

# **Modul Nr. 1608, M.Sc. Bau: Geodäsie und GIS**

## **Teil GIS – Kapitel 5:**



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt**  
**AGIS / Inst. Für Angewandte Informatik (INF4)**  
**Universität der Bundeswehr München**  
**Wolfgang.Reinhardt@unibw.de**  
**www.agis.unibw.de**

# Digitale Geländemodelle (DGM)

## Einführung und Überblick

# Ziele und Inhalte – Vorlesung GIS

**Ziele:** Grundprinzipien kennen  
Wissen was man mit GIS bearbeiten kann  
Einfache Aufgaben durchführen können,  
primär im Zusammenspiel GIS/DGM

## **Inhalte :**

- Kap 1: Einführung
- Kap 2: Grundlegende Konzepte
- Kap 3: Daten
- Kap 4: Datenbanken
- **Kap 5: Digitale Geländemodelle**
- Übungen

## **Kap3:**

**Digitale Geländemodelle, Einführung, Überblick über ausgewählte Verfahren der Interpolation und Triangulation, Anwendungsmöglichkeiten**

# Digitale Geländemodelle - Überblick

- Digitales Höhenmodell (DHM)
- Digitales Geländemodell (DGM)
- Digitales Oberflächenmodell (DOM)
- DGM-Datenarten
- DGM-Datenerfassung
- Strukturierung
- Anwendungsbeispiele

# Digitales Höhenmodell - Definition

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

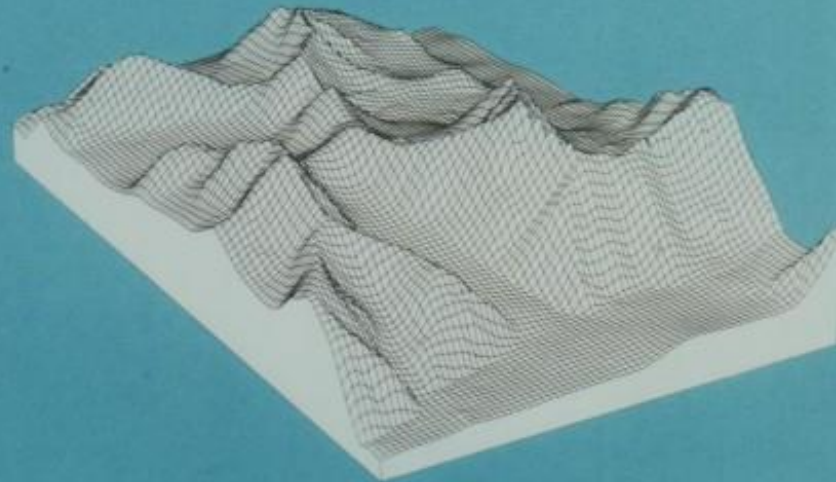
- Als **Digitales Höhenmodell (DHM)** bezeichnet man die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objekts hinreichend repräsentieren.

- Digital gespeicherte Höhenwerte repräsentieren die Höhenstruktur des Geländes

$$z = f(x,y)$$

- Ordnung der Daten (Dreiecke, Gitter)

- Interpolationsvorschrift



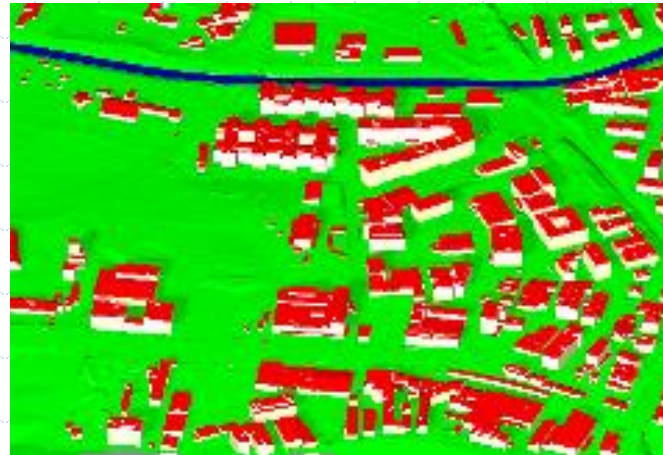
ein spezieller Fall eines DHM ist das **Digitale Geländemodell**, bei dem die natürliche Geländeoberfläche ohne Bebauung und Vegetation wiedergegeben wird.

# Digitales Oberflächenmodell

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Ein **Digitales Oberflächenmodell**  
enthält auch die Gebäude, Vegetation etc.

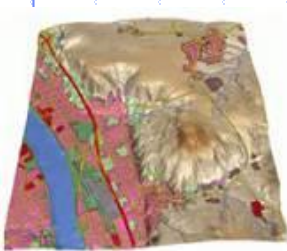


Beispiel: digitales 3D Stadtmodell in versch. Farbdarstellungen

# Digitale Stadtmodelle

## Level of Detail (LoD)

DGM – Strukturierung  
DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten



LOD 0 - Regional model  
Digital Terrain Model



LOD 3 - City / Site model  
Detailed architectural model



LOD 1 - City / Site model  
„Block model“ without roof structures



LOD 4 - Interior model  
walls, ceiling ... are modelled  
„Walkable“ architectural models



LOD 2 - City / Site model  
Explicit roof structures

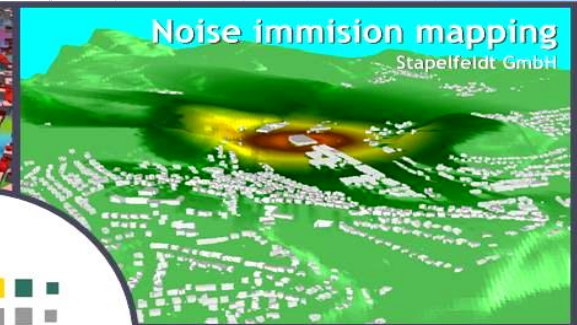
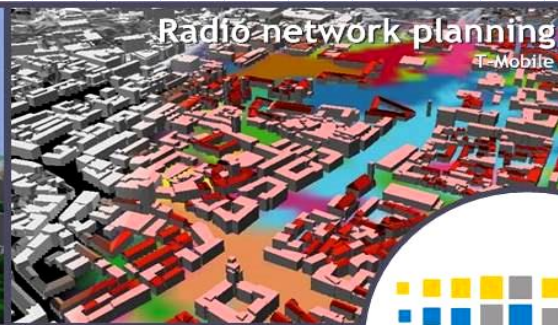


# Digitale Stadtmodelle

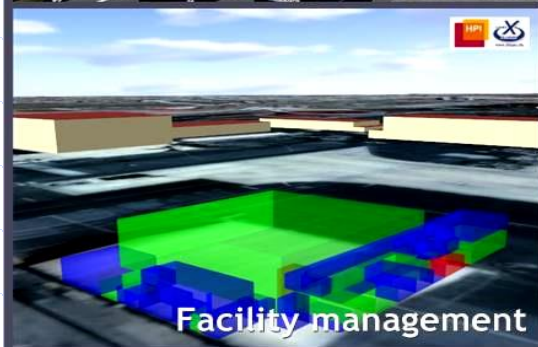
## Anwendungsbeispiele

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten



for 3d city models



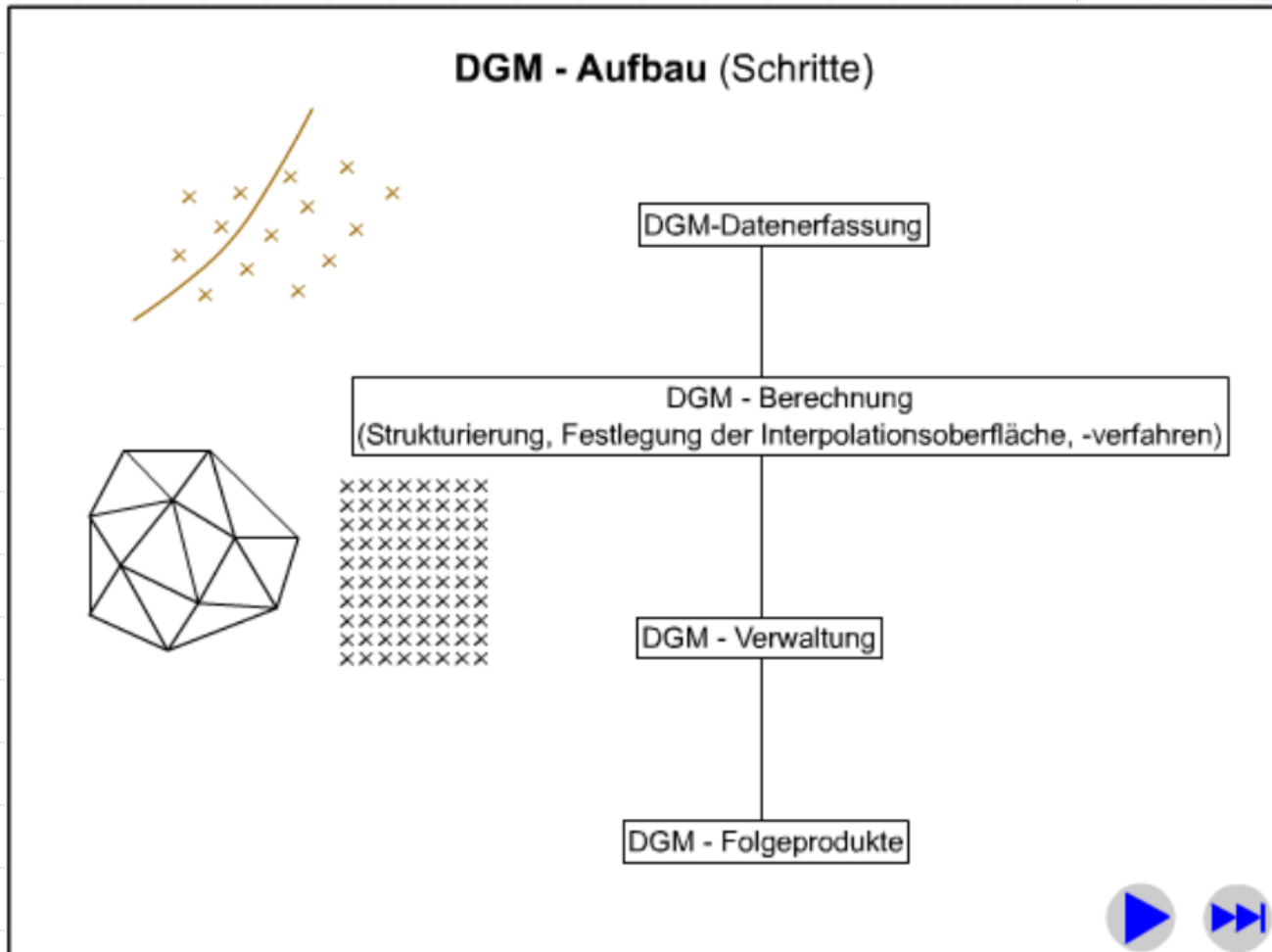


# Digitales Geländemodell - Übersicht

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

Schritte zum DGM Aufbau:

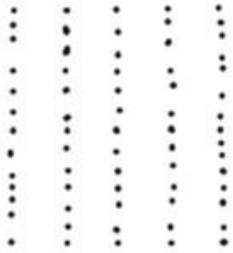


# DGM-Datenarten

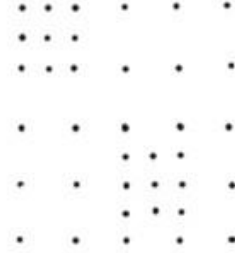
DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

Profildaten



Gitterdaten



Einzelpunkte



Höhenlinienpunkte



**Massenpunkte** mit unterschiedlicher Anordnung, je nach Erfassungsverfahren

⇒ Erfassungsverfahren: Geod. Verfahren, **Laserscanning (s.u)**, Photogrammetrie, Fernerkundung ...

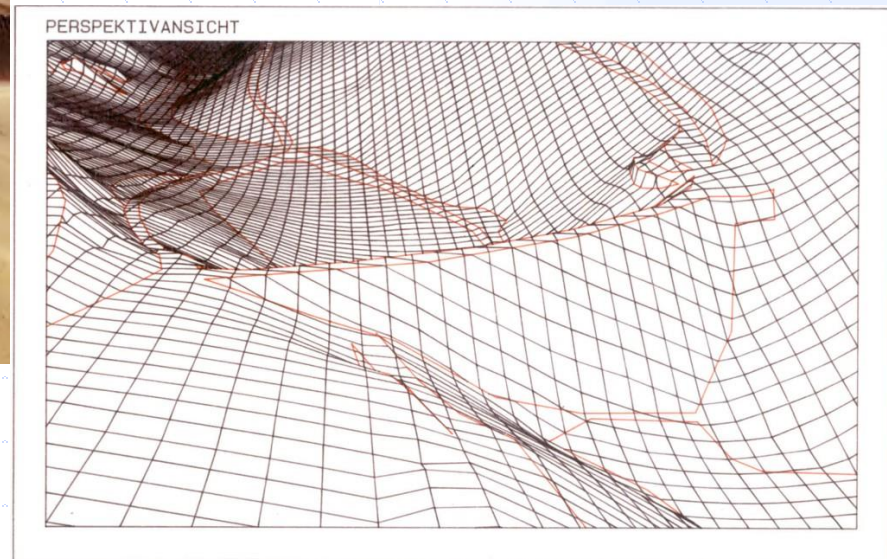
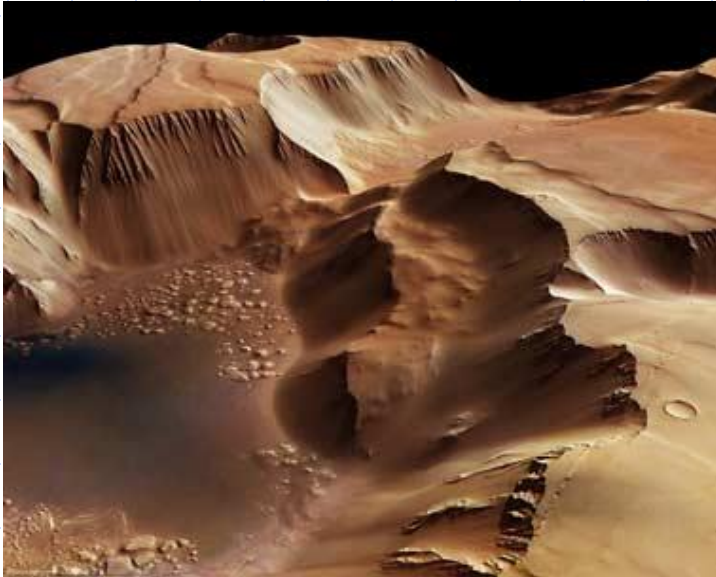
**Daten mit geomorphologischem Bezug** Geländekanten ... (s. Beispiele)

# DGM-Datenarten - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

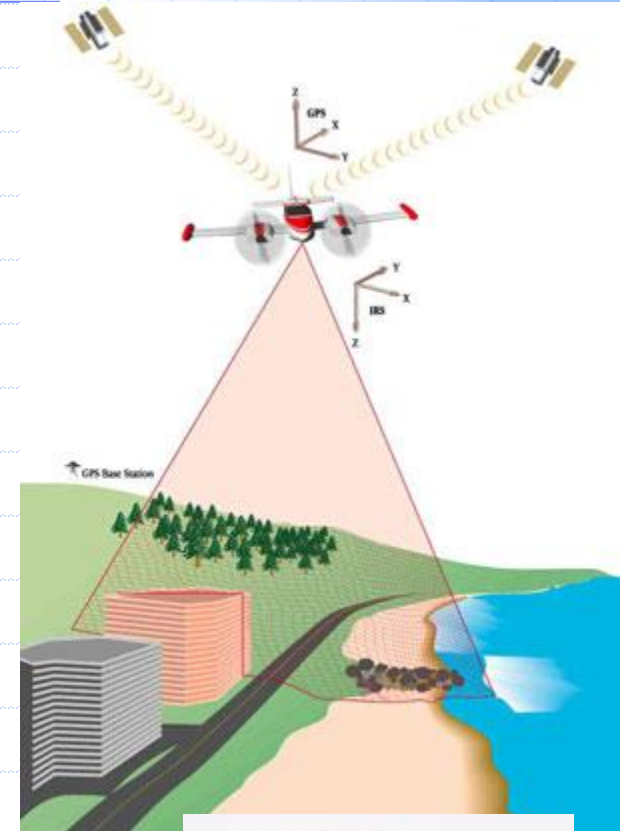
## Geländekanten



**Hinweis: Direkt messen oder Massenpunkte sehr dicht aufnehmen!**

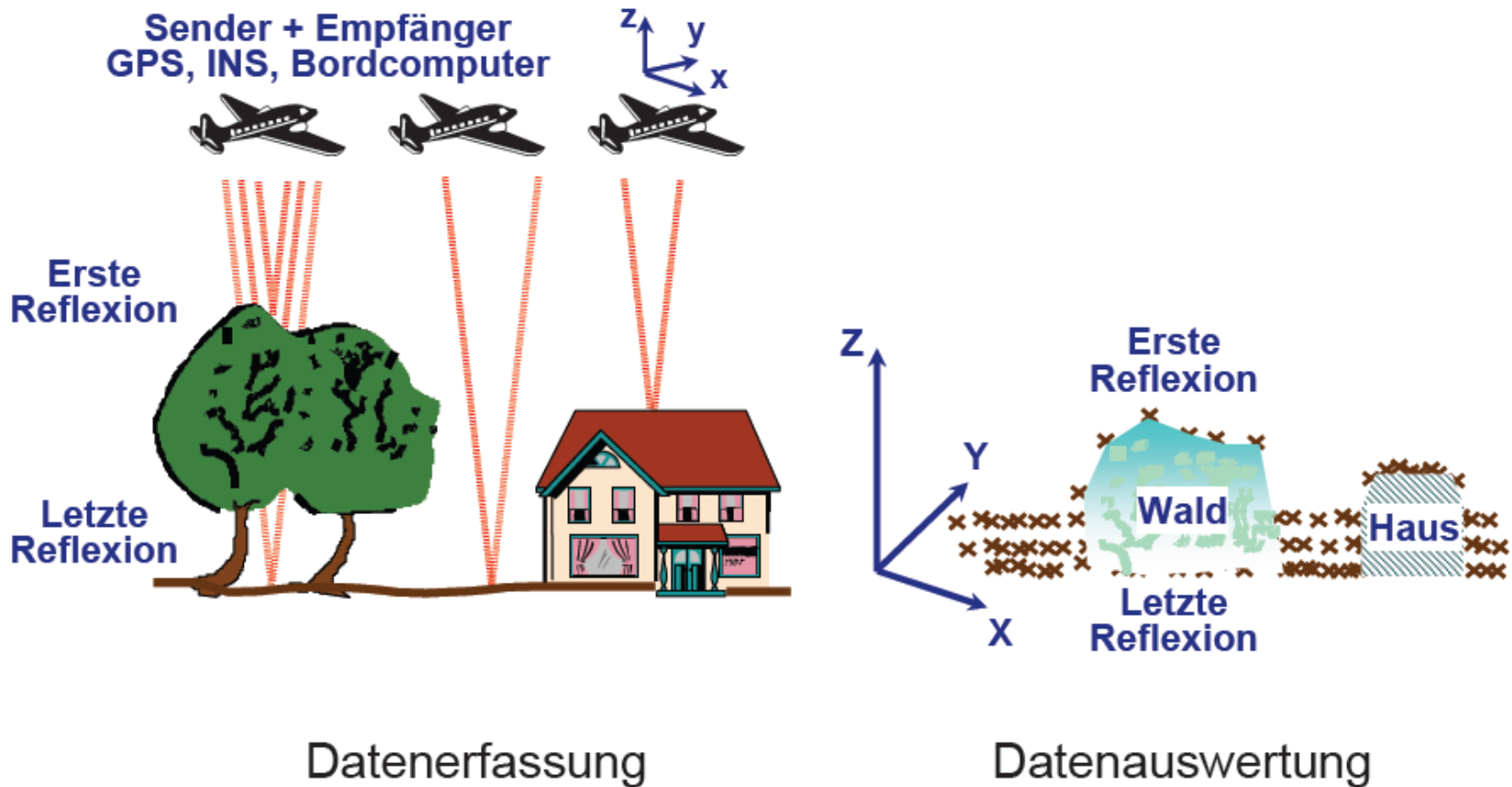
# Datenerfassung mit Airborne Laserscanning

- Das Airborne Laser Scanning System erlaubt die berührungslose Erfassung der Geländeoberfläche mit hoher Präzision.
- Der Laserstrahl des Scanners wird quer zur Flugrichtung abgelenkt und ein Geländestreifen entlang des Flugwegs mit einer Zick-Zack-Linie abgetastet.
- Die Entfernung zur Erdoberfläche wird über Laufzeitmessung ermittelt.
- Die äußere Orientierung, d. h. die Position und die Lage des Sensors im Raum, wird aus GPS- und Inertialmessungen berechnet.
- Es werden i.d.R. sehr viele Punkte aufgenommen (z.B. 1-8 P/m<sup>2</sup>) mit sehr hoher Genauigkeit (ca. 1-2 dm erreichbar)
- Standard für großräumige DGM / DOM



# Datenerfassung mit Airborne Laserscanning

- Im Unterschied zur Photogrammetrie handelt es sich dabei um aktive Erfassungssysteme, bei denen von einem Sender ausgestrahlte Laserimpulse verwendet werden.

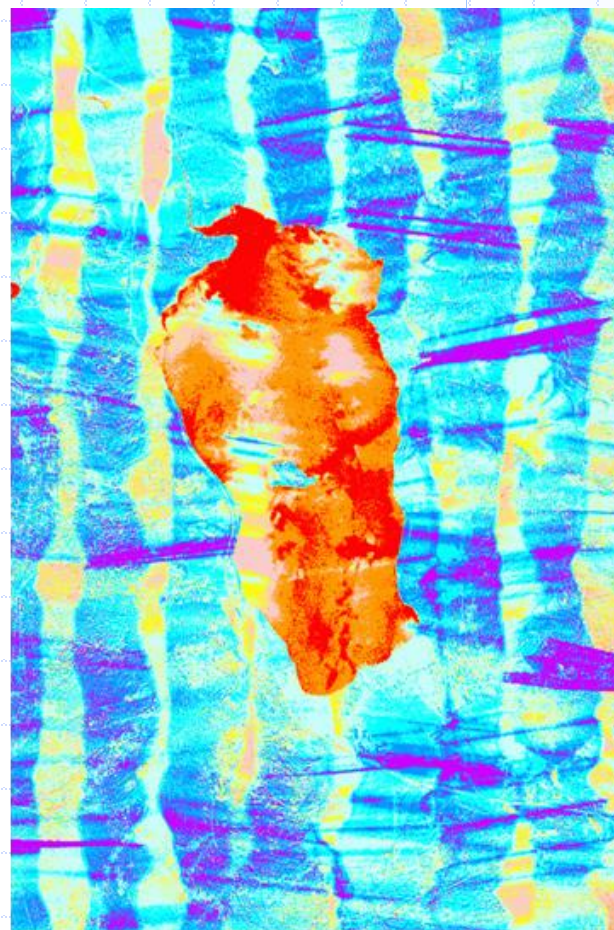




# Beispiel aus Bayern

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten



Schliersee

Punkte / m<sup>2</sup>

- 0
- 0.00 - 0.40

- 0.40 - 0.80
- 0.80 - 1.00
- 1.00 - 1.60

- 1.60 - 2.20
- 2.20 - 2.80
- >= 2.80

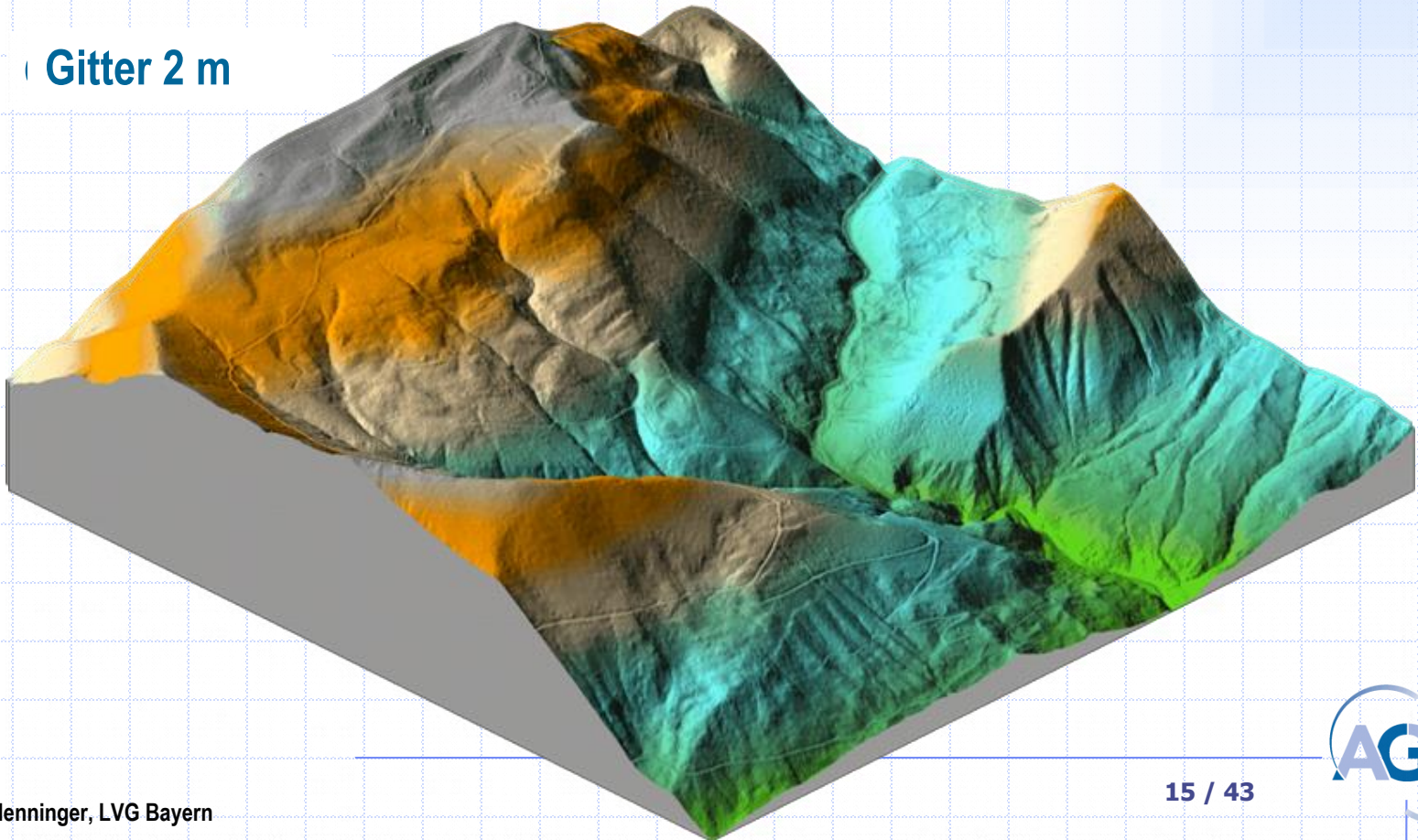
# Beispiel aus Bayern

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

- Aus den gemessenen Punkten werden regelmäßige Gitter (s. unten) abgeleitet und an Nutzer abgegeben (kostenpflichtig)

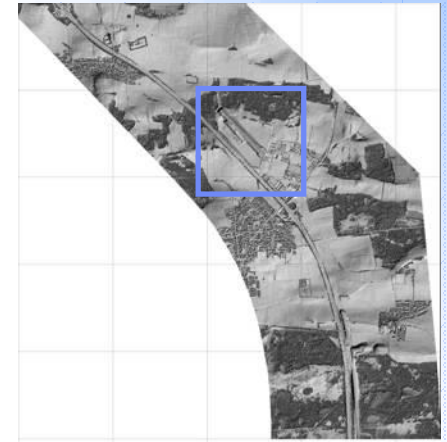
Gitter 2 m





# DGM und DOM (Beispiel aus Bayern)

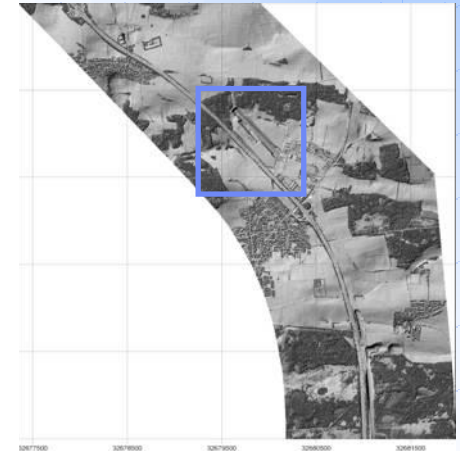
## DGM



ICE-Trasse N – IN  
Höhe Denkendorf  
Gitter 1m

# DGM und DOM (Beispiel aus Bayern)

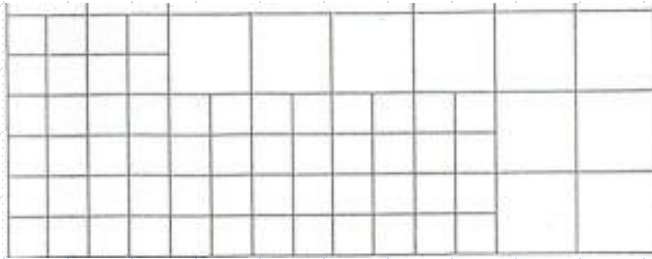
## DOM



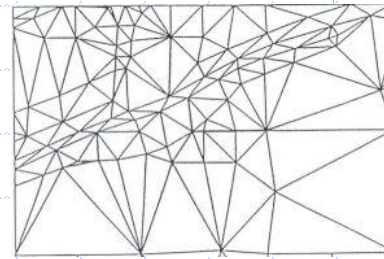
ICE-Trasse N – IN  
Höhe Denkendorf  
Gitter 1m



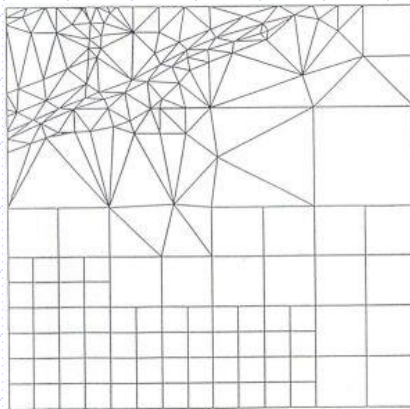
# Strukturierung der Daten



Strukturierung mittels Gitternetzen



Strukturierung mittels  
Dreiecksnetzen



Strukturierung mittels hybrider  
Netze (Dreiecke und Gitter)

**Gemessen: Punkte / Linien**

**Gewünscht: kontinuierliche Beschreibung /  
Oberfläche**

**Strukturierung: Grundlage für Oberflächenbildung**



# Definition

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

Eine **Triangulation** ist ein planarer Graph, bei dem alle Maschen Dreiecke sind.

Die Triangulation einer Menge von Punkten **MT** ist ein planarer Graph mit einer maximalen Anzahl von Kanten.

**MT** - Anzahl Punkte,

**MU** - Anzahl Punkte auf Umrandungspolygon

**NE** - Anzahl Kanten (edges),

**NT** - Anzahl Dreiecke (triangles)

$$NE = 3(MT-1) - MU \leq 3MT$$

$$NT = 2(MT-1) - MU \leq 2MT$$

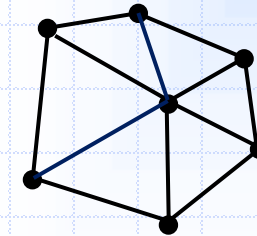
=> verschiedene Triangulationen für eine gegebene Menge von Punkten möglich

=> Einführung von Bedingungen für eine eindeutige Lösung notwendig

Beispiele:

=> minimum edge length (Summe der Dreiecksseiten minimal)

=> maxmin Winkel-Triangulation (Maximierung des minimalen Winkels)



# Voronoi-Polygon

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

## Voronoi-Diagramme

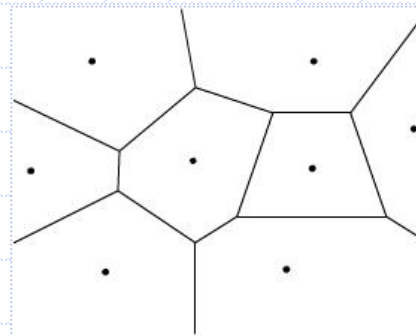
("Thiessen-Polygone", "Dirichlet-Tesselation")  
geg.: Punkthaufen  $S$  in der Ebene, mit  $P_i \in S$

Das Voronoi-Polygon des Punktes  $P_i \in S$  ist das  
Begrenzungspolygon der Punkte, die näher bei  $P_i \in S$   
liegen als bei den übrigen Punkten.

Beispiel eines Voronoi-Diagramms

Anwendungen:

- Postamtproblem
- Schulzuordnung
- weitere



# Delaunay-Triangulation (DT)

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

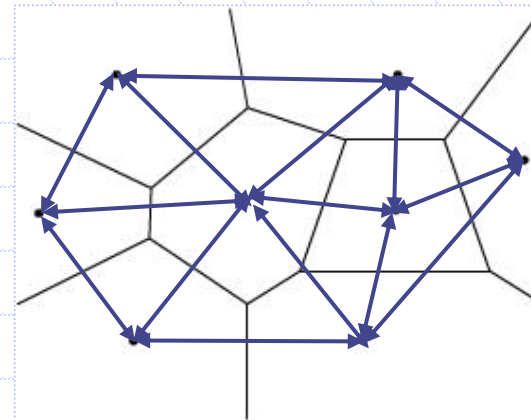
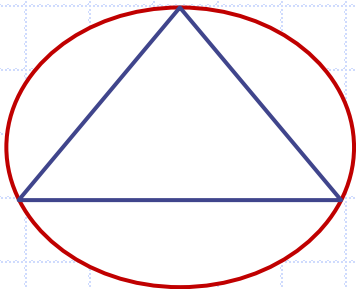
Die DT ist der duale Graph des Voronoi-Diagramms.

Hinweis:

- die DT ist die "Standard"-Triangulationsmethode
- hinreichende Bedingung: Dreiecksumkreisbedingung (wird sehr häufig bei der Implementierung genutzt)
- sehr viele Algorithmen vorgeschlagen, DT wird idR ohne Voronoi-Diagramm erzeugt

Erweiterung:

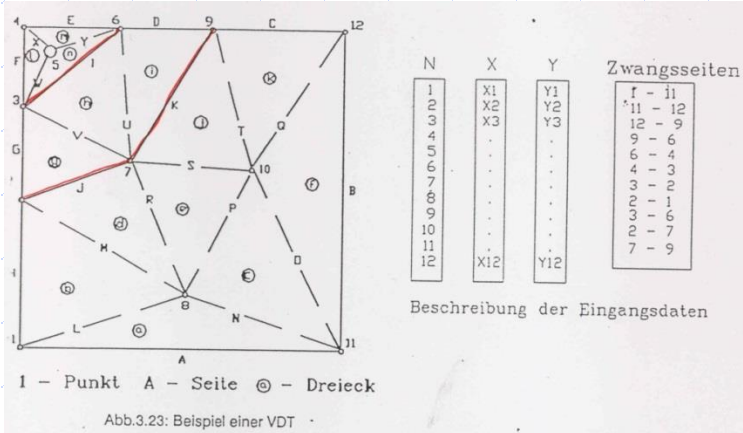
Berücksichtigung von Kanten, DT in den Bereichen zwischen den Kanten (Kanten als Zwangsseiten)



# Datenorganisation und Verwaltung von Triangulationen

DGM – Strukturierung

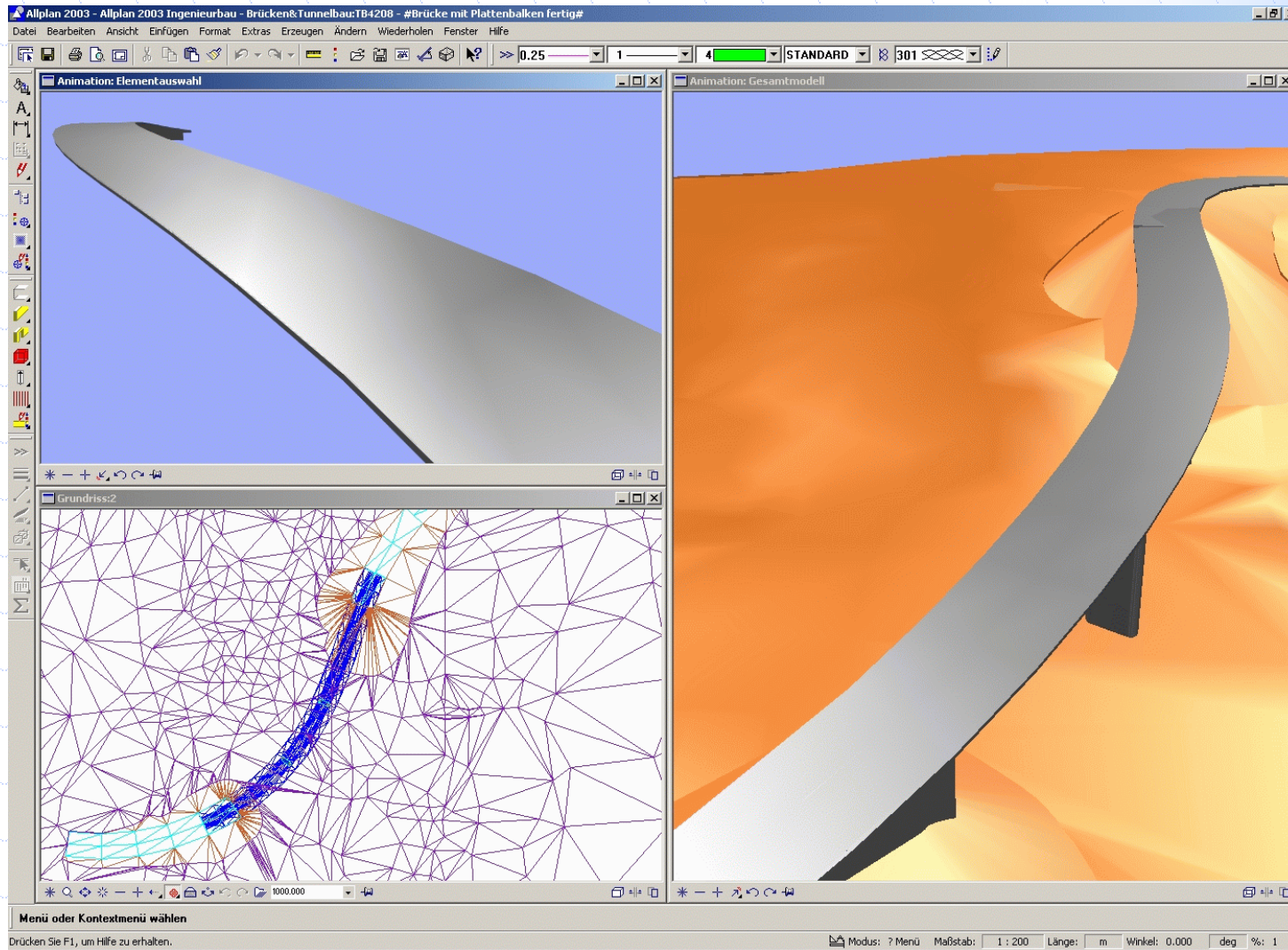
DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten



Dreiecke	P-Nr.			Nachbar-
Nr.				dreiecke
a	1	11	8	c b
b	1	8	2	0 d
c	11	10	8	a e
d	2	8	7	b g
e	8	10	7	c j
f	11	12	10	0 k
g	2	7	3	d h
h	7	6	3	i n
i	7	9	6	j o
j	7	10	9	e k
k	10	12	9	f 0
l	3	5	4	n n
m	6	4	5	0 l
n	3	6	5	h m

Beispiel: Organisation nach Dreiecken und Nachbardreiecken

# Triangulationen, Standard im Straßenbau





# Interpolation eines Gitter-DGM

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

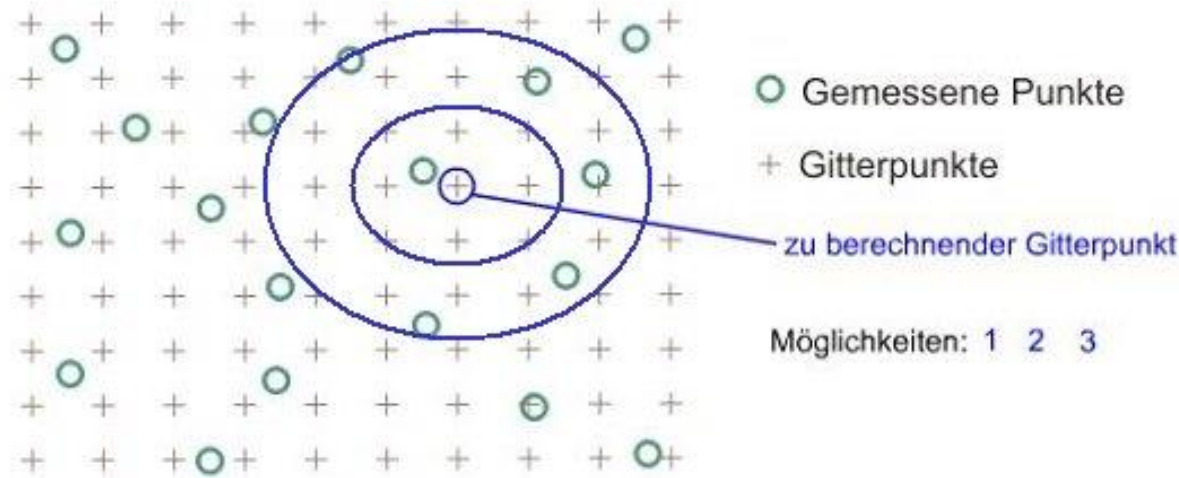
Gegeben: Gemessene Punkte in beliebiger Lage,  
Lage der Gitterpunkte

Gesucht: Höhen der Gitterpunkte

Viele Berechnungsmöglichkeiten verfügbar, z.B.  
Kriging,

ein Beispiel im folgenden erläutert

# Gleitendes Mittel (1)



Gemessene Punkte (Primärpunkte) zu berechnende Gitterpunkte (Sekundärpunkte)

Verzichtet auf die Erzeugung mathematisch bestimmbarer Teilflächen, berechnet den z-Wert eines beliebigen Punktes aus den Werten der Punkte in einer gewissen Umgebung.

$$z_q = (p_1 z_1 + \dots + p_n z_n) / (p_1 + \dots + p_n)$$

- einfaches Modell, einfache Berechnung;
- aber Problematik: welche/wieviele Punkte sind zu berücksichtigen?
- Wie sind die Gewichte zu berechnen?

# Gleitendes Mittel (2)

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

## Ansätze:

Wahl der Gewichte umgekehrt proportional zur Entfernung  
(auch Quadrat der Entfernung)

statistische Betrachtung (Kovarianzfunktion für die Punkte  $P_i$ ),

Beispiele:

$f(d)=$	$1/d$	Reziproke Distanz
$f(d)=$	$e^{-ad^{**2}}$	Gaußsche Glockenkurve

## Anmerkungen:

Bestimmung der Kovarianzfunktion ist nicht ganz einfach

Ziel: „Angemessene“ Filterung der Messpunkte

Nicht zu starke Glättung der Geländeoberfläche (vgl. Literatur)

**Viele weitere Methoden vorgeschlagen!**

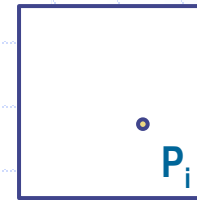
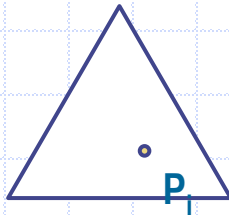
# Interpolation der Höhe eines beliebigen Punktes

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Allgemeine Interpolationsverfahren:

- Lineare Interpolation
- Bilineare Interpolation



**Gegeben:** Dreiecks- bzw. Gitter-DGM,  $P_i$  mit  $x, y$

**Gesucht:** Höhe für Punkt  $P_i$

# Lineare Interpolation

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

Geg.: 3 Punkte  $P_i (x_i, y_i, z_i)$  mit  $i = 1, 2, 3$

$z$  -> Geländehöhe, aber auch Temperatur, Lärmpegel, andere Meßwerte  
z.B. Schadstoffbelastung...

Interpolation von  $z_q$  eines Punktes  $Q (x_q, y_q)$ :

$$z_q = a_0 + a_1 x_q + a_2 y_q$$

auch die Höhen der geg. Punkte genügen dieser Gleichung

$$z_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1$$

$$z_2 = a_0 + a_1 x_2 + a_2 y_2$$

$$z_3 = a_0 + a_1 x_3 + a_2 y_3$$

=> Koeffizienten  $a_0, a_1, a_2$  bestimmbar

=>  $z_i$  eines beliebigen Punktes der Ebene berechenbar



# Bilineare Interpolation

Bei 4 geg. Punkten: 2 Dreiecke

**oder:**

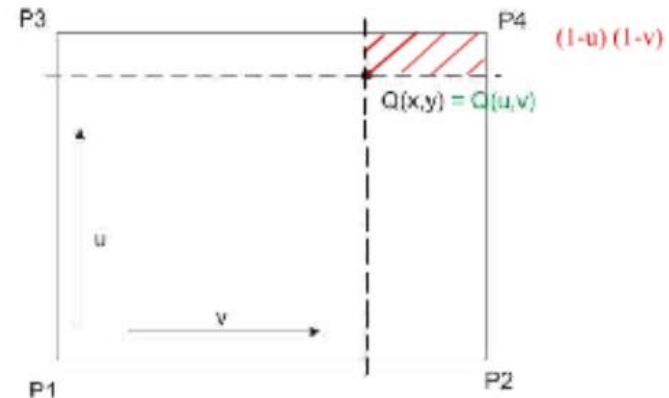
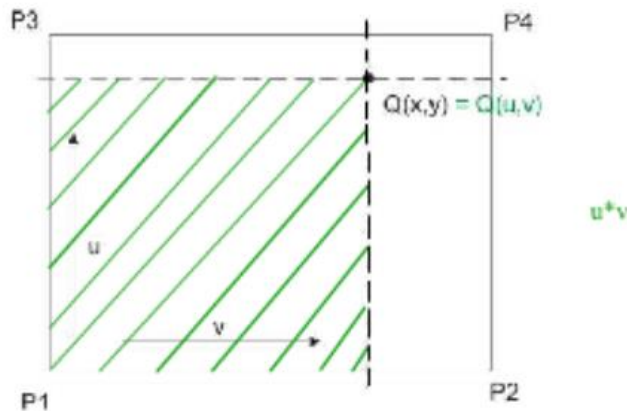
⇒ bilineare Interpolation (Fläche 2. Ordnung! -> hyperbolisches Paraboloid)

$$z(u,v) = (1-u)(1-v) z_{P1} + (1-u) v z_{P2} + u (1-v) z_{P3} + u v z_{P4} \quad u, v = 0, \dots, 1$$

umgeformt:

Interpolation von  $z_q$  eines Punktes  $Q(x_q, y_q)$

$$z_q = a_0 + a_1 x_q + a_2 y_q + a_3 x_q y_q$$



# Digitale Geländemodelle - Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

- DGM – Folgeprodukte
- Einsatzmöglichkeiten von DGM (1)
- Einsatzmöglichkeiten von DGM (2)
- Einsatzmöglichkeiten von DGM (3)

# DGM - Folgeprodukte

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

- Einzelpunkthöhen
- Längsprofile
- Profile für die Orthoprojektion
- Querprofile
- Höhenlinien (Beispiel)
- Höhenschichten (Beispiel)
- Neigungsmodell
- Neigungslinien
- Neigungsklassen (Beispiel)
- Exposition (Beispiel)
- Automatische Schattierung (Beispiel)
- Perspektive bzw. Axonometrische Darstellung (Beispiel)
- Sichtbarkeitskarten (Beispiel)
- Differenzenmodell
- Differenzlinien (auch => Klassen)
- Volumen (z.B. Prismenverfahren, Quaderverfahren)

# Folgeprodukte – Beispiel aus Bayern

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Ammergauer Alpen, Höhenlinien aus DGM 5m, Basiert auf Laserscanning



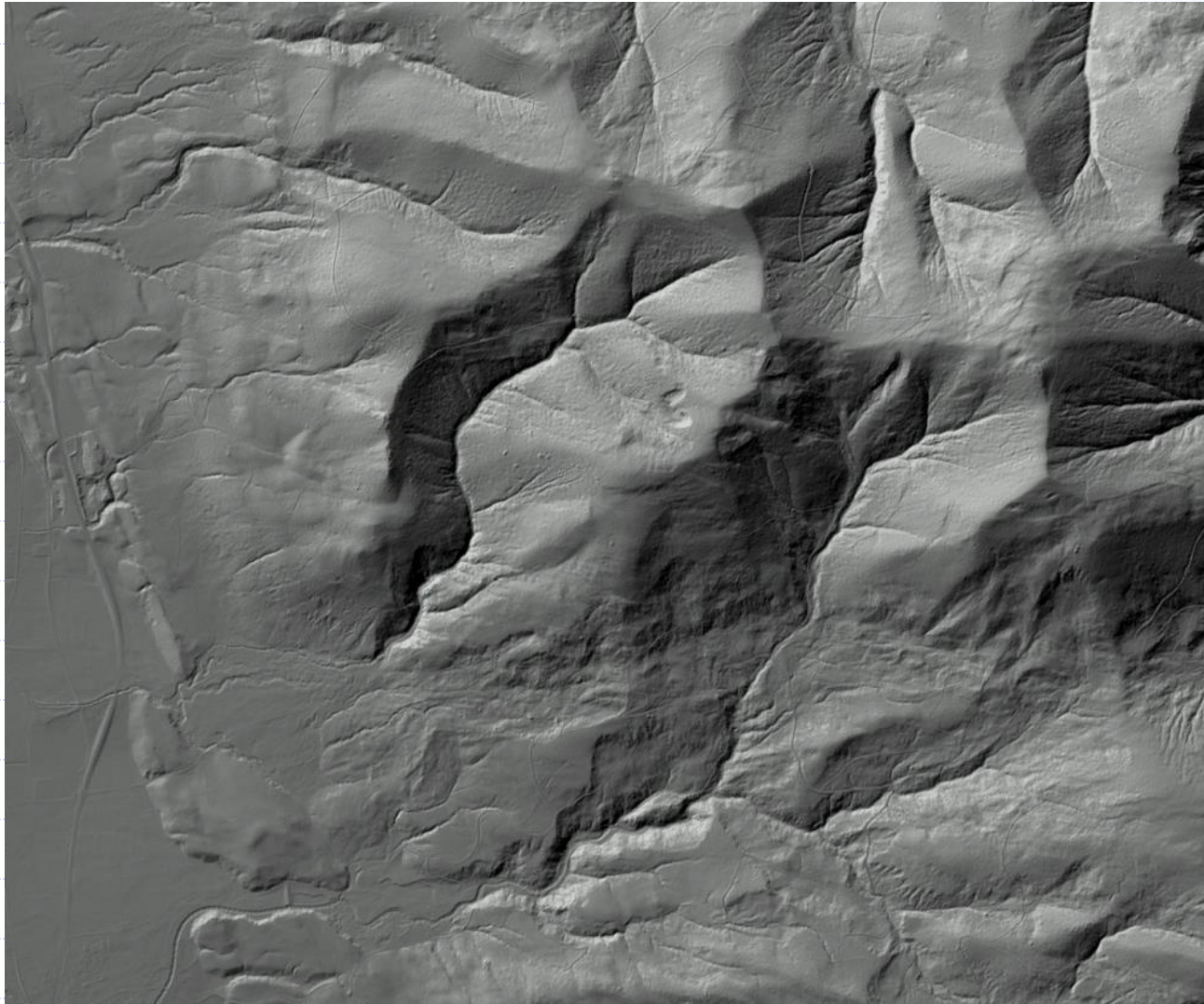


# Folgeprodukte – Beispiel aus Bayern

Ammergauer Alpen, Schattierung („Schummerung“), DGM 2m

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

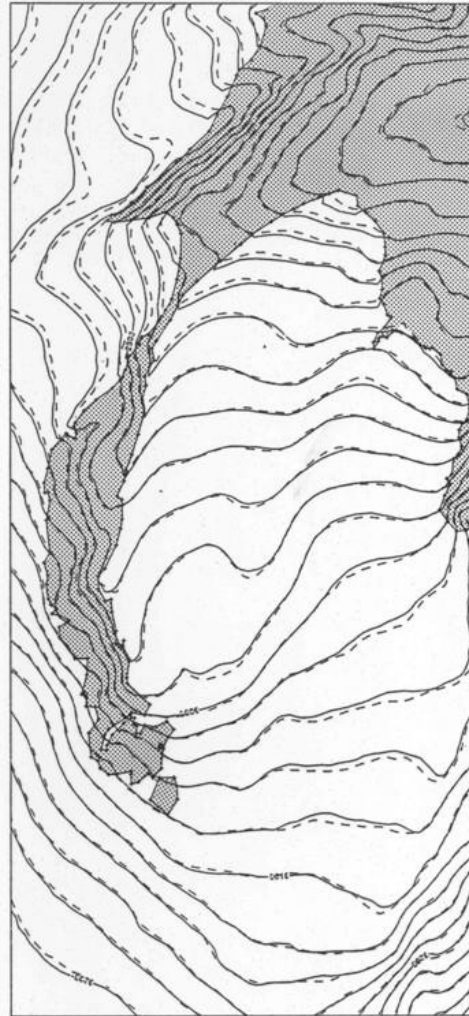


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Höhenlinien  
Hier:  
Für 2 versch.  
Epochen

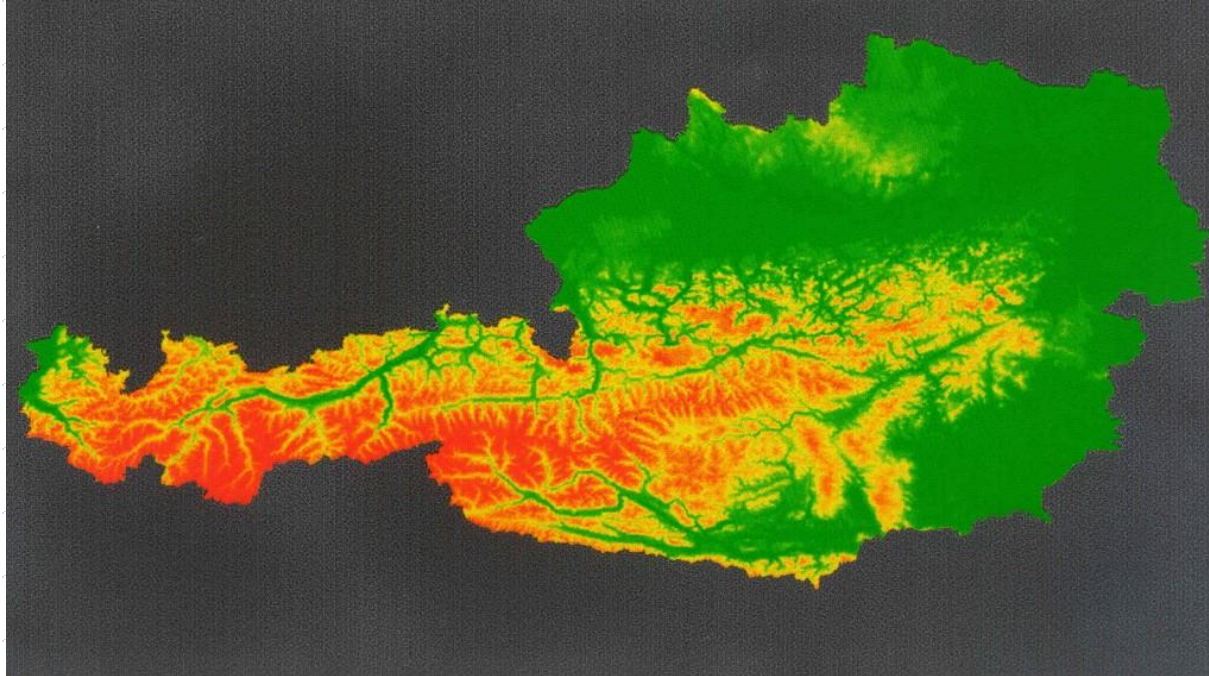


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Höhenschichten



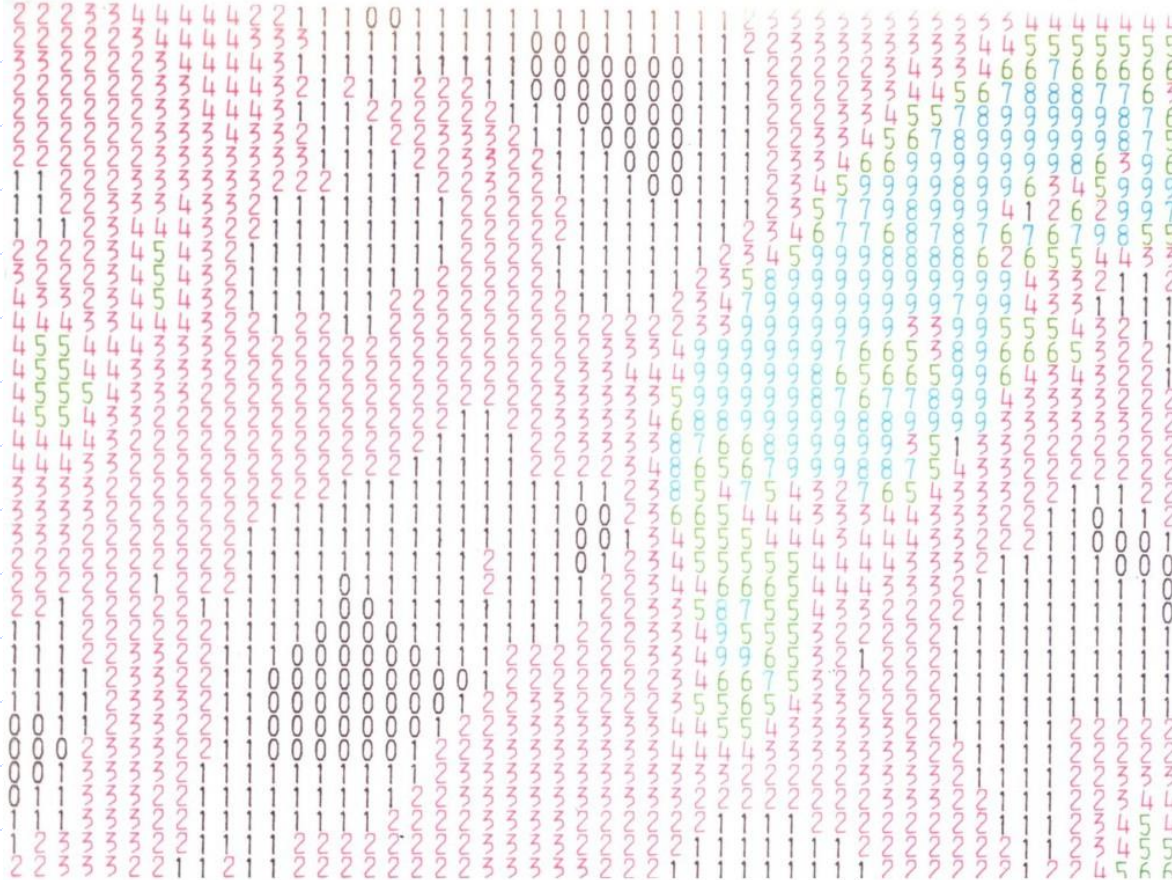


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

## Neigungsklassen



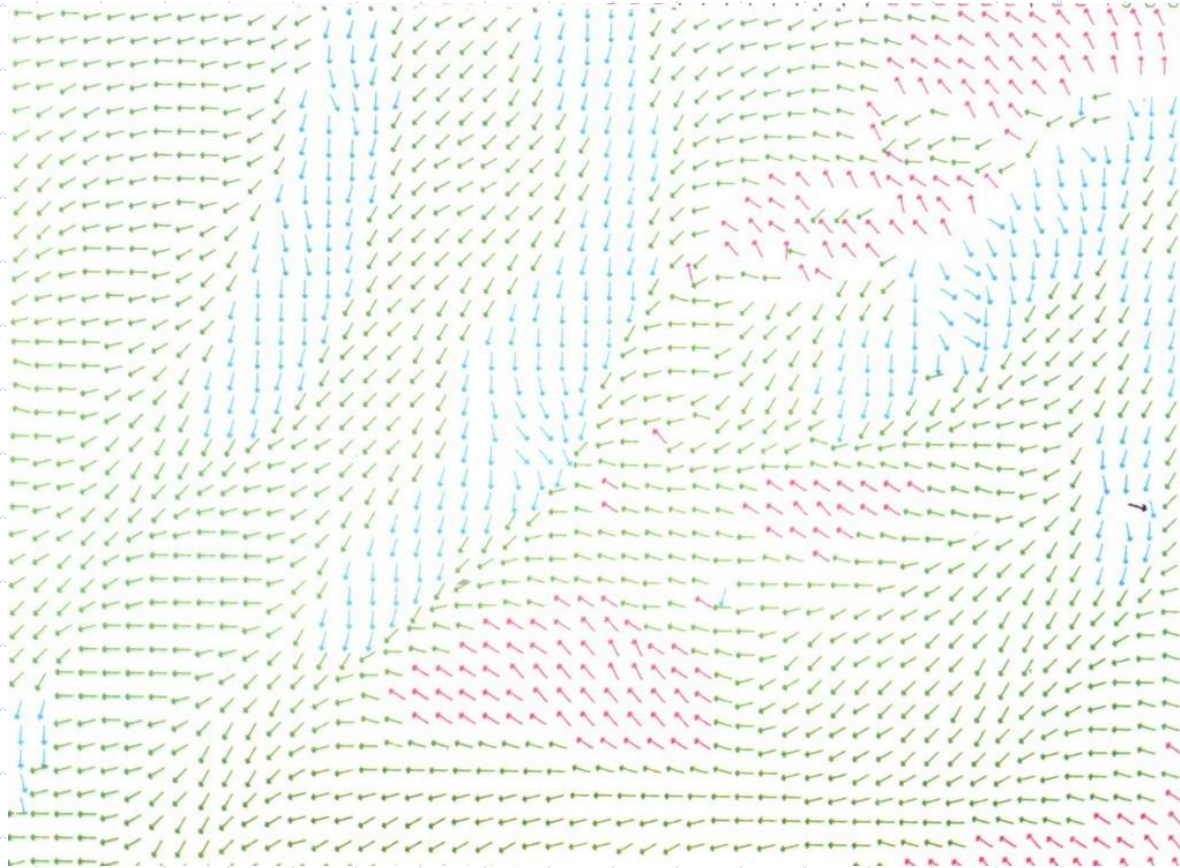


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

Exposition

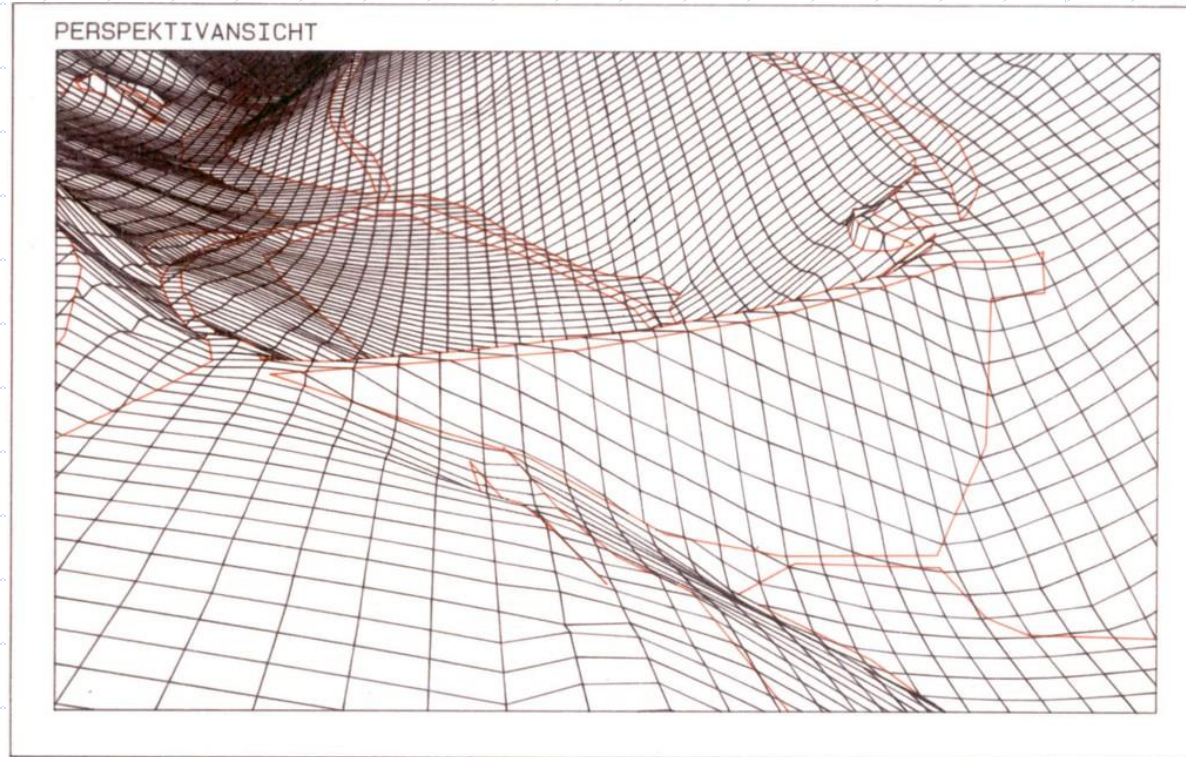


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Perspektive bzw. Axonometrische Darstellung

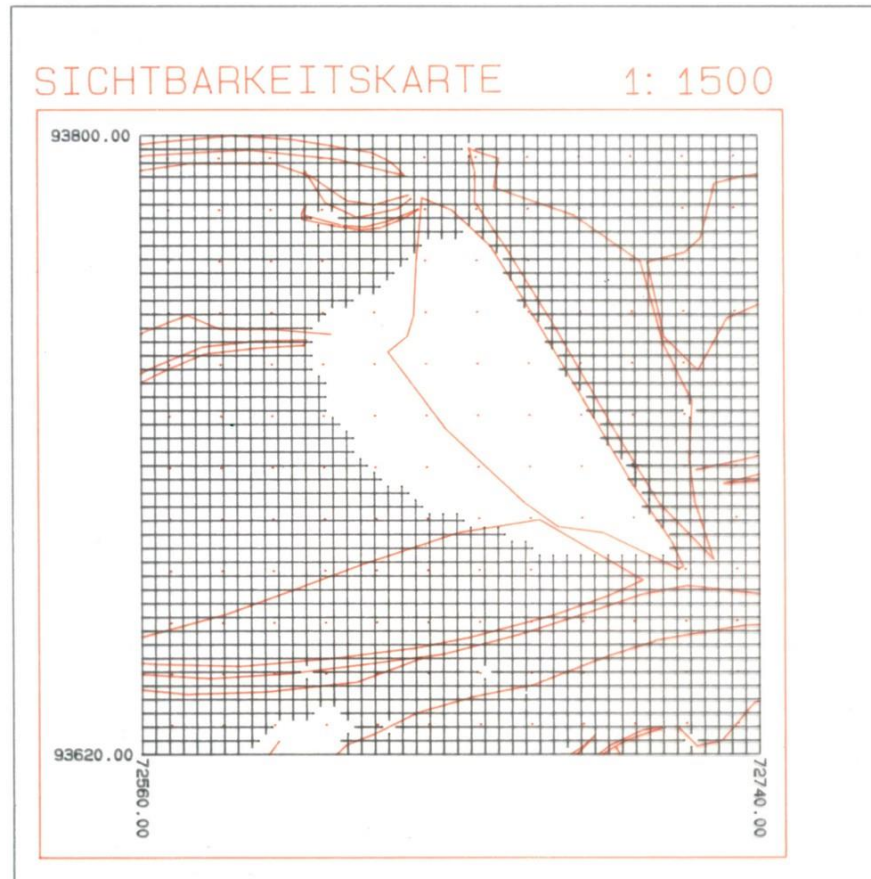


# DGM – Folgeprodukte - Beispiel

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

## Sichtbarkeitskarte



# Einsatzmöglichkeiten von DGM

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

Was kennen Sie bzw. was können  
Sie sich vorstellen?



# Einsatzmöglichkeiten von DGM (1)

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

- **Amtliche Kartographie**
  - Höhenpunkte, Höhenlinien...
- **Flurneuordnung**
  - Neigungsflächen kombiniert mit Flurstücksgrenzen, Bodenwertzahlen...
  - Ermittlung von Abschlagszahlen
  - Ermittlung erosionsgefährdeter Lagen
  - Planungsvisualisierung
- **Verkehrswegebau**
  - Verkehrsachsenermittlung
  - Fahrbahnbreite, Neigung
  - Längs-, Querprofile
  - Planungsvisualisierung

# Einsatzmöglichkeiten von DGM (2)

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und Einsatzmöglichkeiten

## • Städtische Planungen

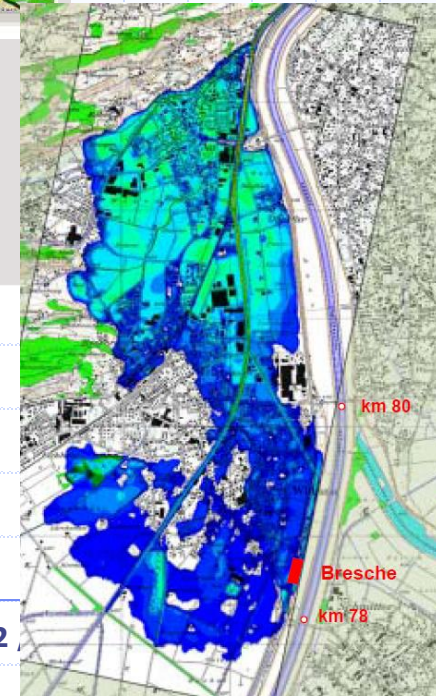
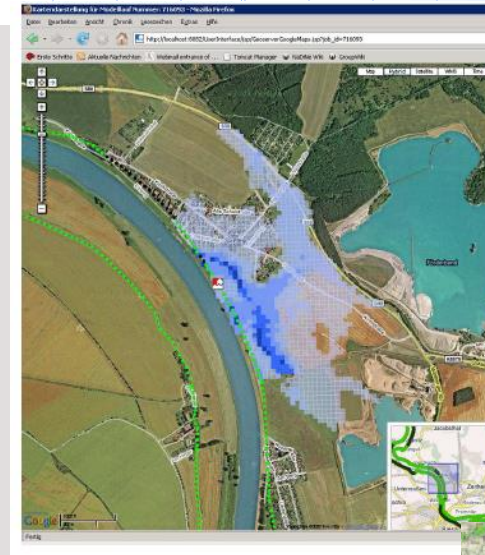
- Ermittlung von Anschlußhöhen
- Planungsvisualisierung
- 3D-Stadtmodelle
- Erdmassenberechnungen
- Lärmbelastigung
- ...

## • Leitungs- und Kanalwesen

- Leitungsprofile
- Berechnung von Oberflächenabständen
- Höhen für Anschlüsse

## • Wasserwirtschaft

- Flußprofile
- Unterwassermodelle (-> Schiffbarkeit)
- Hochwassersimulation u.ä. (Beispiele: 1, 2)



# Einsatzmöglichkeiten von DGM (3)

DGM – Strukturierung

DGM – Folgeprodukte und  
Einsatzmöglichkeiten

- **Glaziologie**
  - Volumensänderungen
- **Leitungs- und Kanalwesen**
  - Leitungsprofile
  - Berechnung von Oberflächenabständen
  - Höhen für Anschlüsse
- **Industrie**
  - dreidimensionale Phänomene in Chemie und Physik
- **Nachrichtentechnik**
  - Senderstandorte
- **Militärische Anwendungen**
  - Flugsimulatoren
  - Sichtbarkeitsanalysen
  - Entzerrung von Satellitenszenen
  - ...
- **Visualisierung von Geländedaten / GIS-Daten**
- .....



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**  
**Weitere Fragen?**