR

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 18

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE GEOLOGIE

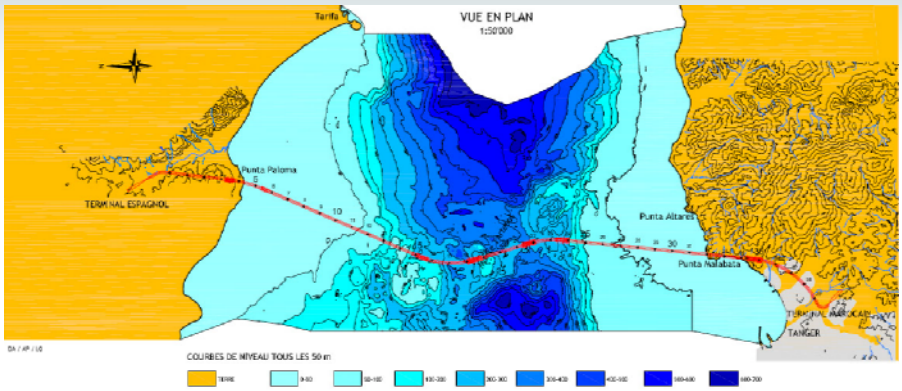


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 19

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE LINIENFÜHRUNG



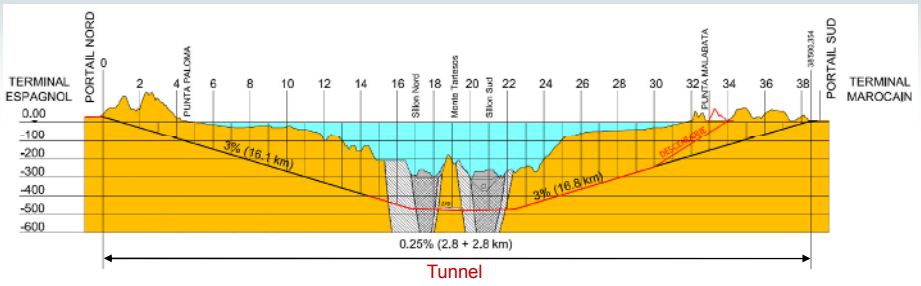
Die Lage der tiefen Bohrungen ist für das Projekt schädlich

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 20

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE LINIENFÜHRUNG



Vortrieb im Sand ist ausgeschlossen
→ Tiefer Tunnel um einen minimalen hydraulischen Gradient von 5 zu sichern

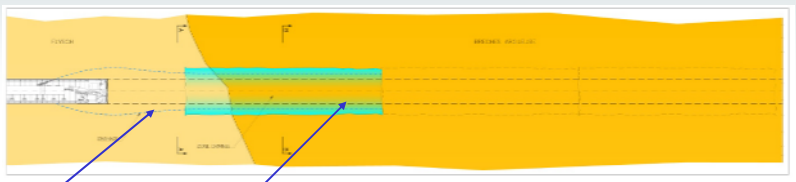
Tunnellänge	**38.5 Km**
Unterwasserstrecke	**27 Km**
Landstrecken	**4.4 und 6.7 Km**
Max. Tiefe (ugf.)	**475 m**
Gefälle	**30‰ (2.5‰ im zentralen Bereich)**

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 21

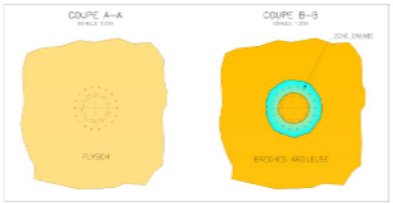
FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

APP07 – DIE BAUMETHODE



GEZIELTE DRAINAGEBOHRUNGEN

DRAINIERTE ZONE



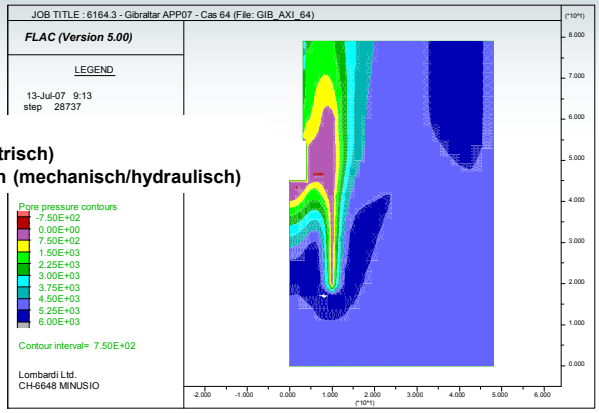
Zahlreiche besondere Lösungen:
- Formgebung des Schildes
- Arbeitsdruck im Kopfkammer
- Gezielte Bohrungen
- Nicht-sprengende Ausstattung

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 22

2. TEIL

- ✓ **GEOMECHANIK**
  - **Annahmen**
  - **3D (rotationssymmetrisch)**
  - **Gekoppelte Analysen (mechanisch/hydraulisch)**



APP07 – ANNAHMEN FÜR DIE GEOMECHANISCHE ANALYSE

MASSGEBENDE BEDINGUNGEN LÄNGS DES TUNNELS
- ✓ **Am tiefsten Punkt der Trasse, -500 m**
- ✓ **An der höchsten Meerestiefe, -300 m**

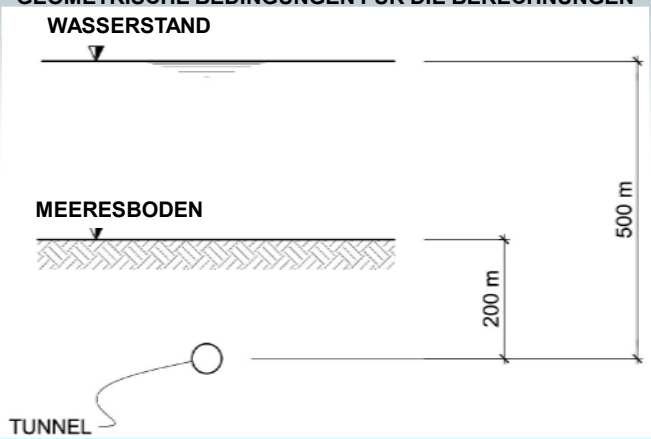
VENTILATIONS- ERKUNDUNGSTUNNEL sowie BETRIEBS- SICHERHEITSTUNNEL
- ✓ **Interner Durchmesser 6 m**
- ✓ **Ausbruchsquerschnitt Durchmesser 8 m**
- ✓ **Vollständig wasserdichtes Innengewölbe**

BETRACHTETE FELSTYPEN
- ✓ **FLYSCH, Class IV**
- ✓ **BREKZIE, Class VI**
- ✓ **Empfindlichkeitsanalyse**
- ✓ **Effekt der Klassenänderung von der Klasse I bis VI**

HYDRAULISCHE BEDINGUNGEN
- ✓ **In drainiertem und nicht-drainiertem Zustand**

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

GEOMETRISCHE BEDINGUNGEN FÜR DIE BERECHNUNGEN



Die traditionelle Berechnungsmethode in totalen Spannungen genügt nicht um diese Bedingungen zu modellieren.
Die Berechnungen sollen unter Berücksichtigung der effektiven Spannungen und des Wasserdruckes durchgeführt werden.

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 25

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

FLYSCH IV – GRUNDSÄTZLICHE EIGENSCHAFTEN

- ✓ γ_{sat} = 21.7 kN/m^3
- ✓ E = 1000 MPa
- ✓ c = 220 kPa
- ✓ ϕ = 22°
- ✓ k = 1·E^{-10} m/s
- ✓ n = 0.336
- ✓ Vortriebsgeschwindigkeit = 3 m/Tag
- ✓ Druck an der Ortsbrust = 1 MPa
- ✓ L_{Schild} = 10 m
- ✓ $C_{max.,zulässig}$ = 40 cm

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 26

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

BREKZIE – GRUNDSÄTZLICHE EIGENSCHAFTEN

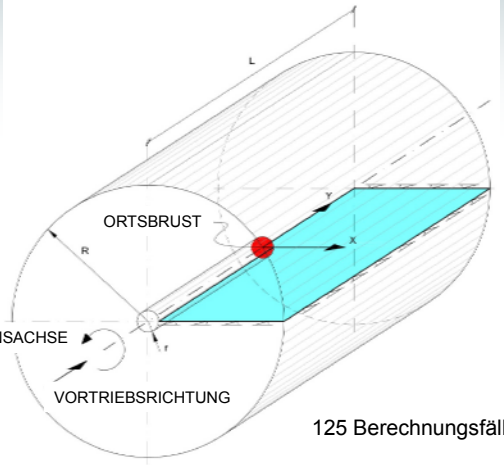
- ✓ γ_{sat} = 21.7 kN/m^3
- ✓ E = 200 MPa
- ✓ c = 150-100 kPa
- ✓ ϕ = 24°-17°
- ✓ k = 1·E^{-10} m/s
- ✓ ε_{pl} = 10 %
- ✓ n = 0.336
- ✓ Vortriebsgeschwindigkeit = 3 m/Tag
- ✓ Druck an der Ortsbrust = 1 MPa
- ✓ L_{Schild} = 10 m
- ✓ $C_{max.,zulässig}$ = 40 cm

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 27

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

3D BERECHNUNGEN MIT ROTATIONS-SYMMETRISCHEM MODELL



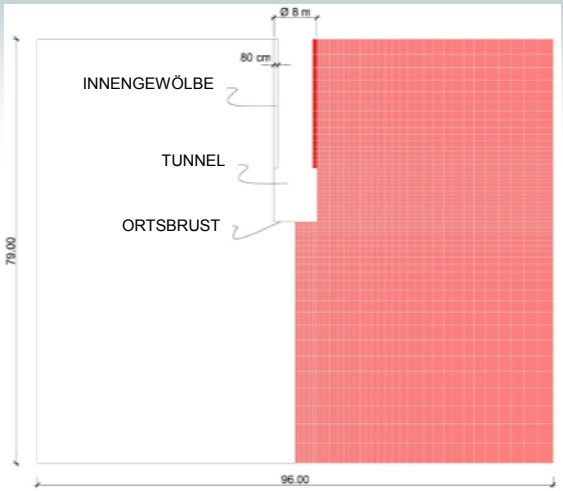
125 Berechnungsfälle wurden erzeugt

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 28

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

ROTATIONS-SYMMETRISCHES MODELL



2 Beispiele

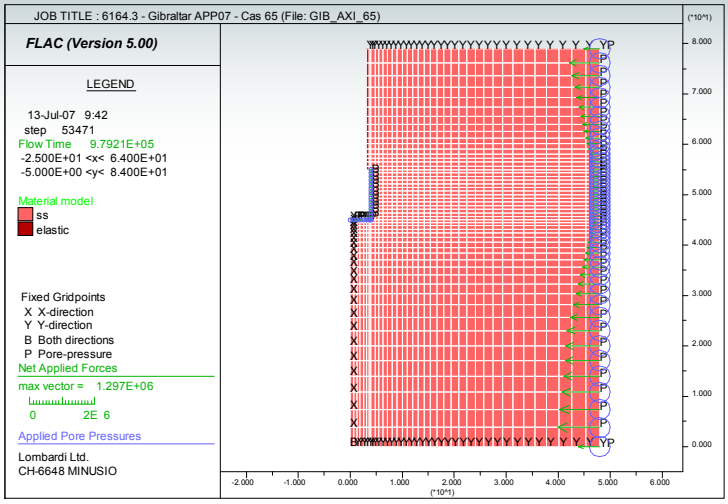
Brekzie, v = 3 m/j, k = 10^{-10} m/s, ohne Drainage
Brekzie, v = 3 m/j, k = 10^{-10} m/s, mit Drainage

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 29

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Brekzie, v = 3 m/j, k = 10^{-10} m/s, ohne Drainage

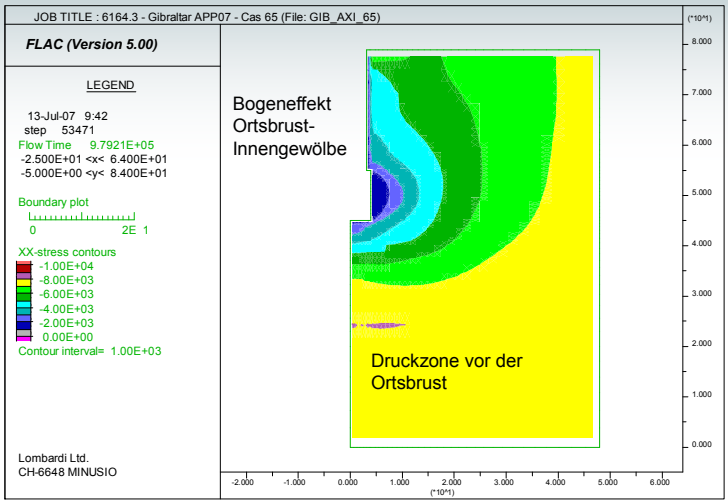


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 30

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Radiale Spannungen

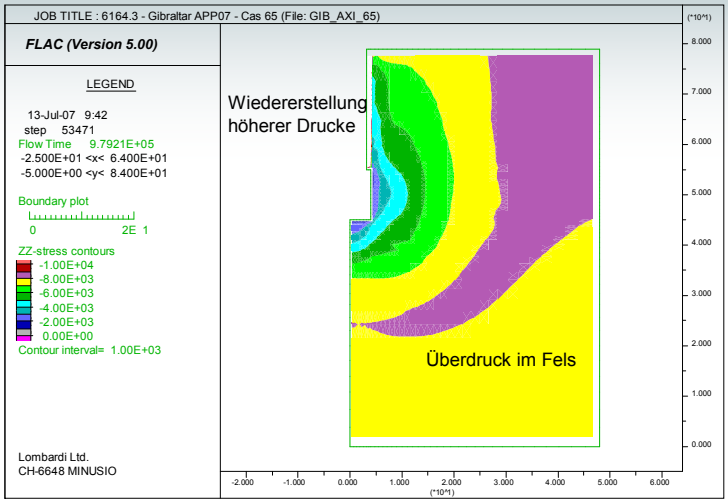


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 31

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Tangentiale Spannungen

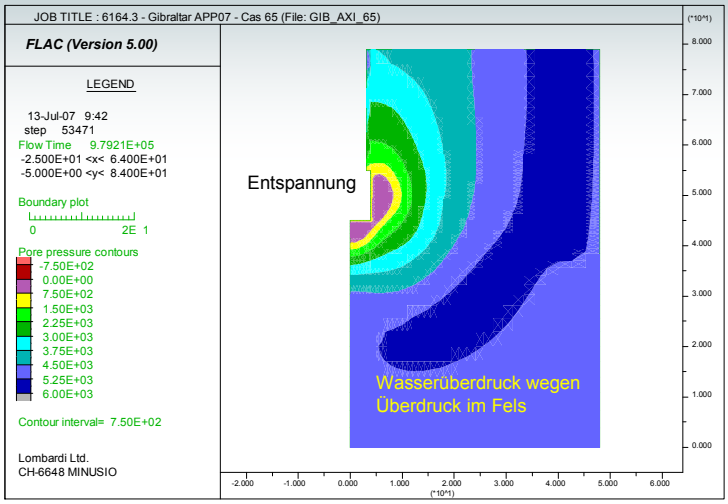


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 32

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Wasserdruck

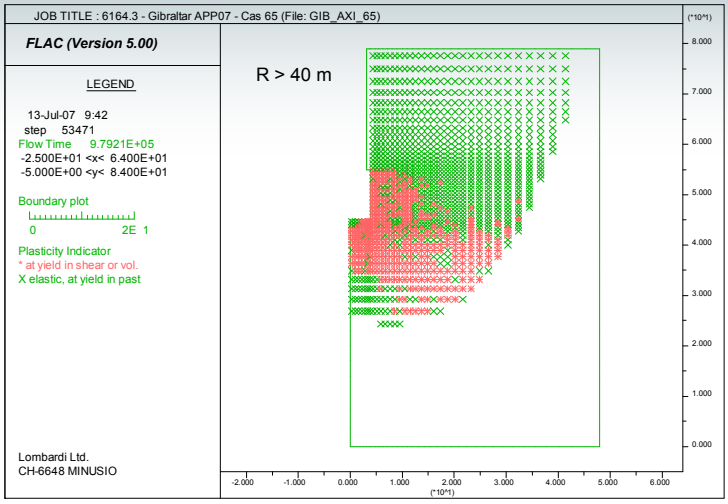


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 33

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Plastische Zone

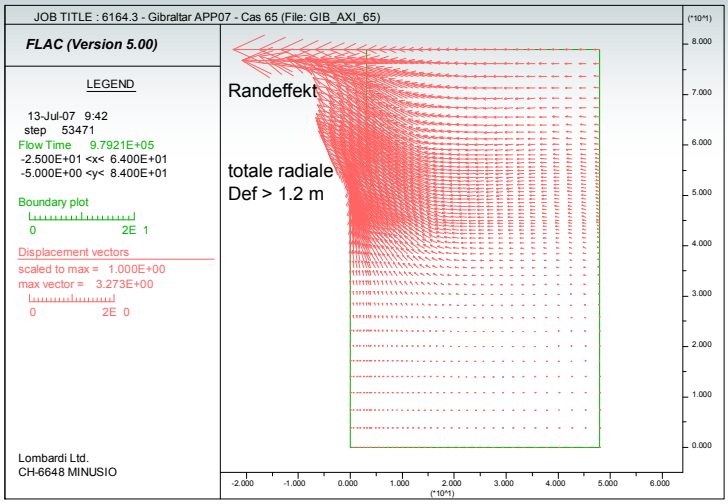


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 34

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Vektorielle Deformationen

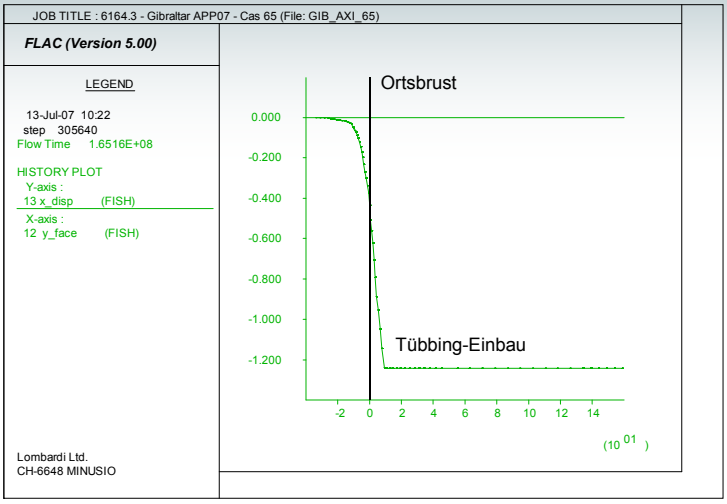


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 35

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

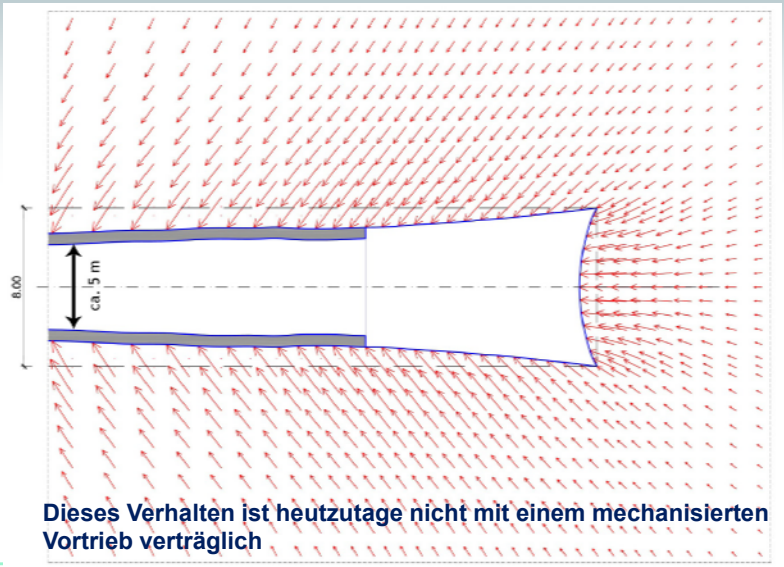
Konvergenzen des Ausbruchsrandes längs der Tunnelachse



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 36

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR



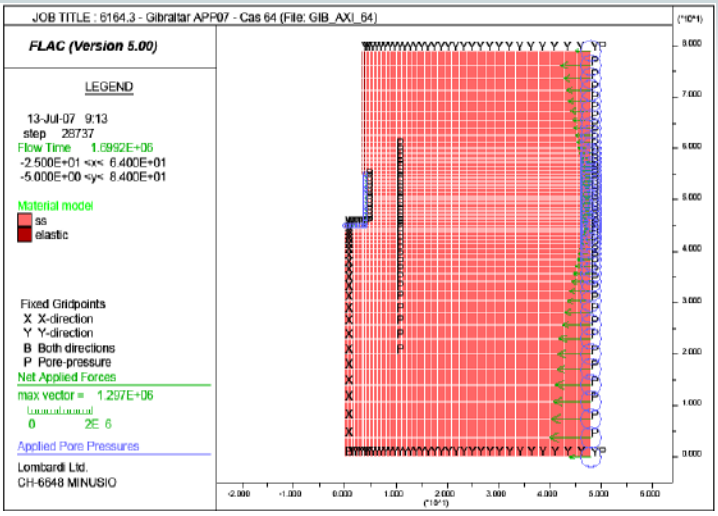
Dieses Verhalten ist heutzutage nicht mit einem mechanisierten Vortrieb verträglich

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 37

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Brekzie, v = 3 m/j, k = 10^{-10} m/s, mit Drainage

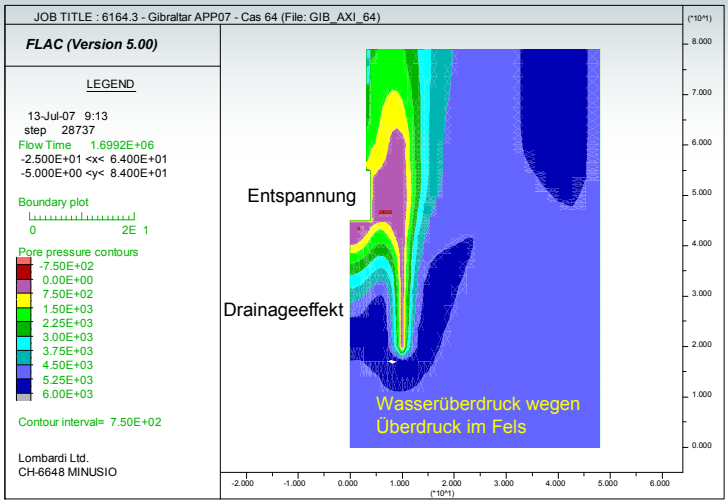


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 38

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Wasserdruck

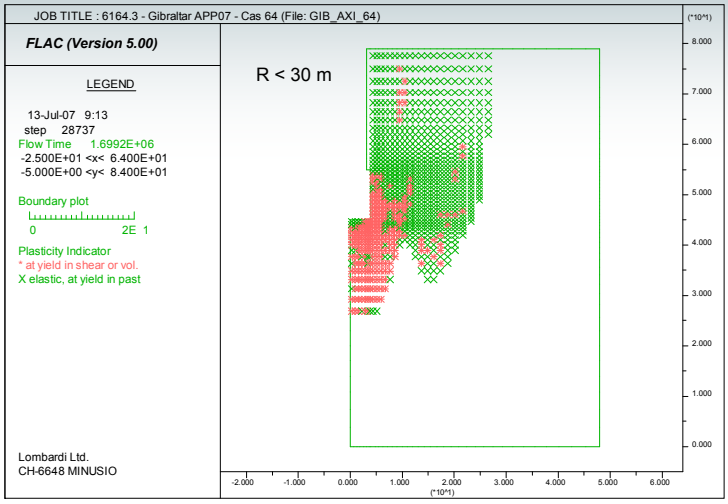


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 39

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

Plastische Zone

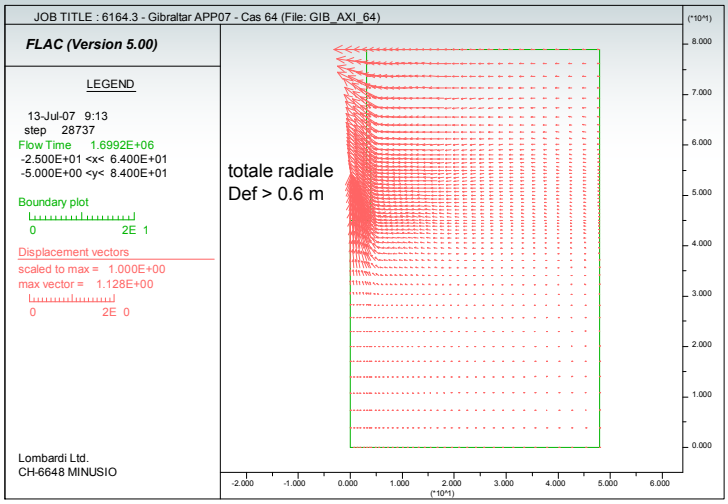


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 40

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

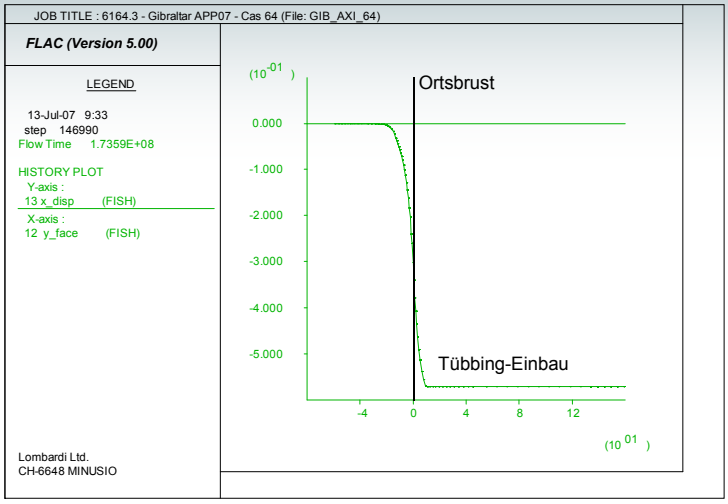
Vektorielle Deformationen



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

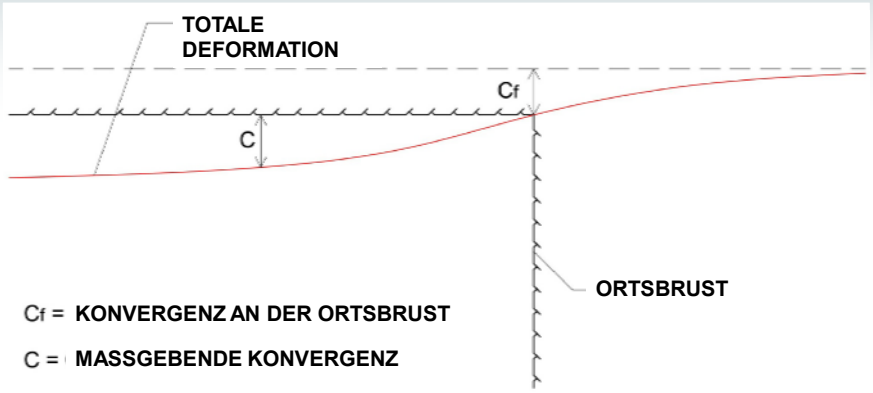
Konvergenzen des Ausbruchsrandes längs der Tunnelachse



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

PARAMETRISCHE STUDIE



Cf = KONVERGENZ AN DER ORTSBRUST

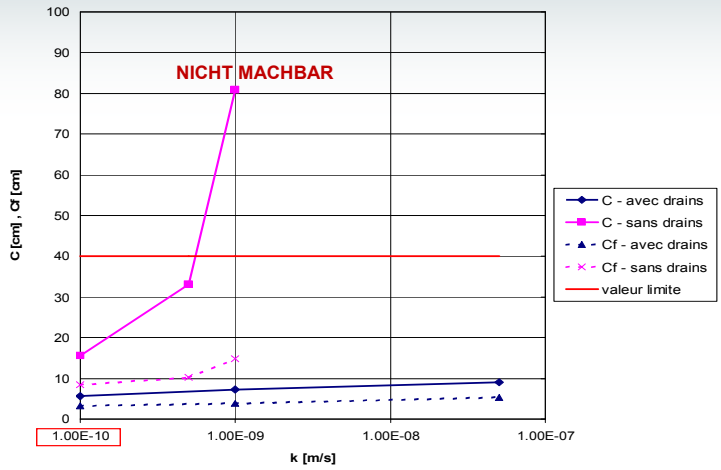
C = MASSGEBENDE KONVERGENZ

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 43

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

FLYSCH IV – EFFEKT DER VARIATION DER DURCHLÄSSIGKEIT

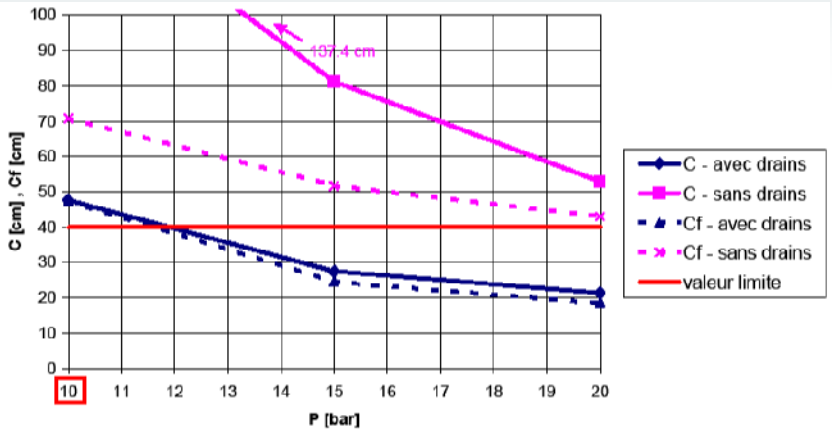


LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 44

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

BREKZIE – EFFEKT DES DRUCKES AN DER ORTSBRUST



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 45

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

RESULTATE UND ANMERKUNGEN

- ✓ **Unter der Bedingung aktiver Drainage, ist der Vortrieb weniger empfindlich auf Durchlässigkeit.**
- ✓ **Beim TBM-Stillstand, das Drainieren ist notwendig.**
- ✓ **Bei einem Druck an der Ortsbrust von knapp 1 MPa (10 Bar), sind die Bedingungen für die Machbarkeit durch die Brekzie sehr fraglich und der Ingenieur sollte sehr vorsichtig sein, einen solchen Tunnel als machbar zu beurteilen. Die Grenzkonvergenz zwischen Brust und Tübbingring ist offenbar erreicht. Das Drainagesystem und eine genügend tiefe Vortriebsgeschwindigkeit scheinen Bedingung zu sein, um die nötigen Konsolidierungen zu erlauben.**
- ✓ **Eine zusätzliche Anforderung scheint die Erhöhung des Druckes an der Ortsbrust aber der angenommene Wert liegt jedoch schon an der Grenzen der heutigen Erfahrung. Bei höherem Druck verbessern sich die Bedingungen um der Brust und der TBM. Diese Anforderung oder Wunsch wird Sache weiterer Entwicklung der TBM-Technik.**

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 46

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

VARIATION DER FELSEIGENSCHAFTEN

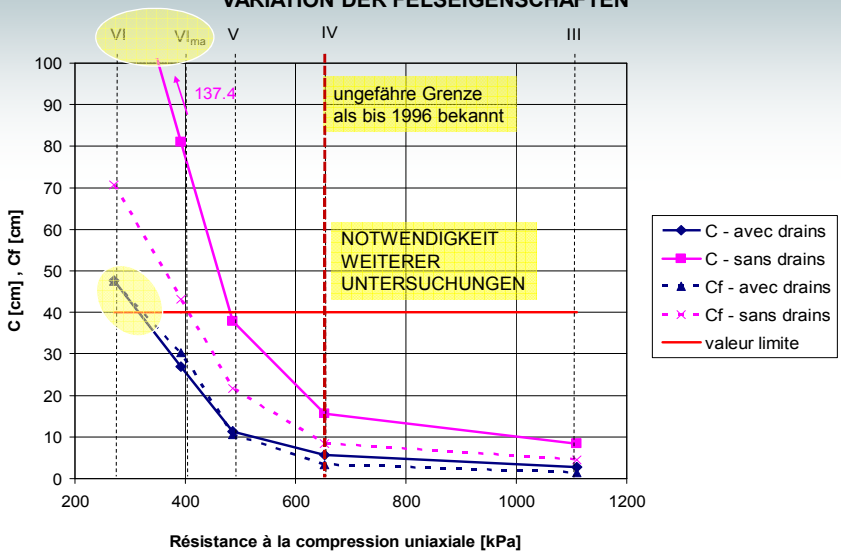
TYPE	ϕ [°]	c [kPa]	E [MPa]
III	27	340	1750
IV	22	220	1000
V	20	170	500
VI_{max}	19	140	300
VI	24 - 17	150 - 100	200

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 47

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

VARIATION DER FELSEIGENSCHAFTEN



LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 48

FESTE VERBINDUNG DURCH DIE MEERENGE VON GIBRALTAR

SCHLUSSBEMERKUNGEN

- ✓ **Langzeitwirkende Lasten**
  - Wasserdruck (5 MPa)
  - Minimaler effektiver Druck
  - Bemerkung: Quellen ist noch nicht im Modell betrachtet
  → Annahme: totaler natürlicher Spannungszustand 7.4 MPa wird berücksichtigt
- ✓ **Die Strömungskräfte sind massgebend für die Stabilität der plastischen Zone während des Vortriebes**
- ✓ **Der Drainageeffekt um die Orstbrust ist wichtig**
  - Reduzierung der Strömungskräfte um den Hohlraum
  - Verbesserung der Stabilitätsverhältnisse
  - Reduzierung der Konvergenzen zwischen Ortsbrust und Tübbingring
- ✓ **Effekt eines Stillstandes der TBM**
  - Risiko von Schildeinklemmen während der Drainageausführung
  - Notwendigkeit eines genügen hohen Druckes an der Ortsbrust.

LOMBARDI AG
BERATENDE INGENIEURE

07.05.2009 - 49