



Seminar „Mustererkennung in Bildern und 3D-Daten“  
bei Prof. Dr. Kurth, Lehrstuhl Grafische Systeme

# Segmentierung mit einem Kurven- Adjazenzgraphen, basierend auf der Wasserscheidentransformation

(nach Thierry Géraud,  
EPITA Research and Development Laboratory)

Ben Schuffenhauer

# Inhalt

1. Einleitung
2. Segmentierung  
(am Beispiel der Extraktion von Strassennetzen aus Satellitenbildern)
  - 2.1. Wasserscheidentransformation
  - 2.2. Flächenschließung
  - 2.3. Konstruktion eines Kurven-Adjazenzgraphen
  - 2.4. Markov'sche Relaxation mittels Zufallsfeldern
3. Zusammenfassung
4. Literaturquellen

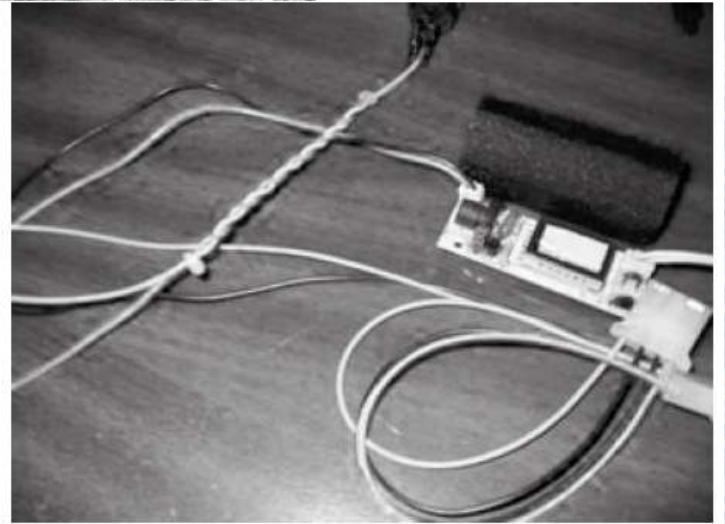
# 1. Einleitung

## Segmentierung eines Bildes:

- Einteilung in verschiedene Regionen die gewisse Einheitlichkeitsbedingungen erfüllen
- z.B. schwache Grauwertschwankungen, homogene Texturen etc.
  
- elementare Bildelemente (Pixel) werden zusammenhängende Pixelmengen (Regionen)
- Regionengrenzen können Bildobjekte markieren
  
- ⇒ zur Durchführung von Messungen auf Regionen oder Prüfen räumlicher Beziehungen zwischen Regionen
  
- ⇒ Bildsegmentierung spielt Schlüsselrolle für quantitative Interpretation von Bilddaten oder Objektextraktion aus Bilder
  
- Darstellung segmentierte Bilder als Grauwertbild, jede Region erhält verschiedenen Grauwert
- Alternativ: binäre Darstellung (Schwarz/Weiß) zur alleinigen Anzeige von Regionengrenzen

- Viele Verfahren zur Segmentierung bzw. Extraktion kurvenförmiger Strukturen aus 2D-Bildern bekannt, aber häufig Nachteile
- **Kantendetektion:**
  - Direkte Linienerkennung der Bildobjekte
  - benötigt Startpunkte, berücksichtigt keine Informationen aus umschlossenen Bildregionen
  - ⇒ nur für einfache bzw. sehr spezifische Bildstrukturen
- **Regionenwachstum:**
  - homogene Regionen (geringe Grauwertschwankung) ermitteln
  - rekursives Wachstum der Regionen bis sie aufeinander treffen
  - ⇒ aufwändig bei unregelmäßigen Regionen oder falls Regionengrenzen nicht mit zu extrahierenden Objekten übereinstimmen
- **hier vorgestelltes Verfahren:**  
**(Wasserscheidentransformation + Kurven-Adjazenzgraph)**
  - ⇒ Liefert flexible und schnelle Bildsegmentierung
  - ⇒ kann zur Extraktion unterschiedlicher Objekte angepasst werden

Beispielbilder, die kurvenförmige Objekte zur Extraktionen enthalten:

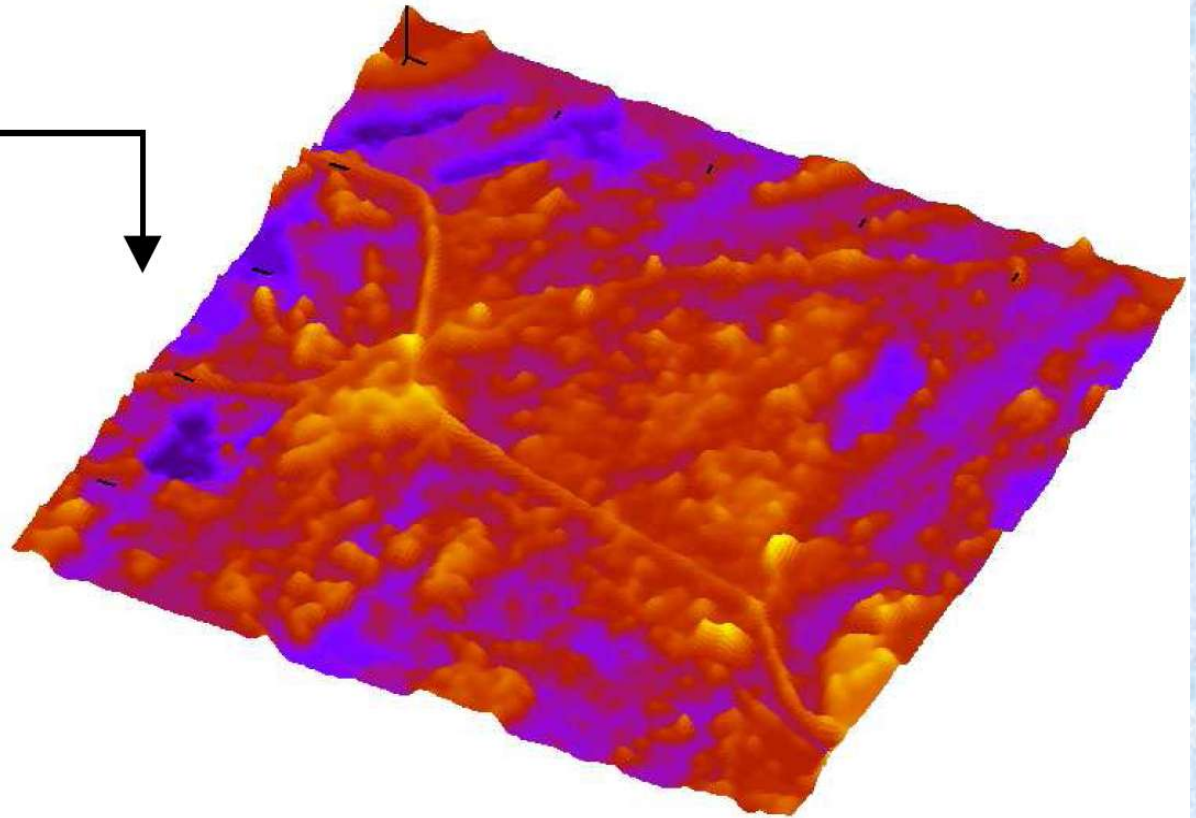


## 2. Segmentierung

⇒ am Beispiel der Extraktion von Strassennetzen aus Satellitenbildern

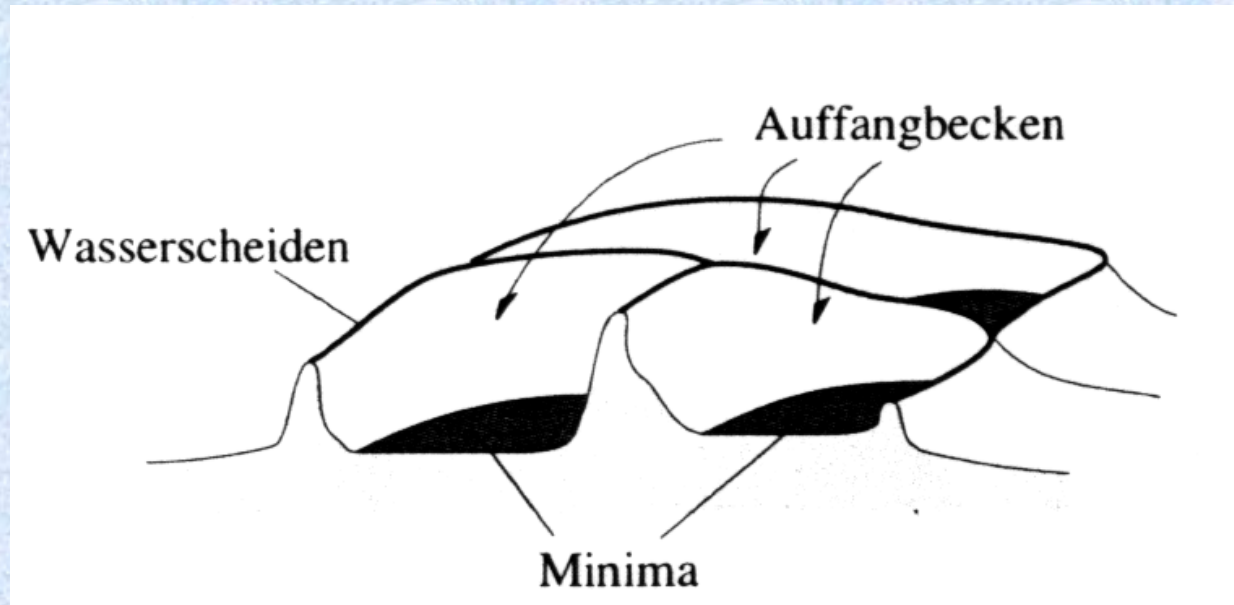
### 2.1. Wasserscheidentransformation

- Vincent und Soille (1991)
  - Morphologischer Algorithmus zur Segmentierung von Bildern bzw. Extraktion von Objekten
  - allgemeiner Ansatz:
    - Transformation des zu segmentierenden Bildes in Grauwertbild
- ⇒ Objektkonturen durch unterschiedlich starke Intensitätsschwankungen des Grauwertes gekennzeichnet



## Satellitenbild mit Strassenetz

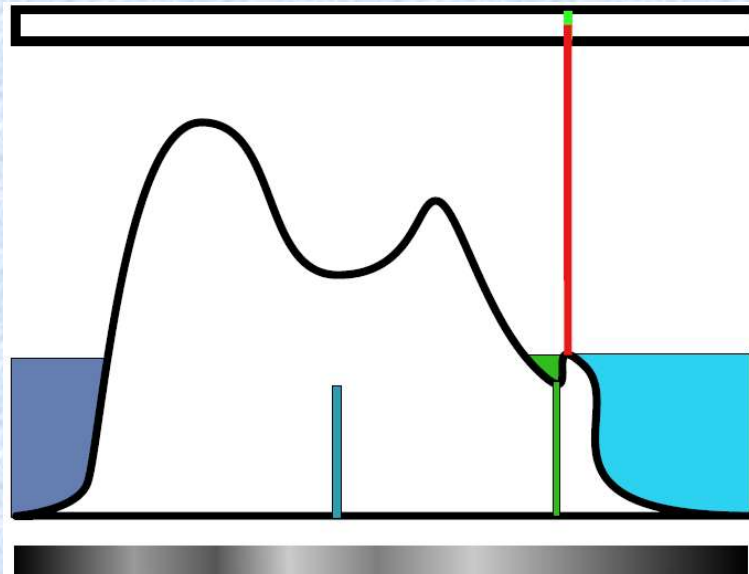
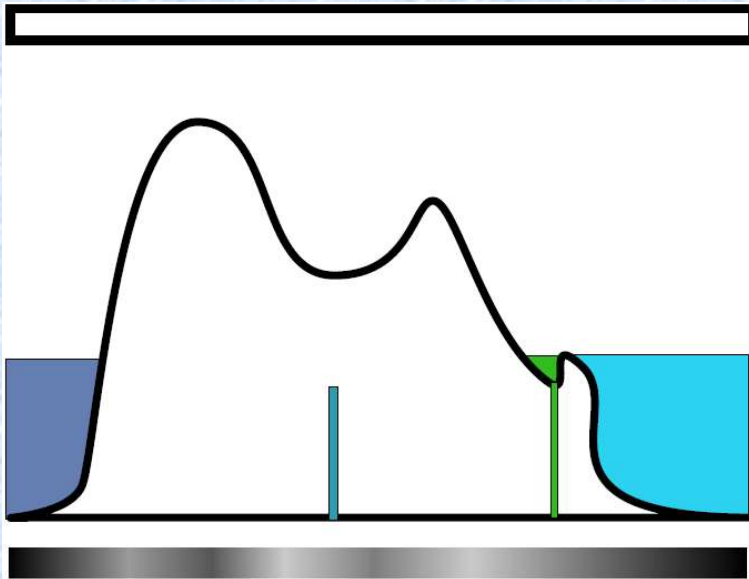
- Darstellung des zweidimensionalen Grauwertbildes als dreidimensionale topografische Landschaft
  - ⇒ Grauwert entspricht Höhe (je heller desto höher)
- Wassertropfen die auf Oberfläche fallen, fließen entlang der steilsten Abhänge in lokale Minima (Vertiefungen)



- Punktemengen an Oberfläche deren steilste Abhänge alle in selbes *Minimum* führen, bilden *Auffangbecken*
  - benachbarte Auffangbecken durch ein Pixel breite Linien getrennt, sog. *Wasserscheiden*
- ⇒ *Wasserscheiden* liefern Segmentierung des Bildes in getrennte *Regionen* (mögliche Objektkonturen)

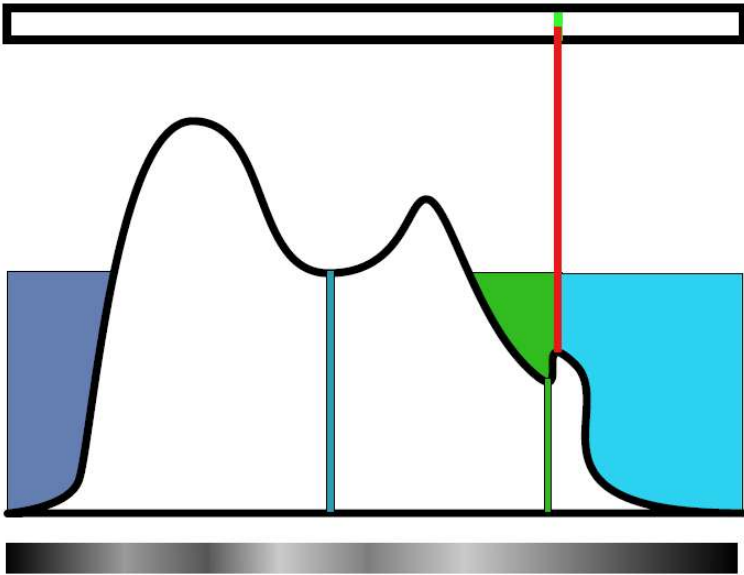


# Wasserscheidentransformation durch Simulation von Überflutungen

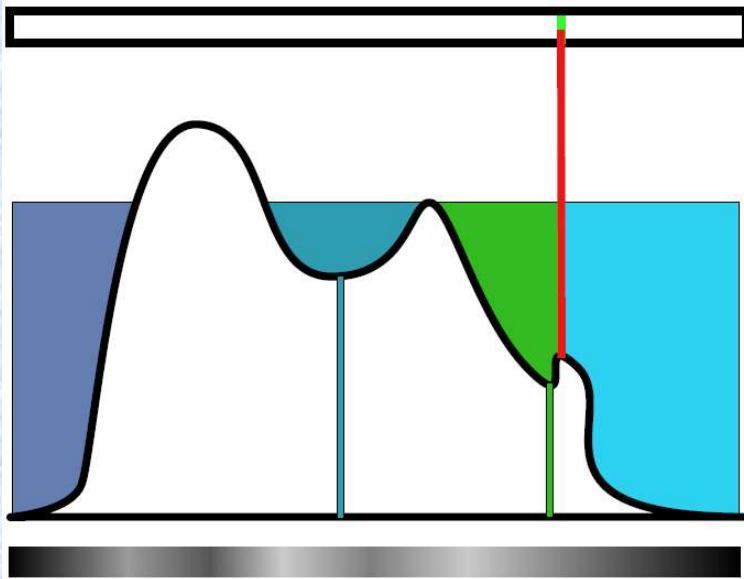


⇒ Hier anschauliche Erklärung, eigentlicher Algorithmus arbeitet auf reiner Pixelebene

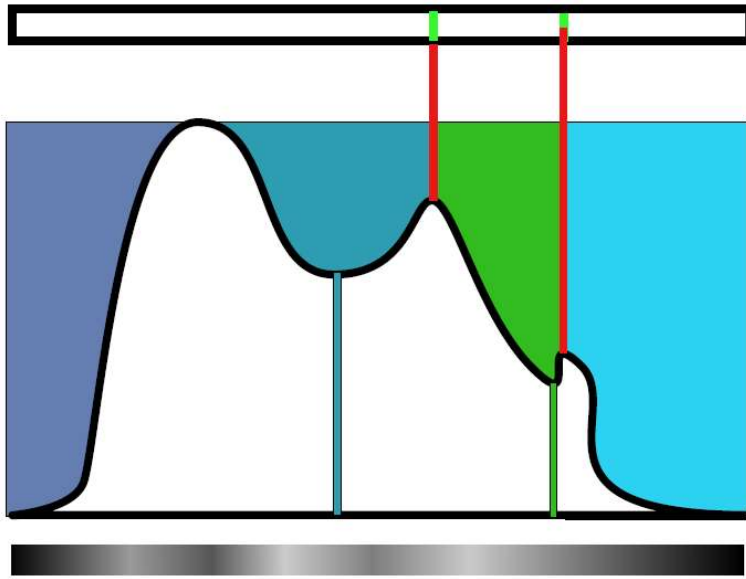
- Grauwertbild als eindimensionale topografische Oberfläche dargestellt
- von unten Löcher in jedes regionale Minimum gebohrt
- Oberfläche langsam von unten her mit Wasser überflutet
- beginnend mit Minima der niedrigsten Höhe langsam die Auffangbecken des Bildes geflutet
- um regionale Minima herum entstehen Seen
- Dämme (rot) dort errichtet, wo sich Wasser zweier verschiedener Minima trifft



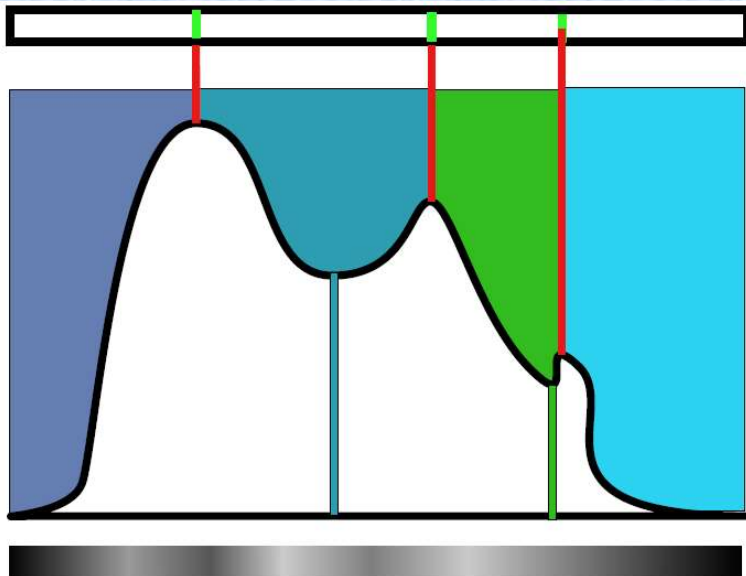
- Errichtete Dämme trennen Wasser verschiedener Auffangbecken



- Überflutung wird nach oben fortgeführt, weitere Seen entstehen in den Auffangbecken höher gelegener lokaler Minima



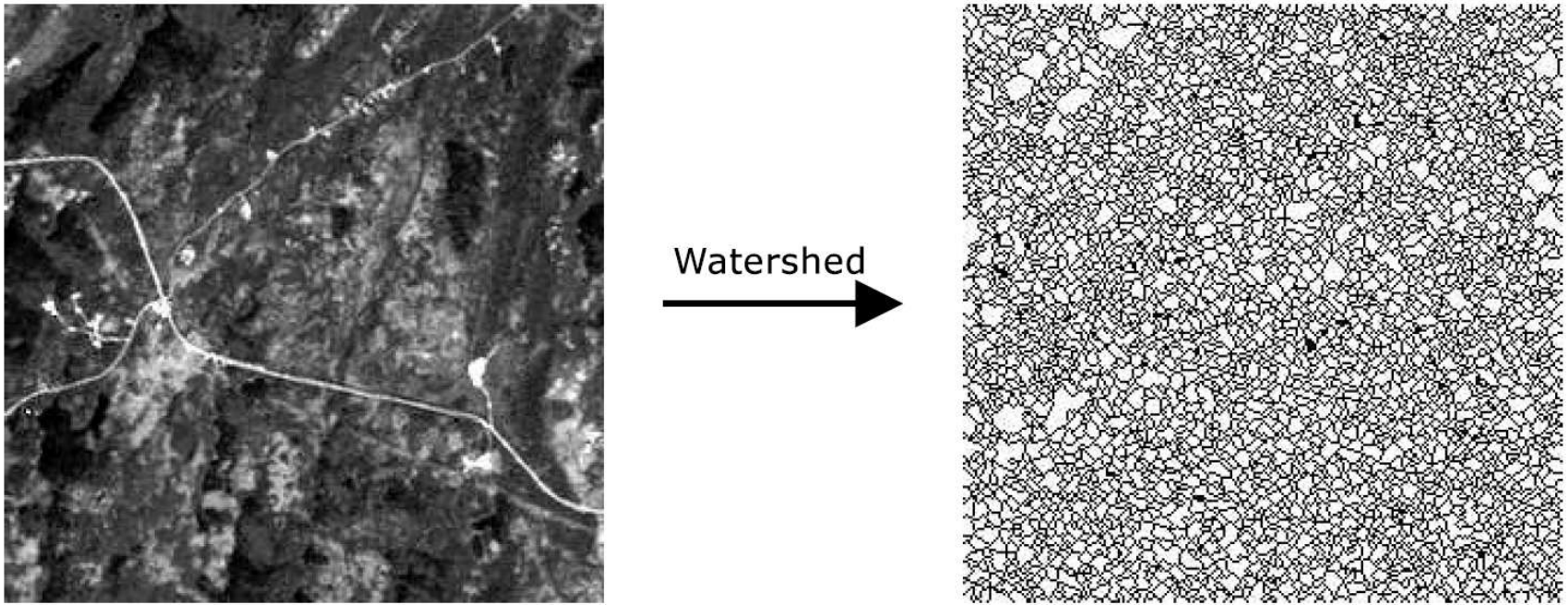
- am Ende des Überflutungsprozesses jedes Minimum von Dämmen umgeben, die die Auffangbecken begrenzen



- Resultierende Dämme entsprechen Wasserscheiden und liefern Segmentierung des Bildes

- Direkte Anwendung der Wasserscheidentransformation zur Extraktion kurvenförmiger Objekte:

Satellitenbild zur Extraktion von Strassennetzen:



- Wasserscheiden sollen den Strassennetz folgen
  - Aber häufiges Problem:
    - hohe Anzahl lokaler Bildminima führt zu einer *Übersegmentierung*
    - zu viele irrelevante Wasserscheiden
- ⇒ Vorverarbeitung des Bildes notwendig
- durch Filterung irrelevante Bildminima möglichst entfernen

## 2.2. Flächenschließung

- in Bildern häufig Rauschen oder irrelevante Bildobjekte in Form kleiner zusammenhängender Komponenten bzw. Artefakte
- Ziel der Flächenschließung:
  - Entfernen zusammenhängender Komponenten im Bild mit einer Fläche kleiner als  $\lambda$ ,  $\lambda \in \mathbb{N}$
  - relevante Objektkonturen möglichst erhalten
- ⇒ Anzahl lokaler Bildminima verringern um Übersegmentierung bei Wasserscheidentransformation zu vermeiden
- Mathematische Definition:

$$\phi_\lambda(f) = \bigwedge_i \{\phi_{B_i} \mid \text{Fläche}(B_i) = \lambda\}.$$

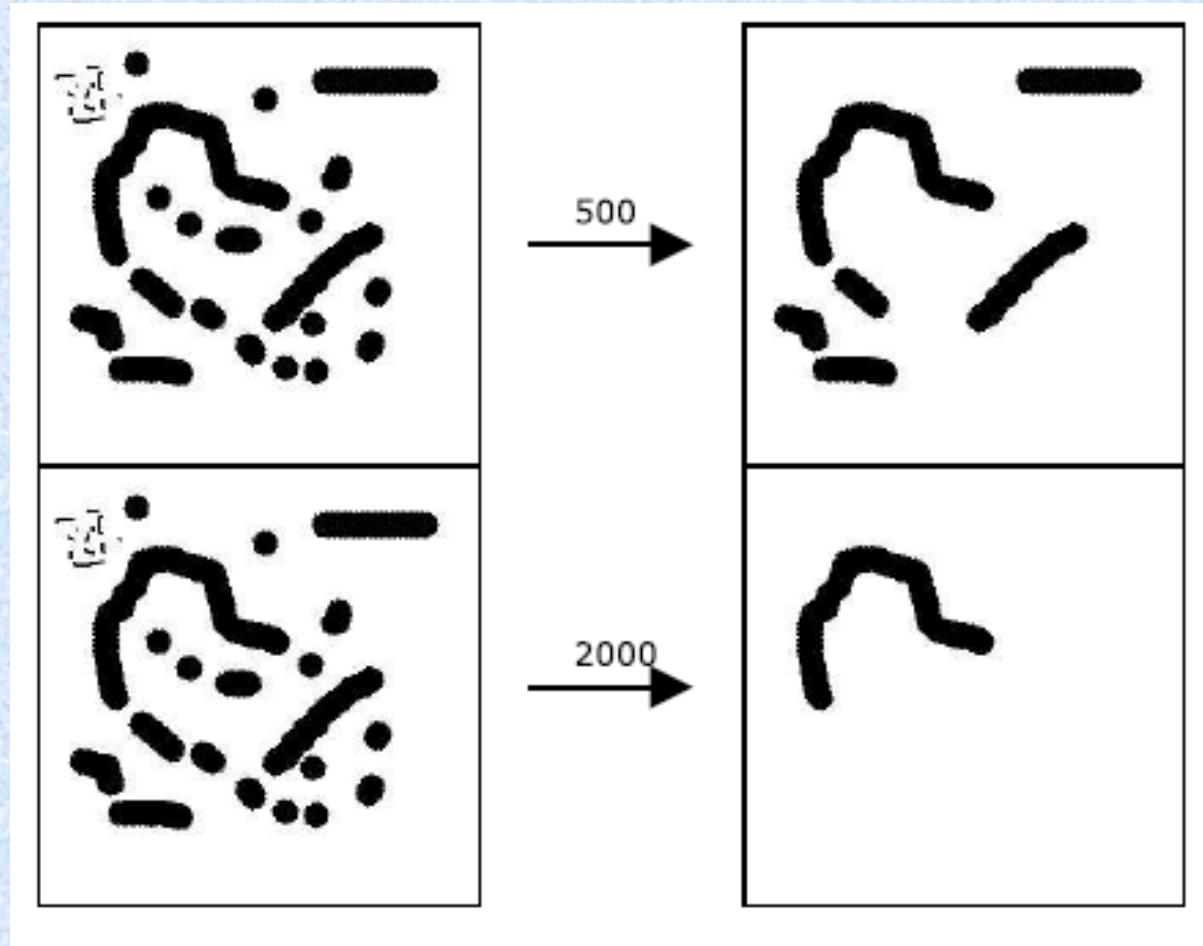
oder auch:

$$\gamma_\lambda^a(X) = \cup \{X_i \mid i \in I, \text{Area}(X_i) \succeq \lambda\}$$

$(X_i)_{i \in I}$  bezeichnet zusammenhängende Komponenten

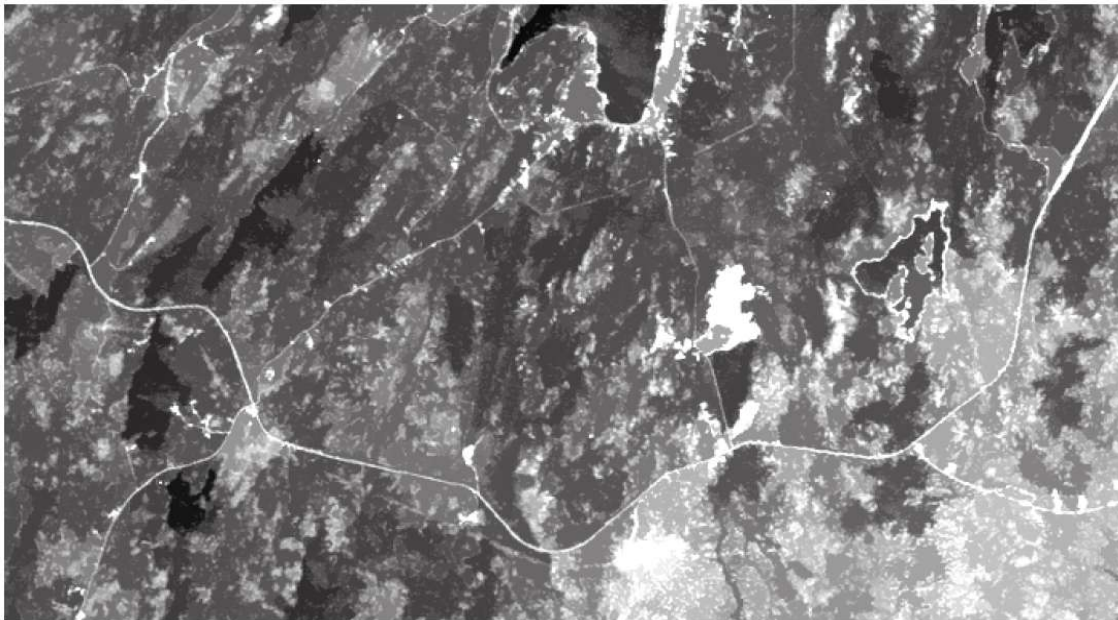
Beispiel:

Flächenschließung bei Binärbildern mit  $\lambda = 500$  und  $\lambda = 2000$  Pixel





- Grauwertbild im Original



- nach Flächenschließung:  
Bildminima mit einer Fläche  
(Einflusszone) geringer als  
 $\lambda = 500$  Pixel entfernt
- ⇒ topografische Darstellung  
eingeebnet



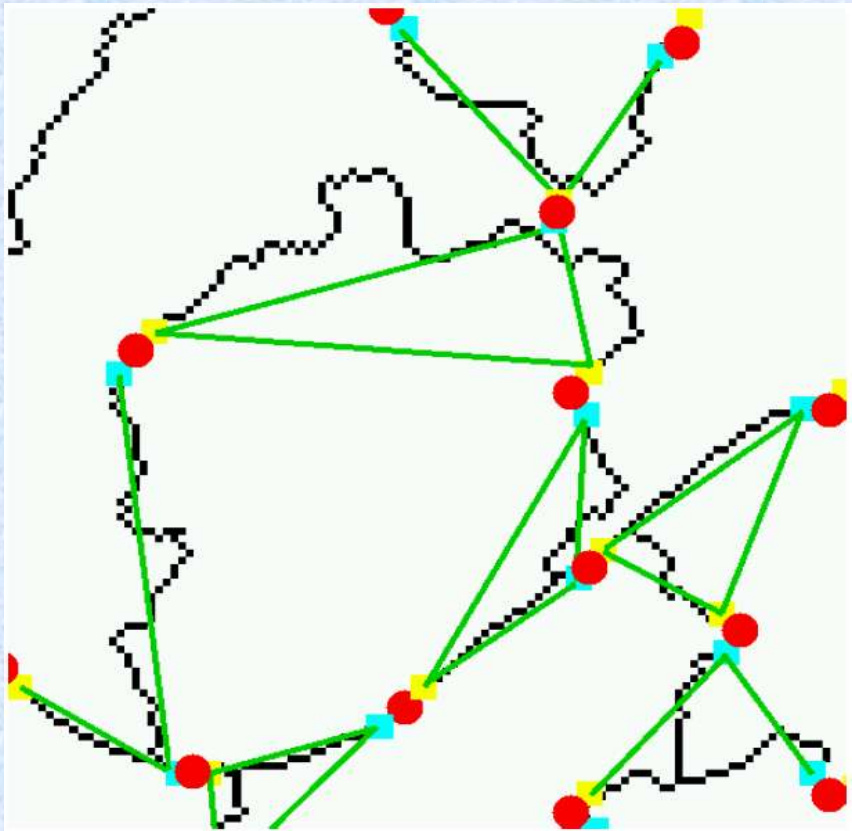
Ergebnis der Wasserscheidentransformation nach vorheriger Flächenschließung

- Anzahl der Wasserscheiden deutlich geringer
  - immer noch viele Linien die keine Strassen darstellen
- ⇒ Nachbearbeitung notwendig um ausschließlich Strassen zu extrahieren

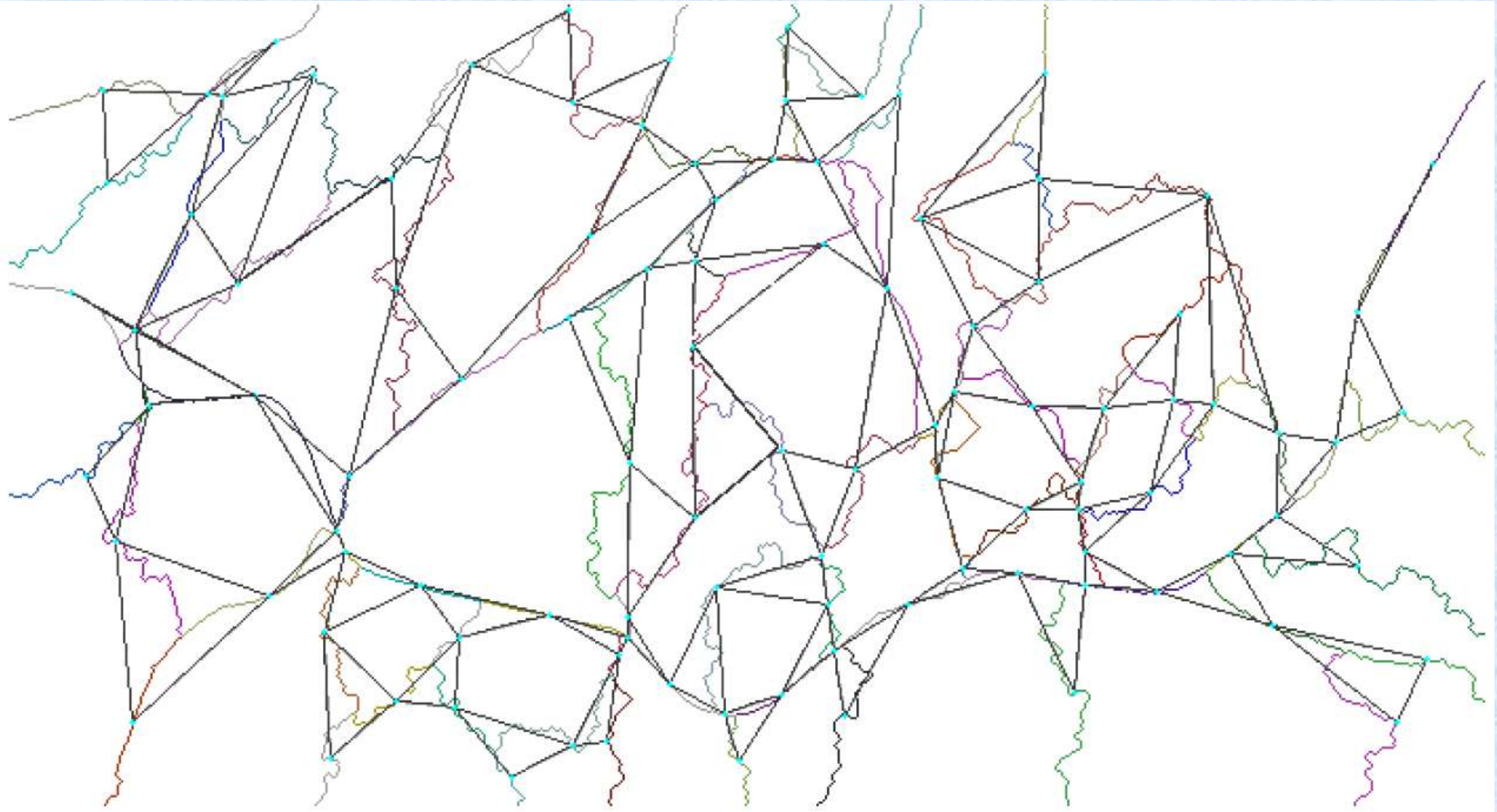


## 2.3. Konstruktion eines Kurven-Adjazenzgraphen

⇒ Hilfsmittel zur Selektion relevanter Wasserscheiden die Strassenverlauf darstellen



- Knoten des Graphen (rot) repräsentieren jeweils eine Wasserscheide, die zwei benachbarte Auffangbecken trennt
- Zwei Knoten (A,B) sind mit einer Kante (grün) verbunden falls ein Ende der Wasserscheide von A mit einem Ende der Wasserscheide von B verbunden ist
- Unterscheidung zwischen Kanten die durch Verbindung mit dem einen oder anderen Ende der Wasserscheide stammen (gelbe und blaue Anker an den Knoten)
  - ⇒ zur späteren Prüfung geometrischer Nebenbedingungen im Strassennetz



- Vollständiger Kurven-Adjazenzgraph mit Knoten auf allen Wasserscheiden
  - Kanten zwischen Knoten, wo zugehörige Wasserscheiden aneinander treffen
- ⇒ Graph ermöglicht effektive Auswertung relevanter Wasserscheiden für die Extraktion der Strassen

## 2.4. Markov'sche Relaxation

- Selektion relevanter Wasserscheiden durch jeweilige Knotenmarkierung im Adjazenzgraphen:
  - Knoten so markieren, ob zugehörige Wasserscheide „relevantes Objekt“ / „kein relevantes Objekt“
  - Markierung eines Knoten hängt von Markierung seiner Nachbarknoten ab (Wasserscheiden auf Objektkonturen zusammenhängend)
- Lösung:
  - Definition eines *Markov'schen Zufallfeldes* über die Graphenstruktur
  - ⇒ Alle Knoten des Graphen erhalten bestimmte *Energiewerte* die sich aus Nachbarschaft jedes Knoten ergeben
  - ⇒ *Energiewerte* ausschlaggebend für Markierung einer Knotens als relevantes Objekt
  - ⇒ Relevante Objektknoten besitzen niedrige Energien
- Ziel der *Markov'sche Relaxation*:
  - Minimierung der Energie im Graphen durch Suche geeigneter Knotenmarkierung
  - ⇒ so lange verschiedene Konfigurationen ausprobieren bis gesamtes System eine minimale Energie besitzt
  - ⇒ physikalischen Entspannungsprozessen (z.B. Abkühlung) nachempfunden

$$p(y_s | X, Y - y_s) = \frac{1}{z} \exp(- (U_l(x_s, y_s) + U_c(Y_{N_s}))).$$

⇒ Wahrscheinlichkeit dass Konfiguration Lösung des Problems darstellt

- $X$  das untersuchte Feld (über Knoten des Graphen)
  - $Y$  das resultierende Feld nach Entspannung
  - $x_s$  und  $y_s$  kennzeichnet Knoten  $s$   
boolesche Variable (1 = Objekt / 0 = kein Objekt)
  - $Y_{N_s}$  Nachbarschaft eines Knoten  $s$
  - $z$  Normalisierungskonstante
- $U_l(x_s, y_s)$  – lokale Energie:
    - modelliert Informationen über Objekt
    - z.B. Objekt ist weiß, hat geringe Krümmung...
  - $U_c(Y_{N_s})$  – kontextuelle Energie
    - modelliert Informationen aus der Objektumgebung
    - z.B. einzelne Objekte oft mit weiteren Objekten verbunden (z.B. Strassenkreuzungen oder Gabelungen)

⇒ Markierungsproblem ausgedrückt als globales Energieminimierungsproblem

⇒ Hohe Lösungswahrscheinlichkeit bei niedriger Gesamtenergie

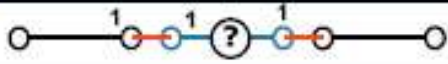
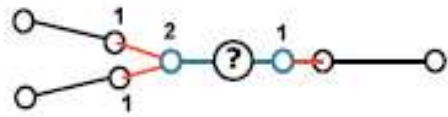
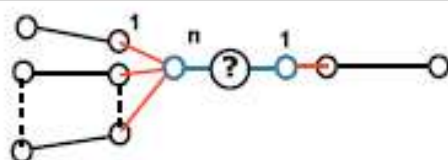
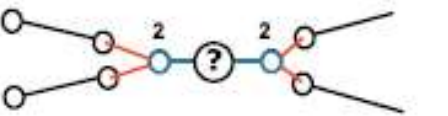
## Energiemodell für ein Strassennetz

- Energie eines Knoten:  $U = U_l(x_s, y_s) + U_c(Y_{Ns})$
- Lokale Energie  $U_l(x_s, y_s)$  :
  - hier Krümmungsgrad  $\kappa$  der zum Knoten  $s$  gehörigen Wasserscheide

$$U_{\kappa}(x_s, y_s) = \begin{cases} \kappa(s) / \sum_s \kappa(s) & \text{if } y_s = 1 \\ 0,5 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

- Wasserscheiden mit eher “chaotischen” Verlauf (starke Krümmungsradien) wahrscheinlich nicht Teil des Strassennetzes
  - ⇒ bekommen hohen Energiewert 0,5
- Wasserscheiden mit weichem Verlauf wahrscheinlicher Teil des Strassennetz
  - ⇒ bekommen niedrigen Energiewert

- Kontextuelle Energie  $U_c(Y_{Ns})$  :
  - Ergibt sich aus den Verbindungen mit benachbarten Wasserscheiden (Kanten zwischen Knoten)
  - Konfigurationen mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Strassenverlauf darzustellen bekommen niedrige Energien

Configuration	Probability	U
	High	0
	Medium	0.2
	Low	1
	Low	1

- einfache Linienverläufe und Gabelungen bevorzugt, mehrfache Aufspaltungen von Wasserscheiden werden herausgefiltert
- ⇒ unwahrscheinliche Strassenverläufe unterdrückt

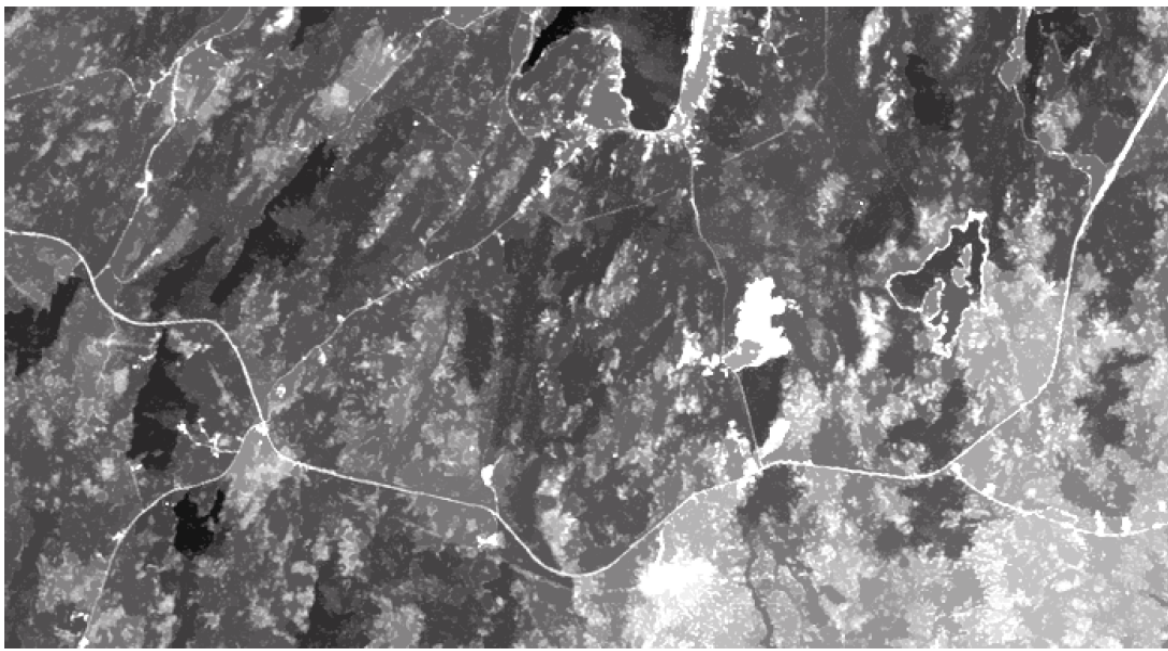
# Vollständiges Verfahren im Überblick



Originales Satellitenbild



Grauwertbild

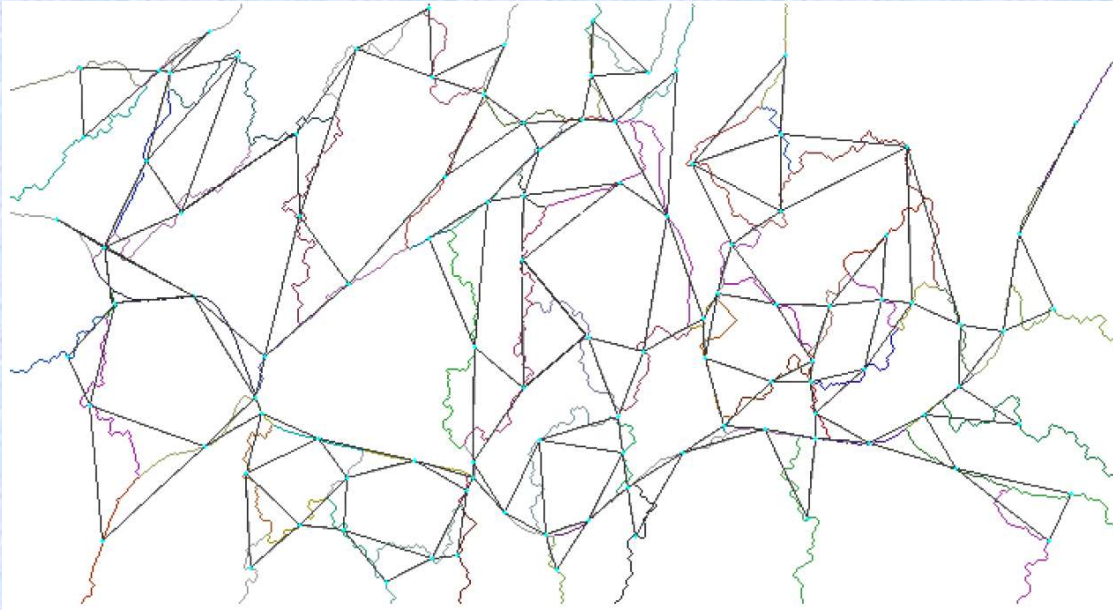


Flächenschließung  
mit  $\lambda = 500$



Wasserscheiden-  
transformation





Kurven-Adjazenzgraph zur  
Anwendung der Markov'schen  
Relaxation



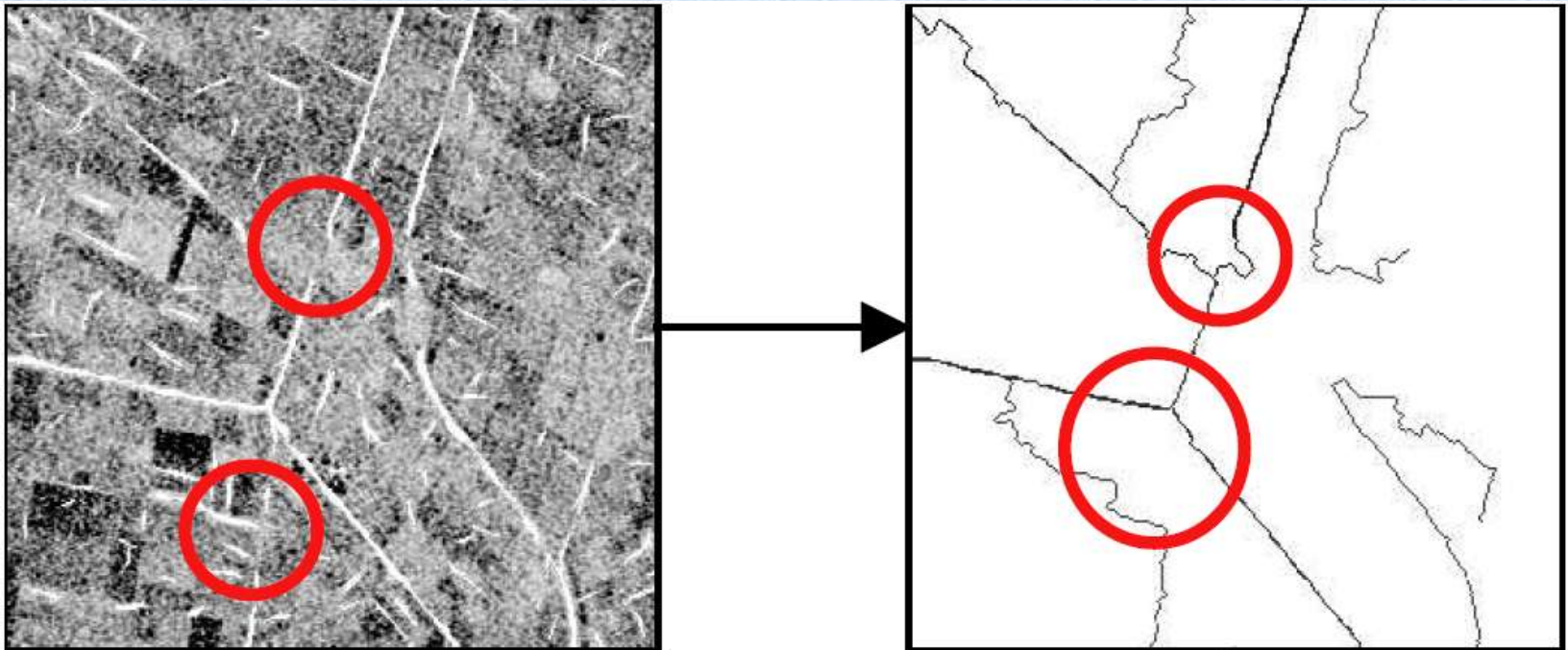
Endergebnis der Segmentierung  
nach Markov'scher Relaxation

⇒ irrelevante Wasserscheiden  
entfernt

⇒ Strassennetz wurde extrahiert

### 3. Zusammenfassung

- Verfahren produziert gute Ergebnisse und kann zur Extraktion verschiedener kurvenförmiger Objektstrukturen angepasst werden
- Löcher und Abweichungen im Strassenverlauf können auftreten bei verschwommenen Bildern
  - müssen noch manuell geschlossen werden müssen



- Flächenschließung größeren Einfluss auf Ergebnis der Wasserscheidentransformation
  - bei Bedarf manuell variieren um Herausfiltern bestimmter Details zu verhindern
  
- Energiefunktionen des Markov'schen Zufallsfeldes schwierig zu justieren
  - Ideal wäre schrittweises Erlernen geeigneter Werte durch erfolgreiche Extraktionen ähnlicher Objekte aus mehreren Bildern

## 4. Literaturquellen

- Thierry Géraud : “Segmentation of curvilinear objects using a watershed-based curve adjacency graph.”,  
Lecture Notes in Computer Science 2652 (2003), 279–286
- Ergänzender Text  
Kapitel: „9. Segmentierung“, „4. Öffnung und Schließung“  
Pierre Soille, „Morphologische Bildverarbeitung“,  
Springer, Berlin 1998
- Internet:  
“Fast Road Network Extraction in Satellite Images using  
Mathematical Morphology and Markov Random Fields”,  
Thierry Géraud  
<http://www.lrde.epita.fr/people/theo/papers/03-nsip.pdf>  
  
„Curvilinear objects extraction“, Jean-Baptiste Mouret [http://  
www.lrde.epita.fr/dload  
/20030514-Seminar/mouret0503\\_curvilnear\\_object\\_extraction\\_slide](http://www.lrde.epita.fr/dload/20030514-Seminar/mouret0503_curvilnear_object_extraction_slide)