IMPAKTPROZESSE III

SS 13 - WWU MÜNSTER

148790

Mi 08:30-10:00, IG 1, SR E

Alex Deutsch

Institut für Planetologie
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

deutsca@uni-muenster.de

Planetare Krusten
Morphometrie von Impaktkratern
das relative Alter planetarer Oberflächen
Ziel Erde - Kraterproduktionsrate
kosmische Geschwindigkeiten

1. Kosmische Geschwindigkeit

Kreisbahngeschwindigkeit um die Erde vK = 7.91 km s-1

2. Kosmische Geschwindigkeit

Fluchtgeschwindigkeit, die ein Objekt benötigt, um sich unbegrenzt auf einer parabolischen Bahn aus dem Schwerefeld eines Körpers im Sonnensystem zu entfernen.

vF = 11.2 km s-1 (Erde); 600 m s-1 (Ceres)

3. Kosmische Geschwindigkeit

Fluchtgeschwindigkeit, die ein Objekt benötigt, um sich unbegrenzt auf einer parabolischen Bahn aus dem Schwerefeld der Sonne zu entfernen

v3 = 42.1 km s-1

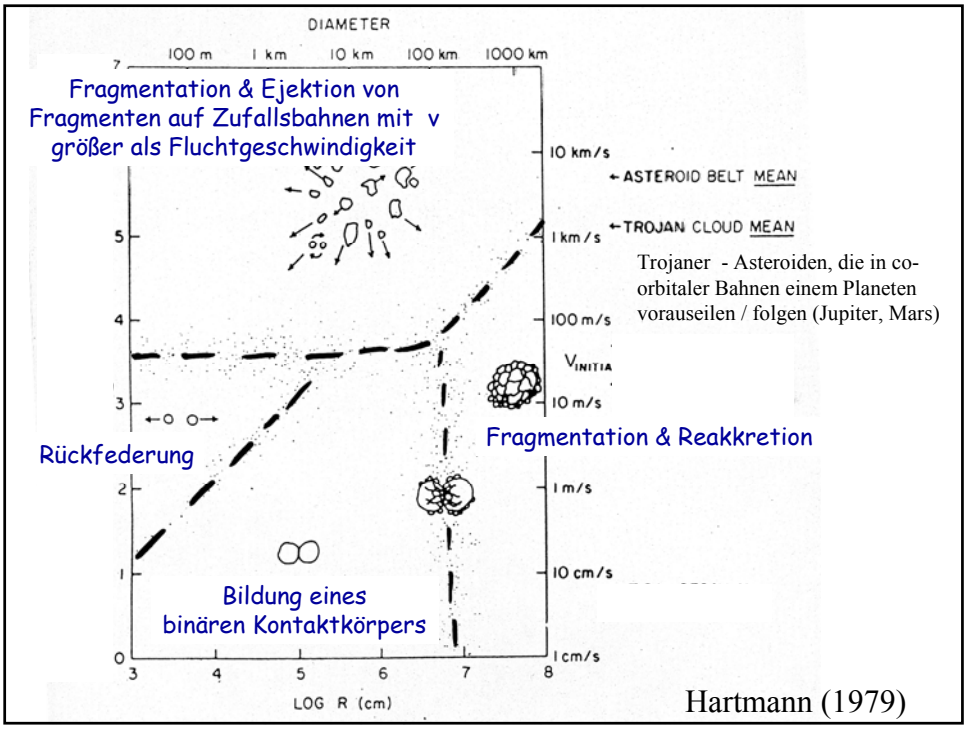
(reduziert sich beim Start von der Erde auf ~12.3 km s-1, wg. Kreisbahngeschwindigkeit der Erde vK = 29.8 km s-1)

Impaktgeschwindigkeit Erde - Asteroidengürtel

11.2 bis 71.9 km s-1 (retrograd) ca. 5 km s-1

"hypervelocity impact"

Planetare Krusten
Morphometrie von Impaktkratern
das relative Alter planetarer Oberflächen
Ziel Erde - Kraterproduktionsrate
kosmische Geschwindigkeiten
Kollisionseffekte



Trojaner - Asteroiden, die in co-orbitaler Bahnen einem Planeten vorauseilen / folgen (Jupiter, Mars)

Hartmann (1979)

Kollisionseffekte

Kollision und Rückfederung
D 100 m < 1 km v < 20 m s^{-1}

Kollision und Bildung eines binären Kontaktkörpers
D ~10 km < 300 km v < 50 m s^{-1}

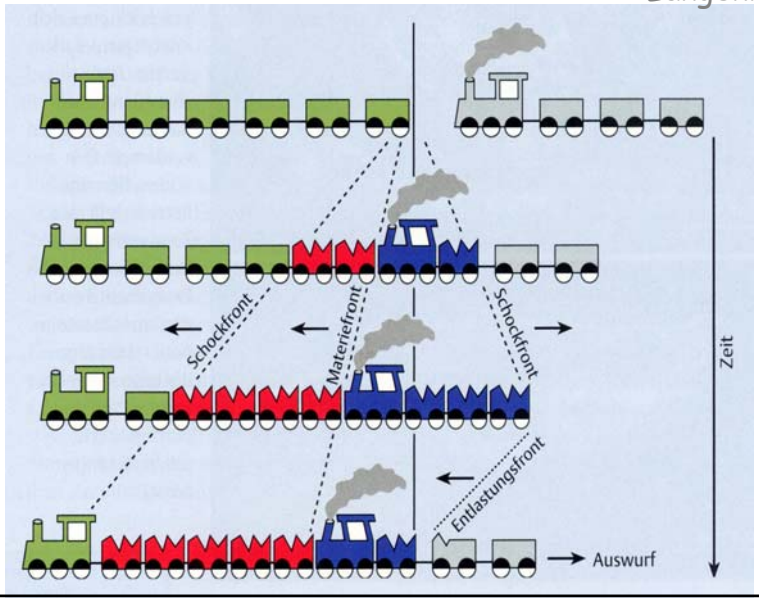
Kollision, Fragmentation und Re-Akkretion
D > 100 km v < 1 km s^{-1}

Kollision, Fragmentation und Ejektion von Fragmenten auf Zufallsbahnen mit v größer als Fluchtgeschwindigkeit
(a) D < 100 km v > 50 m s^{-1}
(b) D > 100 km v > 100 m s^{-1} bis 10 km s^{-1}
Asteroidengürtel

Planetare Krusten
Morphometrie von Impaktkratern
das relative Alter planetarer Oberflächen
Ziel Erde - Kraterproduktionsrate
kosmische Geschwindigkeiten
Kollisionseffekte
Stoßwellenphysik

Schockfront, Stoß-, Entlastungswelle

Langenhorst



Stoßwellen

Dynamische Stosswellen sind Kompressionswellen mit einer Amplitude, die über die elastische Grenze (HEL = Hugoniot Elastic Limit) des durchlaufenen Materials hinausgeht.

Die Stoßwellengeschwindigkeit ist immer größer als die Schallgeschwindigkeit in der nicht komprimierten Materie.

Stoßwellen sind mit dem Transport von Material verbunden und bewirken eine Erhitzung des erfassten Materials.

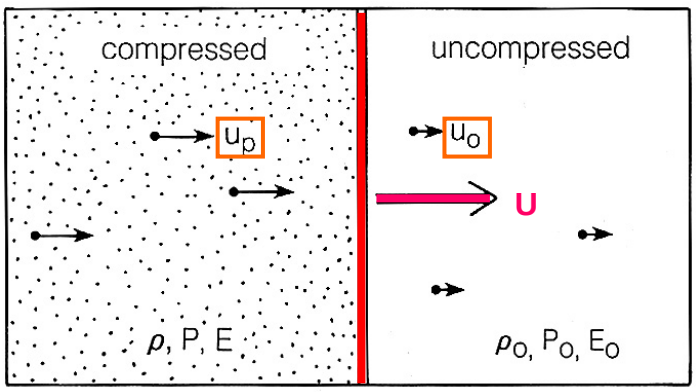
Es handelt sich nicht um Kompressionswellen mit periodisch veränderlicher Amplitude, daher ist auch der Ausdruck **Stoss- oder Schockfront** korrekter.

Stoßfront

Diskontinuität
- des Druckes p,
- der Dichte ρ, und
- des spezifischen Volumens V = 1/ρ,
- der Partikel-Geschwindigkeit u*, mit der die Materie hinter der Stoßwelle mit der Stoßwellengeschwindigkeit U, fließt und
- der inneren Energie E (d.h., Energie pro Masseneinheit)

u* „Nachströmgeschwindigkeit"

Parameter zur Beschreibung des Materialzustandes



u_p = Partikel-, U = Stoßwellengeschwindigkeit

Melosh 1989

ρ = Dichte, P = Druck, E = innere Energie

Sprungkonditionen → Rankine-Hugoniot-Gleichungen

Verknüpfen innere Energie E, spezifische Volumina V und Druck P an der Stossfront.

(Rankine-) Hugoniot-Gleichungen

Erhaltung von Masse [1]

$$\rho_0 U = \rho_1 (U\text{-}u) \qquad [1]$$

Dichte = ρ, Partikelgeschwindigkeit = u, Stosswellengeschwindigkeit = U

Impulserhaltung [2] (2. Newton´sches Gesetz)

$$P_1 - P_0 = \rho_0 U u \qquad [2]$$

Druck = P

Energieerhaltung [3]

$$P_1 u = 1/2\ (\rho_0 U) u^2 + \rho_0 U (E_1 - E_0) \qquad [3]$$

Gesamtenergie in geschockter bzw. ungeschockter Materie= E_1 bzw. E_0

Einsetzen / Umformen → ***"Hugoniot"-Gleichung***

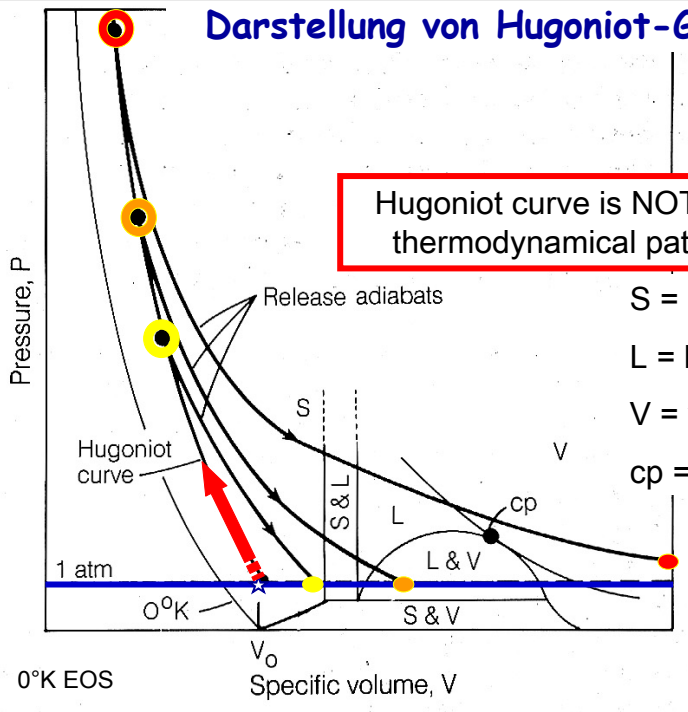
! grundlegend in der Stoßwellenphysik !

$$E_1 - E_0 = P_1\ 1/2\ (P_1 - P_0)\ (V - V_0) \qquad [4]$$

korreliert Energie E, spezifische Volumina V und Druck P

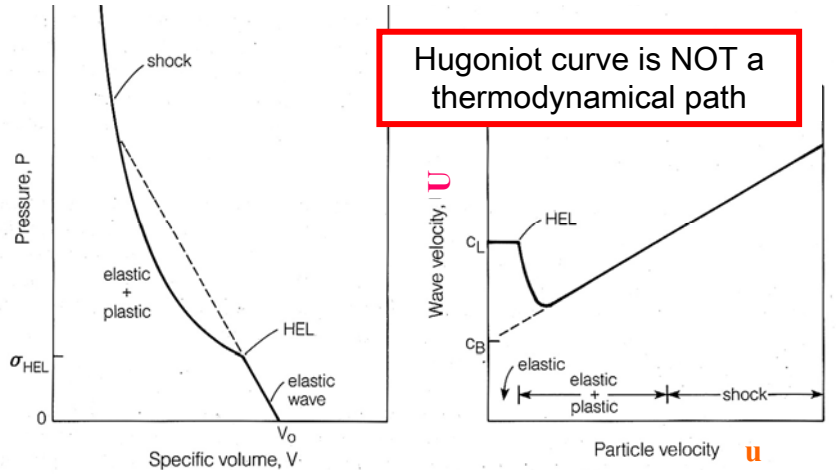
[1] - [4] = **Sprungbedingungen ("jump conditions")** an der Stossfront.

Darstellung von Hugoniot-Gleichungen



Darstellung von Hugoniot-Gleichungen

Zustandsgleichungen (EOS = equation of state) im
P – V bzw. U – u Raum



Hugoniot curve is NOT a thermodynamical path

HEL = Hugoniot Elastic Limit
CB = Schallgeschwindigkeit in der unkomprimierten Materie
CL = Geschwindigkeit der Longitudinalwelle

Melosh 1989

HEL = Hugoniot Elastic Limit

Unterhalb von HEL (materialabhängig 0.1 ≥ 20 GPa) gibt es nur eine elastische Welle, darüber folgt ein elastisch-plastischer Bereich sowie der Hochdruckbereich (irreversible Änderungen der Materialparameter).

Elastisch – plastischer Bereich

In dichten Gesteinen (allgemein: in spröden Festkörpern) bewirken diese Wellen Bruchdeformation, in Sedimenten wird der Porenraum drastisch reduziert bzw. geschlossen (P < 4 GPa).
In den Materialwissenschaften sind vor allem elastisch bzw. elastisch-plastische Verformungen von Interesse!

Stosswellengeschwindigkeit

Diese ist immer größer als die Schallgeschwindigkeit in der nicht komprimierten, ruhenden Materie vor der Stoßfront aber geringer als die Schallgeschwindigkeit in der komprimierten Materie hinter der Stoßfront.

Partikelgeschwindigkeit (Nachströmgeschwindigkeit)

Diese ist immer geringer als die Stosswellen-geschwindigkeit der Welle. Der Vektor der Partikel-geschwindigkeit ist parallel zur Fortpflanzungsrichtung der Stosswelle.

Entlastung

Reflexion der Stosswellen an freien Oberflächen →

Entlastungswellen (release – rarefraction wave)

Druckwellen, deren Geschwindigkeit U_r höher ist als jene der Stosswelle **U**, da die Wellengeschwindigkeit im komprimierten Material höher ist.

Free surface approximation – velocity doubling rule

Trifft eine ebene Stosswelle auf eine freie Oberfläche, wird sie als Entlastungswelle reflektiert, der Druck an der freien Oberfläche geht gegen Null.

vfs = velocity free surface $u_p / u_r \sim 1 \Rightarrow v_{fs} = 2\, u_p$

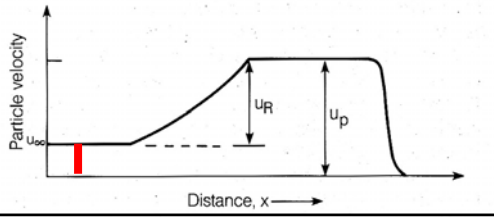
Entlastung

- *An freien Oberflächen hat das Material eine Partikelgeschwindigkeit von* $\mathbf{u_p + u_r \sim 2\ u_p}$.

  u_p = *Partikelgeschwindigkeit parallel zur Stoßwelle*

  u_r = *Partikelgeschwindigkeit parallel zur Entlastungswelle*

- *Da beide Geschwindigkeiten nicht identisch sind, weist das Material nach der Entlastung noch eine Partikelgeschwindigkeit auf (d.h., befindet sich nicht im Ruhezustand).*
- *Diese* ***residuale Geschwindigkeit*** *spielt bei der Kraterbildung – Exkavation und Auswurf eine wesentliche Rolle*



Melosh 1989

Planetare Krusten
Morphometrie von Impaktkratern
das relative Alter planetarer Oberflächen
Ziel Erde - Kraterproduktionsrate
kosmische Geschwindigkeiten
Kollisionseffekte
Stoßwellenphysik
Kraterbildung

Kraterbildung

Datengrundlage

- Naturbeobachtungen
- Experimente
- Numerische Modellierung

Stadien der Kraterbildung

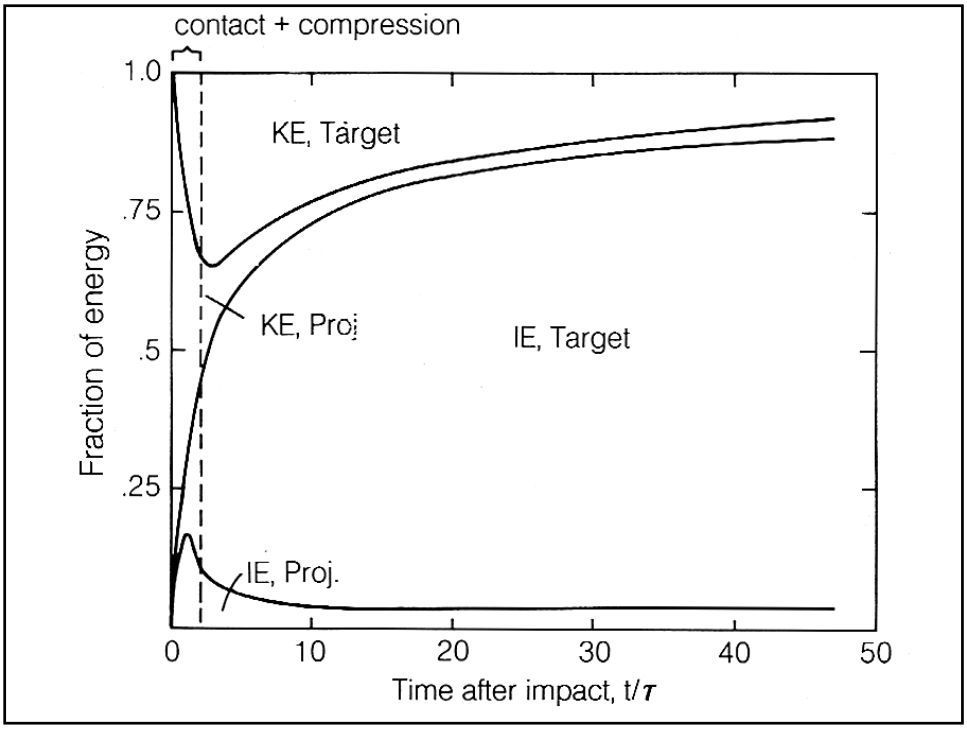
- Kontakt und Kompression – die Erzeugung von Schockwellen
- Exkavation (Auswurf) – Wachstum der vorübergehenden Kraterhohlform
- Modifikation der vorübergehenden Kraterhohlform

künstliche Einteilung - es handelt sich um einen kontinuierlichen Prozess

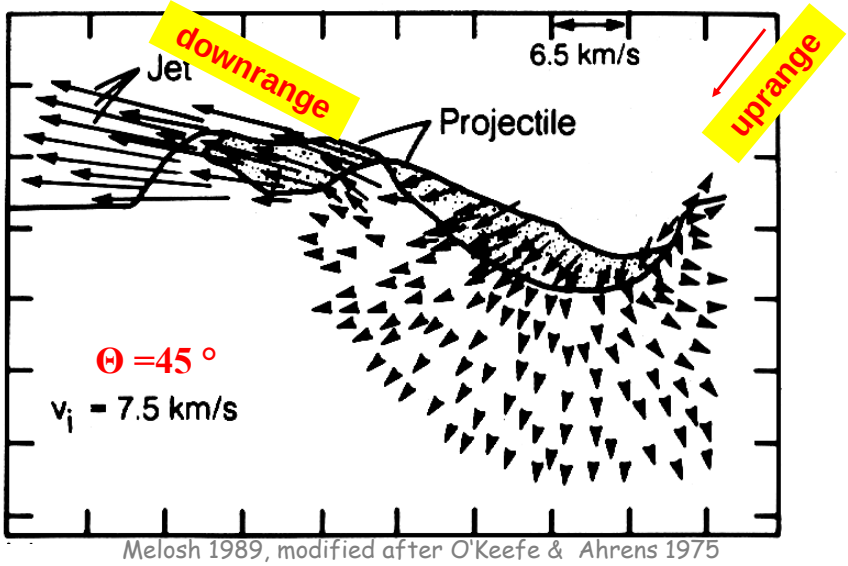
Kontakt und Kompression

- Energietransfer Projektil => Target
- Ausbreitung von sphärischen Stoßwellen
- Abbremsung des Projektils bedingt durch den Widerstand, den das Target der Durchdringung entgegensetzt
- Jetting
- Stagnation des Projektils (EDOZ)
- Ausbreitung der Stoßwelle im Projektil und im Target ⇒ akustische Fluidisierung

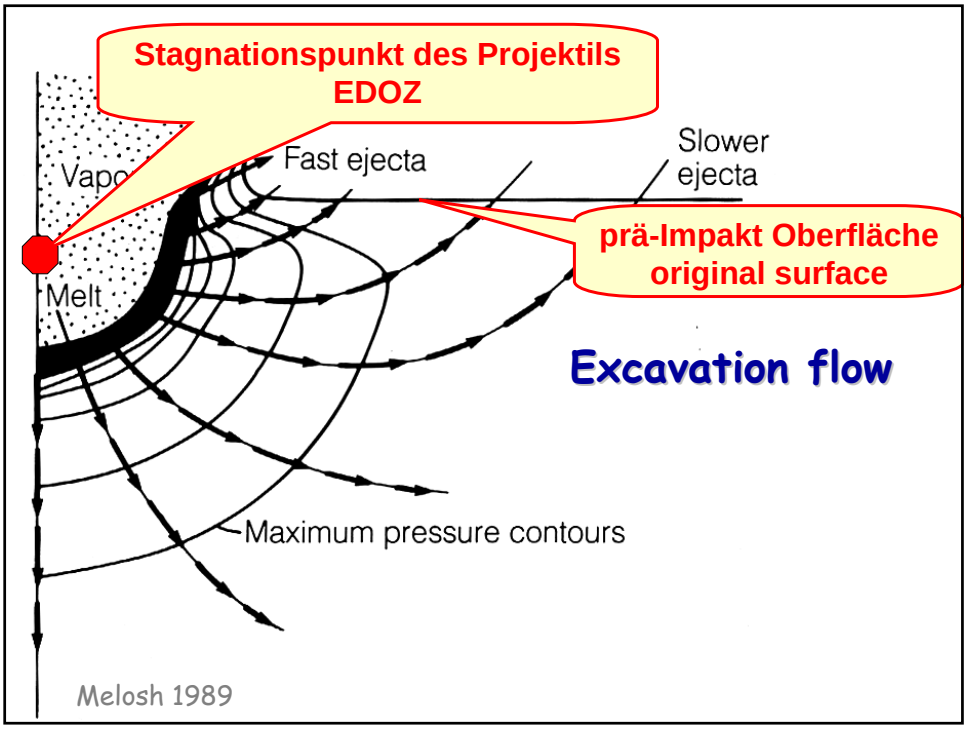
EDOZ = effective depth of zero



Jetting
geringer Einschlagswinkel – „oblique impact"



Melosh 1989, modified after O'Keefe & Ahrens 1975



Kontakt und Kompression

- Ausbreitung der Stoßwelle im Projektil und im Target ⇒ **akustische Fluidisierung**



Oblique impact

Θ =90 - 15°

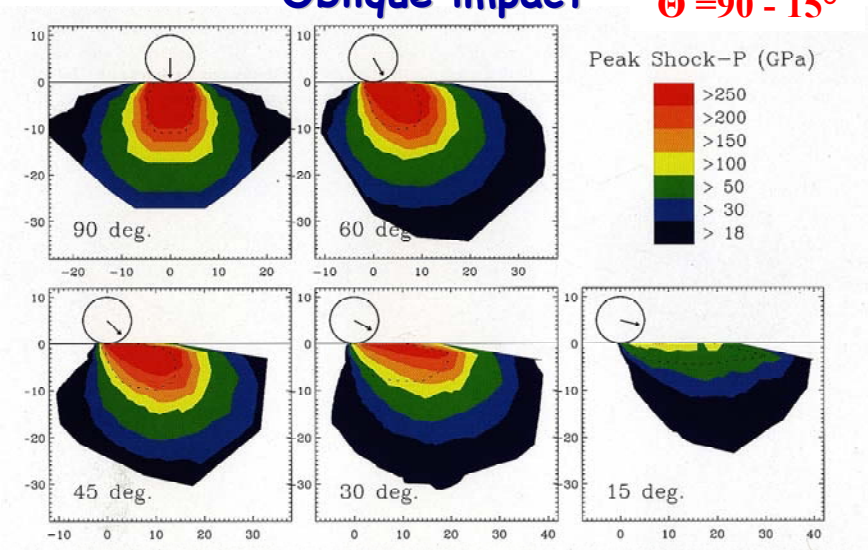
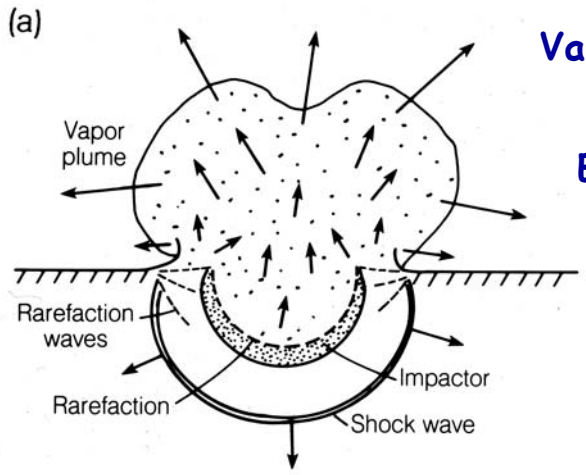


Figure 3 Peak shock pressure contours in the plane of impact for a series of 3D hydrocode simulations at various impact angles. *Dashed black line* represents the isobaric core. The projectile, 10 km in diameter, is shown for scale. *Vectors* illustrate the direction of impact. From Pierazzo & Melosh (2000b).

Exkavation (Auswurf)

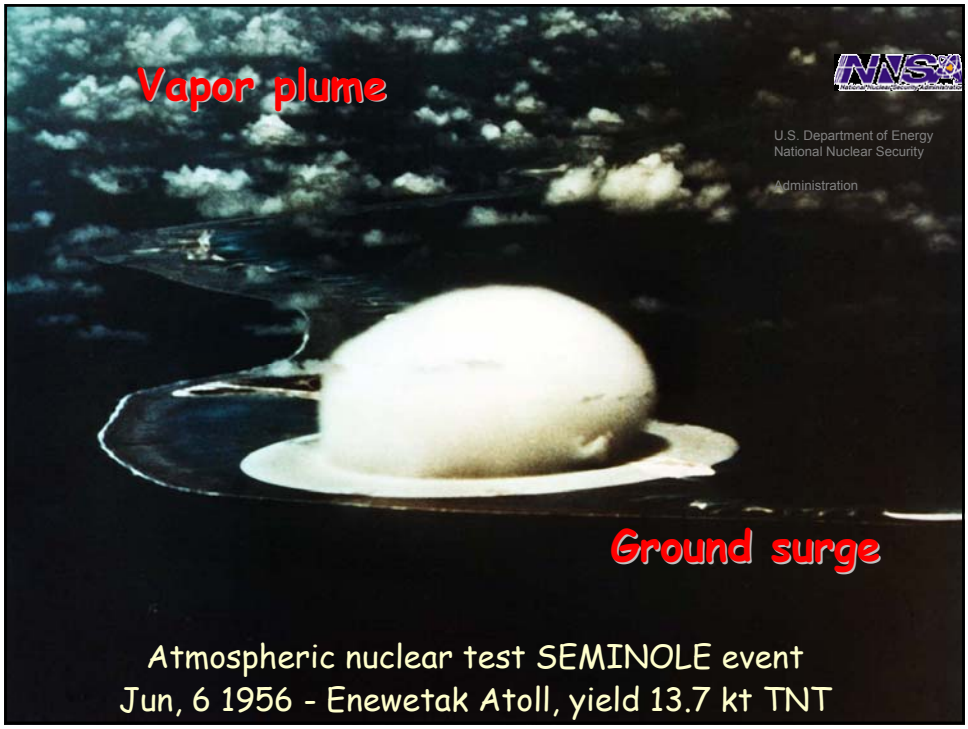
- Wachstum der vorübergehenden Kraterhohlform
- Kompression des Materials im Krateruntergrund
- Wechselwirkung Stoßfront & Entlastungswellen (tensional - rarefraction - release wave)
- ballistischer Auswurf
- Explosionswolke (vapor plume)
- Entlastung, Schmelz-/Brekzienbildung



Vapor/ejecta plume

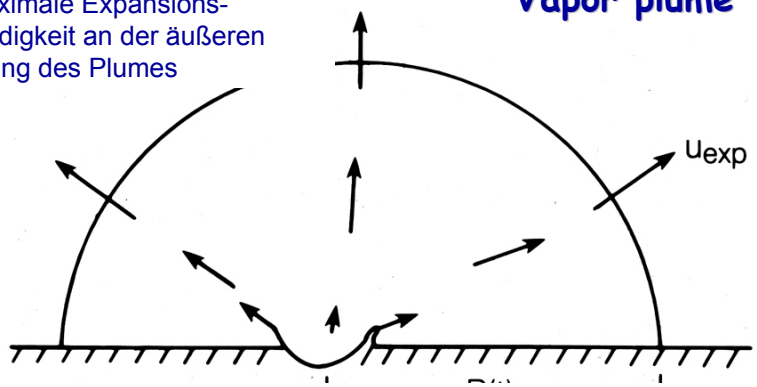
expandierende Explosionswolke

- entsteht am Ende des Kontaktstadiums als Folge der Entlastung von Projektil / Target
- enthält Gas, u.a. Silikatgas (T > 15 000 K), Schmelze, Gestein, Minerale (Staub), Projektil + Target



u_{exp} = maximale Expansions-geschwindigkeit an der äußeren Begrenzung des Plumes

Vapor plume

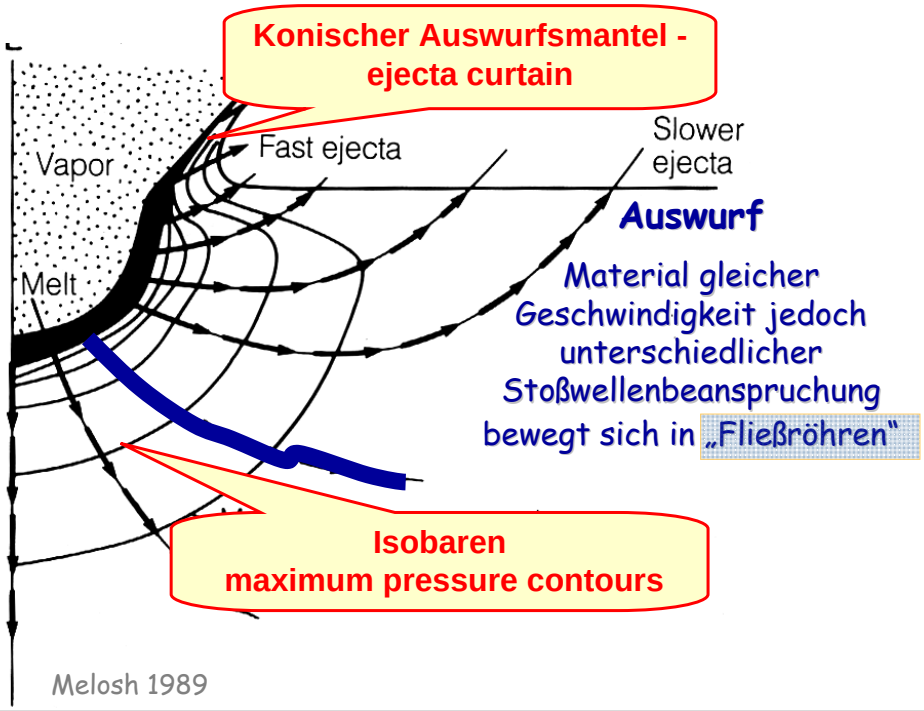


- halbkugelförmige Ausbreitung, mit v >30 km s^{-1} >> v Auswurfsmaterial, in weiterer Folge expandieren Gas & Ejekta gemeinsam
- beschleunigt Ejekta
- trägt zur regionalen/globalen Verteilung von „Staub" bei (fall out)

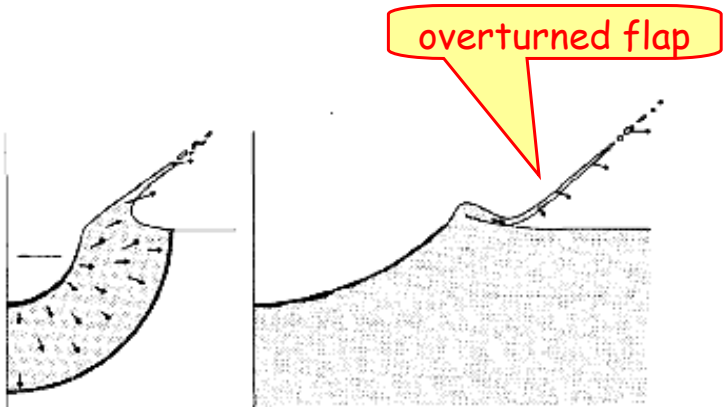
Auswurf I

- „Residual velocity" ≈ 1/3 bis 1/5 u_p , in Abhängigkeit von
  - der Entfernung vom Impaktzentrum
  - Materialparametern (Hugoniotgleichungen)
- Partikelgeschwindigkeit **up** ≈ 1/2 Impaktgeschwindigkeit **vi**
  ⇒ Geschwindigkeit des Exkavationsflusses ≈ 1/6 bis 1/10 **vi**

d.h., bei **vi** = 30 km s^{-1} ⇒ Exkavationsfluss < 5 km s^{-1}
(geringer als die Schallgeschwindigkeit in vielen Gesteinen)



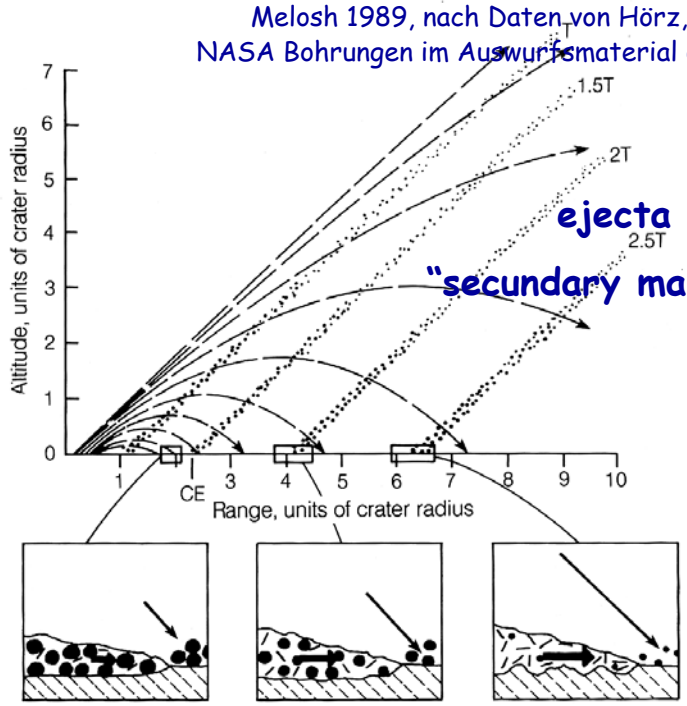
Auswurf – inverte Stratigraphie in der Brekziendecke



Auswurf II

- Die Partikel bewegen sich nicht radial vom Impaktzentrum weg, da Entlastungswellen von der freien Oberfläche ins Target zurücklaufen.
- Der zentro-symmetrische Exkavationsfluss (excavation flow) ist im
  - oberen Kraterbereich auswärts und nach oben,
  - unteren Kraterbereich nach unten und außen gerichtet.
- Der Exkavationsfluss führt zu einer schüssel-förmigen Depression, der „vorübergehenden Kraterhohlform" (transient cavity **TC**).

Melosh 1989, nach Daten von Hörz, Ostertag…
NASA Bohrungen im Auswurfsmaterial des Rieskraters



ejecta >3R

"secundary mass wasting"

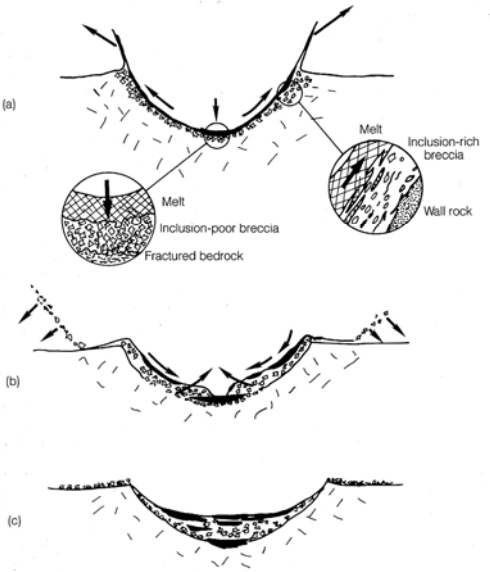
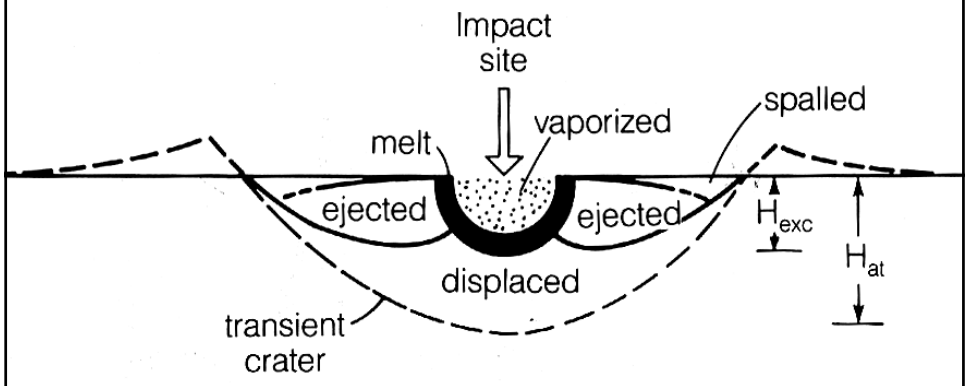


Fig. 8.2 Formation of the breccia lens in a simple crater. The growing transient crater (a) is lined with breccia and melt that flows upward and out of the crater along its walls. Collapse begins once the rim has formed (b) and the breccia slides back into the crater. The breccia sliding from the walls overrides the melt on the transient crater's floor and traps a melt pocket. At the cessation of sliding (c), the breccia lens has buried a deep melt pocket. The remains of the mixed melt and breccia that lined the transient crater are now concentrated near the top of the breccia lens.

Bildung polymikter Brekzien

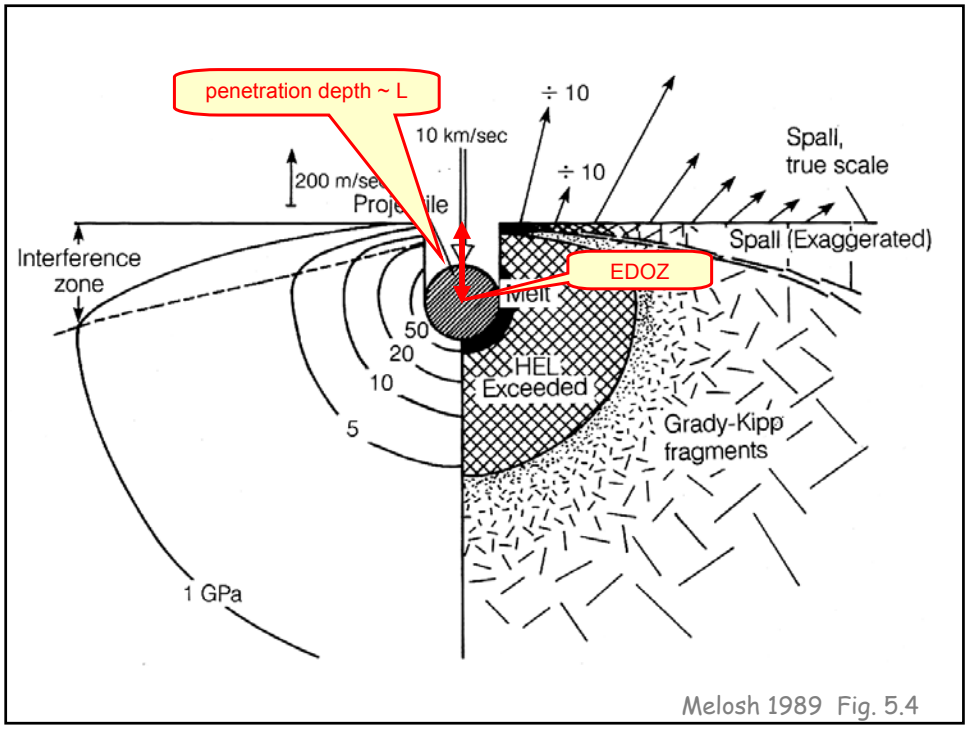
Melosh 1989

ejected - displaced – melted relative volumes



H_{exc} = maximum depth of excavation

Melosh 1989



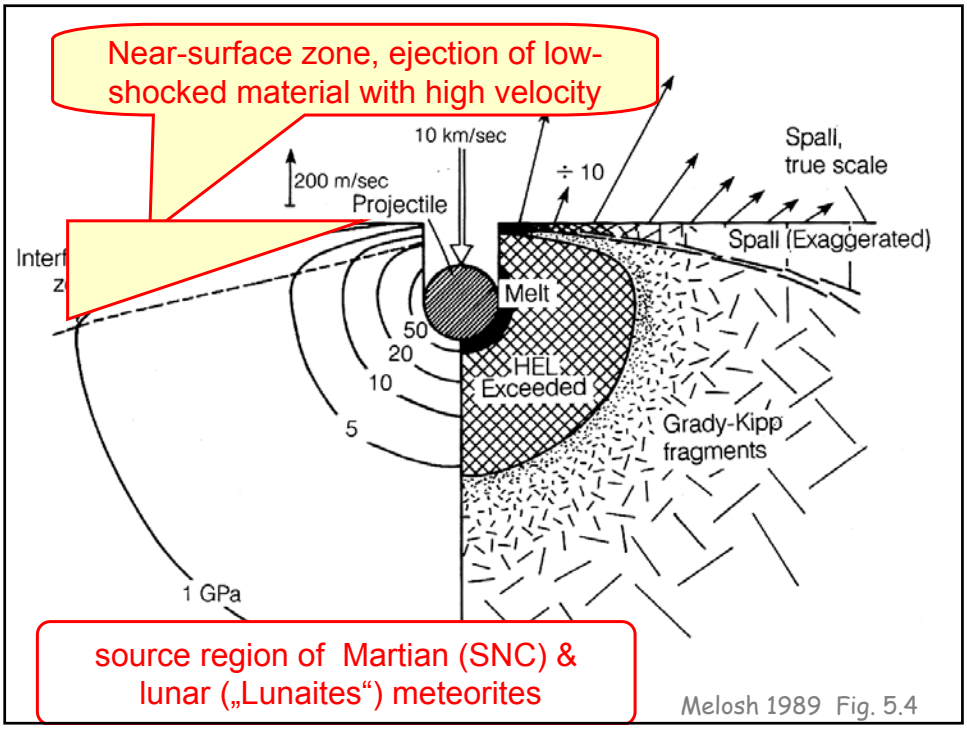
Melosh 1989 Fig. 5.4

Auswurf III

• Aufgrund der hohen Exkavationsgeschwindigkeit wird ein Teil des zerbrochenen Materials in eine Zone außerhalb des Randes des endgültigen Kraters ausgeworfen (ejecta blanket).
• Die äußere Begrenzung der kontinuierlichen Auswurfsdecke liegt bei ~3 R.
• Zudem gibt es strahlenförmigen Auswurf (ejecta rays), derr weit über 3 R hinaus reicht. R = Radius des modifizierten Kraters

• Im unteren Bereich ist die Zugspannung (tensile stress) der Entlastungswelle weniger stark ⇒ geringere Zerbrechung. Dieses Material wird nicht hinter den Kraterrand ausgeworfen, sondern bildet die „Displaced Zone" im Krater (Brekzien).

• Nahe der Oberfläche ist die Residualgeschwindigkeit sehr hoch (**velocity of the free surface**), es kommt zur **Spallation** (Abplatzen von Material).



einfacher, schüsselförmiger Krater

komplexer Krater mit zentraler Aufwölbung

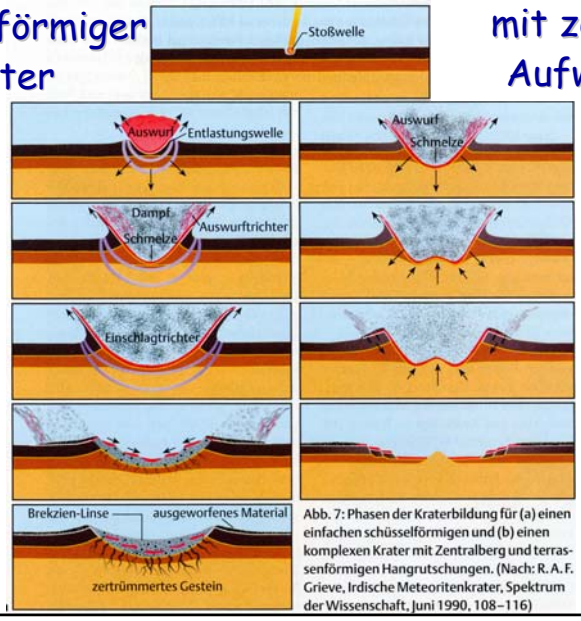


Abb. 7: Phasen der Kraterbildung für (a) einen einfachen schüsselförmigen und (b) einen komplexen Krater mit Zentralberg und terrassenförmigen Hangrutschungen. (Nach: R. A. F. Grieve, Irdische Meteoritenkrater, Spektrum der Wissenschaft, Juni 1990, 108–116)

"strength - dominated"

"gravity - dominated"

Modifikation der vorübergehenden Kraterhohlform

- Schwerkraftbedingte Massenbewegungen bewirken Kollaps der transienten Kraterhohlform
- Bildung des endgültigen, modifizierten Kraters
- Zentralberg (central peak) evtl. mit
- zentraler Vertiefung (central pit), oder
- eines zentralen Hügels (central mound), bzw. von Ringen
- terrassierten Randes

Wie groß war das Projektil??

Faustformel für ("hypervelocity") Einschläge auf der Erde

Ø Projektil 30 m x 10 =>

Ø "transient" Krater 300 m x 2 =>

Ø endgültiger Krater 600 m