

# IKÜS – C : Kombination hybrider Messinformationen

von

**Wolfgang Niemeier**

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
Technische Universität Braunschweig

KFKI-Seminar, Bremerhaven 5.11.2008

# Inhalt

- **Aufgabenstellung**
- **Datenbasis**
  - Nivellements
  - GPS
  - Direkte Bestimmung von Höhenänderungen
- **Mathematisches Modell für die Kombination**
  - Lineares Bewegungsmodell
  - Flächenhafte Interpolation
- **Ergebnisse**

# **IKÜS : Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik**

**KFKI – Forschungsprojekt (Verbundvorhaben)**

1.10.2005 – 30.09.2008

**Beteiligte :** TU Dresden, Prof. Wanninger (Koordinator)  
LGN Hannover, Dr. Jahn  
BFG Koblenz, Dr. Sudau  
TU Braunschweig, Prof. Niemeier

# Höhenänderungen an der deutschen Nordseeküste

- Heinrich Schütte (1863-1939) postuliert etwa 1904:

## *Die Küste sinkt*

### Basis :

Analyse von geologischen und archäologischen Quellen zum Verständnis der jüngsten Erdgeschichte.

=> Fand z.B. Pflugspuren auf Ackerland,  
das 1,40 m unter heutigem Niveau liegt.

# Grundsätzlich sind zwei Bewegungsmuster möglich

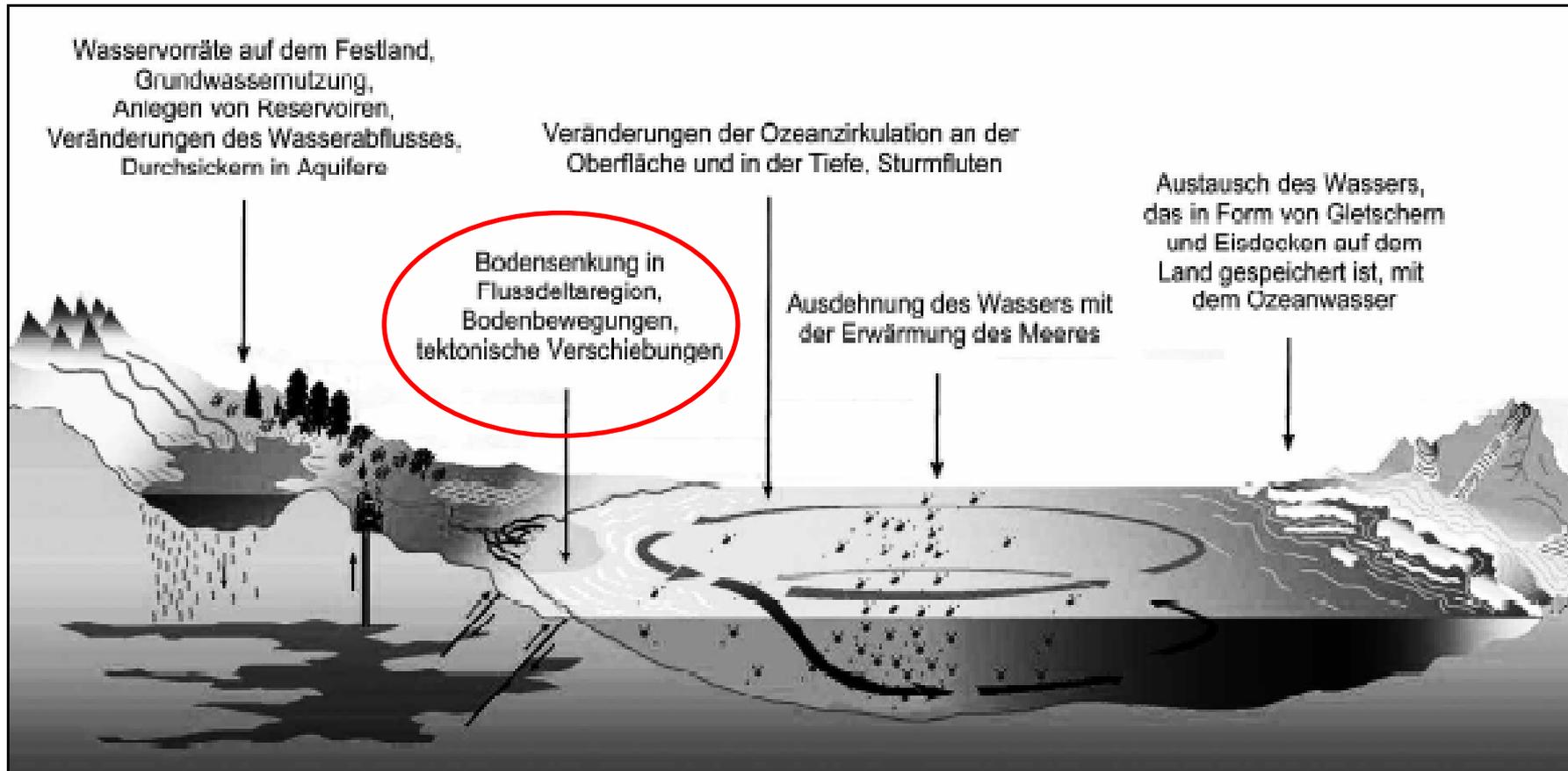
- **Der Meeresspiegel steigt**
- **Die Küste sinkt**

*Transgressionsküste* : Vordringen des Wassers

- **Oder: Kombination aus beiden Effekten**  
=> Ansatzpunkt für das Projekt IKÜS:  
Aufzeigen der landseitigen  
Höhenänderungen an der Nordseeküste

# Was verursacht Veränderungen des Meeresspiegels?

## Einflussgrößen auf den Meeresspiegel



Das Meeresspiegelniveau an der Küstenlinie wird von vielen globalen und lokalen Umweltfaktoren beeinflusst. Diese Faktoren wirken auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen, von Stunden (Tidenhub) bis hin zu Jahrtausenden (Veränderungen des Meeresbodens durch Tektonik und Sedimentation). Auf der Zeitskala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten sind die größten Einflüsse auf den durchschnittlichen Meeresspiegel u. a. mit Prozessen des Klimas und des Klimawandels verbunden.

(Quelle: nach IPCC (2001): *Climate Change 2001 - Synthesis Report*, <http://www.ipcc.ch/pub/nonun.htm>)

# Bisherige Forschungsarbeiten in der Geodäsie zum Aufzeigen der Landsenkungen

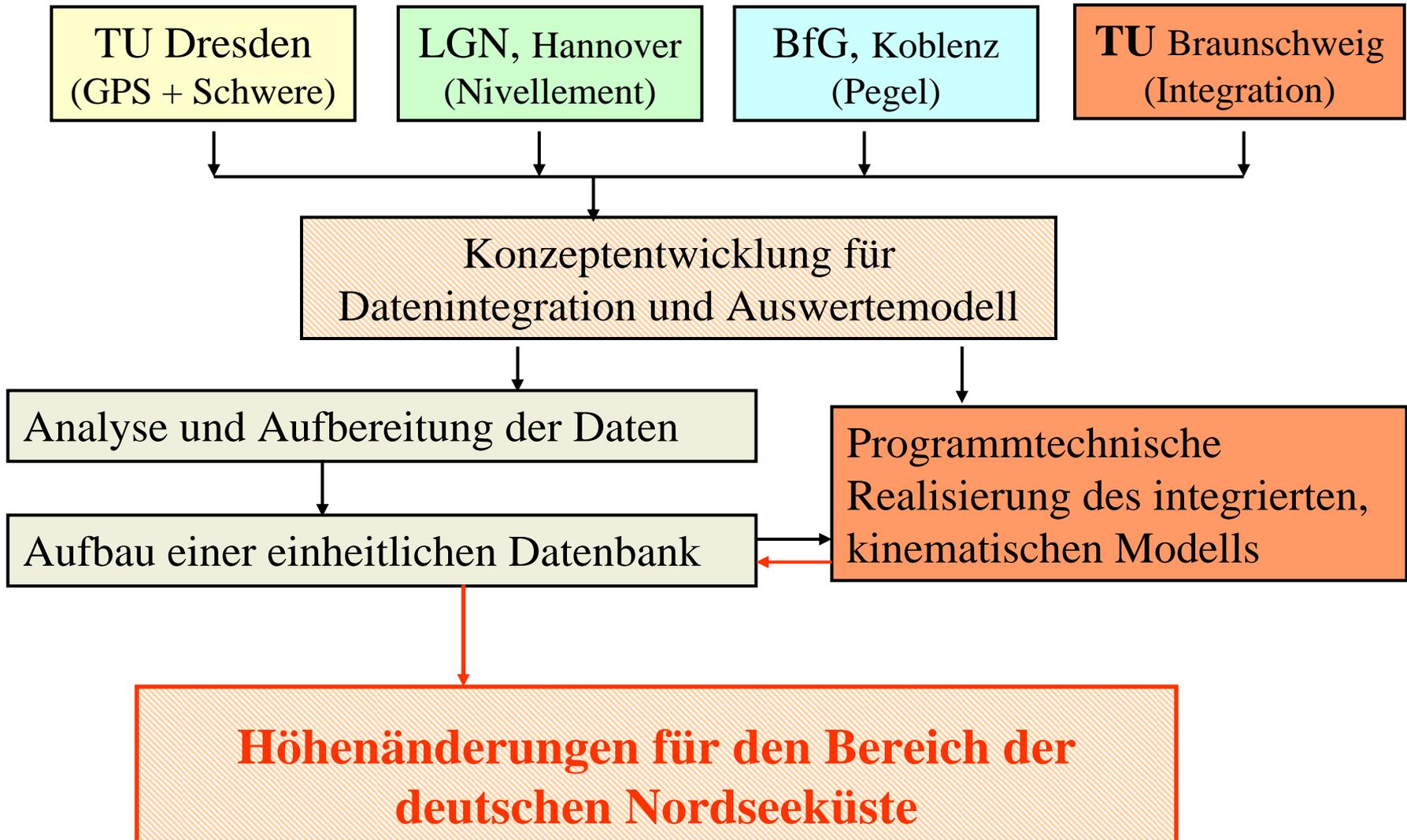
## Messkampagnen:

- Nordsee-Küsten-Nivellements  
NKN I (1928-1937)  
NKN II (1949-1959)  
NKN III (1980-1987)
- NWELL: North-West-European-Lowlands-Levelling (Lucht, Bremen)
- GPS an Küstenpegeln (Augath und Sudau)

## Auswertungen:

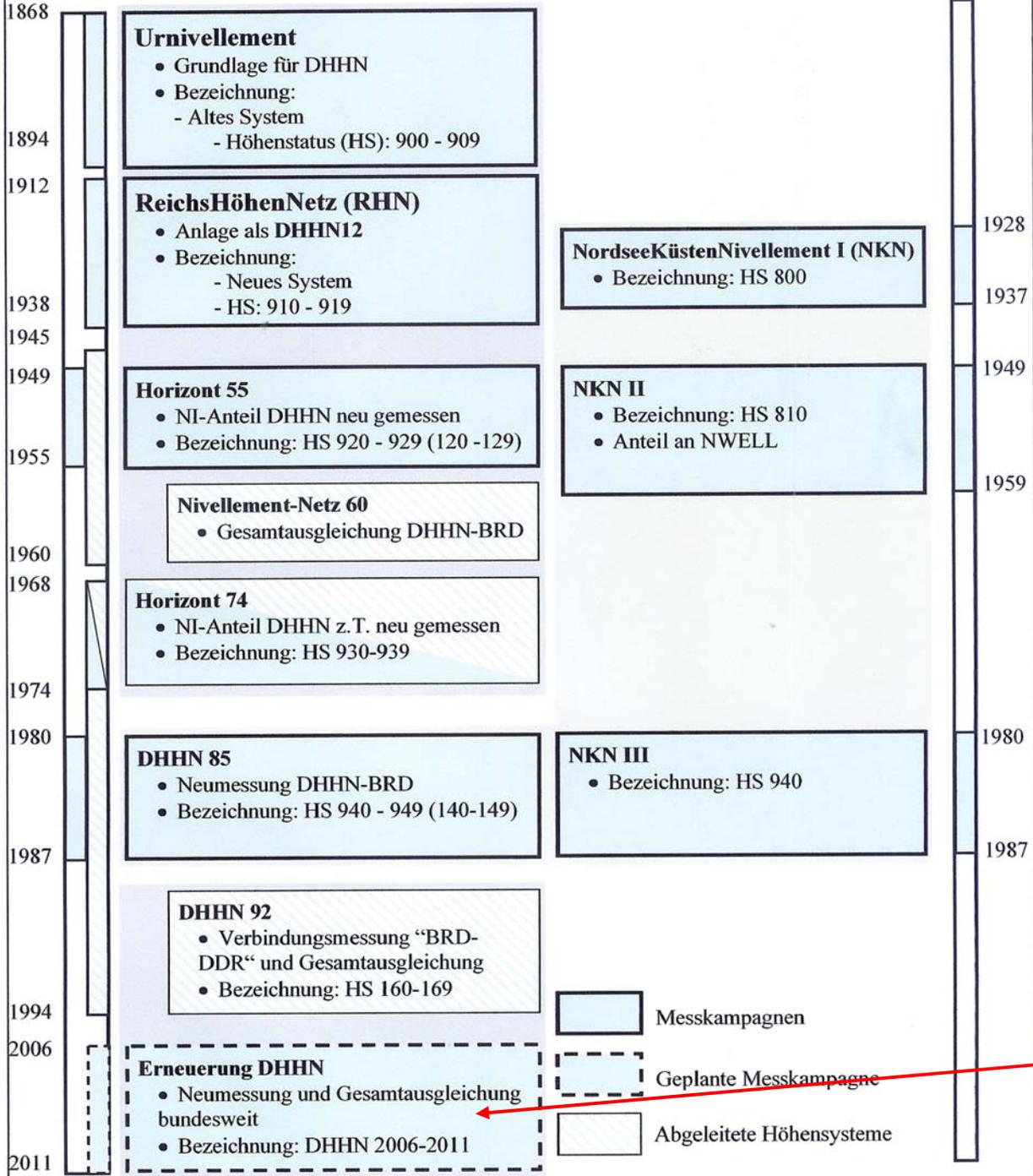
- Signifikanz der Bewegungen und approximierende Neigungsebene (Augath/Pelzer/Niemeier 1979)
- Bewegungsmodell mit Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (Leonhard 1987)
- Flächiges Bewegungsmodell für einzelne Zeitintervalle (Wübbelmann 1995)

# IKÜS Projekt 2005-2008



**Tab. 1: Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von Höhen-Messverfahren**

Messverfahren	Genauigkeitsbegrenzende Einflussgrößen	Länge der Zeitreihe (= notwendige Vorlaufzeit)	Genauigkeit (heute)	
			Höhe	Höhenänderung
<b>Präzisionsnivellement</b>	restliche systematische Effekte (u.a. Refraktion, Grundwasser)	mindestens 3 Messepochen (z.B. NKN: 50 Jahre)	<b>8 mm</b> (NKN: Osnabrück Norderney 200 km)	<b>0,1– 0,3 mm/Jahr</b> (Wolfram 1998) aus kinematischer Netzausgleichung
<b>GNSS (GPS/GLO-NASS, zukünftig Galileo)</b>	Restfehler der Signalausbreitung (Mehrwegeeinflüsse, troposphärische Refraktion), Antennenverhalten	5-10 Jahre für 0,5 mm/Jahr, je nach Stationsdatenqualität (NN-SAT 2002)	<b>4 – 5 mm</b> bei guter Stationsqualität (NN-SAT 2002)	<b>0,5 mm/ Jahr</b> im Projekt zu klären aus Zeitreihenanalyse
<b>Wasserstandsregistrierungen</b>	Globale Änderungen lokale Effekte, Anschluss Höhe	16 Jahre für Korrelationen (Töppe 1993), 100 Jahre für geodätische Zwecke (Liebsch 1996)	im Projekt zu klären	im Projekt zu klären
<b>Präzisions-schweremessungen</b>	Modellierung der Massenänderungen		<b>10 – 15 mm</b> (Richter 1996) (= 30 - 50 $\mu\text{ms}^{-2}$ ) bzw. <b>6-8 mm</b> (= 20 - 25 $\mu\text{ms}^{-2}$ ) (Ihde 2003)	<b>z.Zt. 20 mm</b> $\nabla$ <b>1 mm/ Jahr</b> bei 20 Jahren aus Einzelmessungen

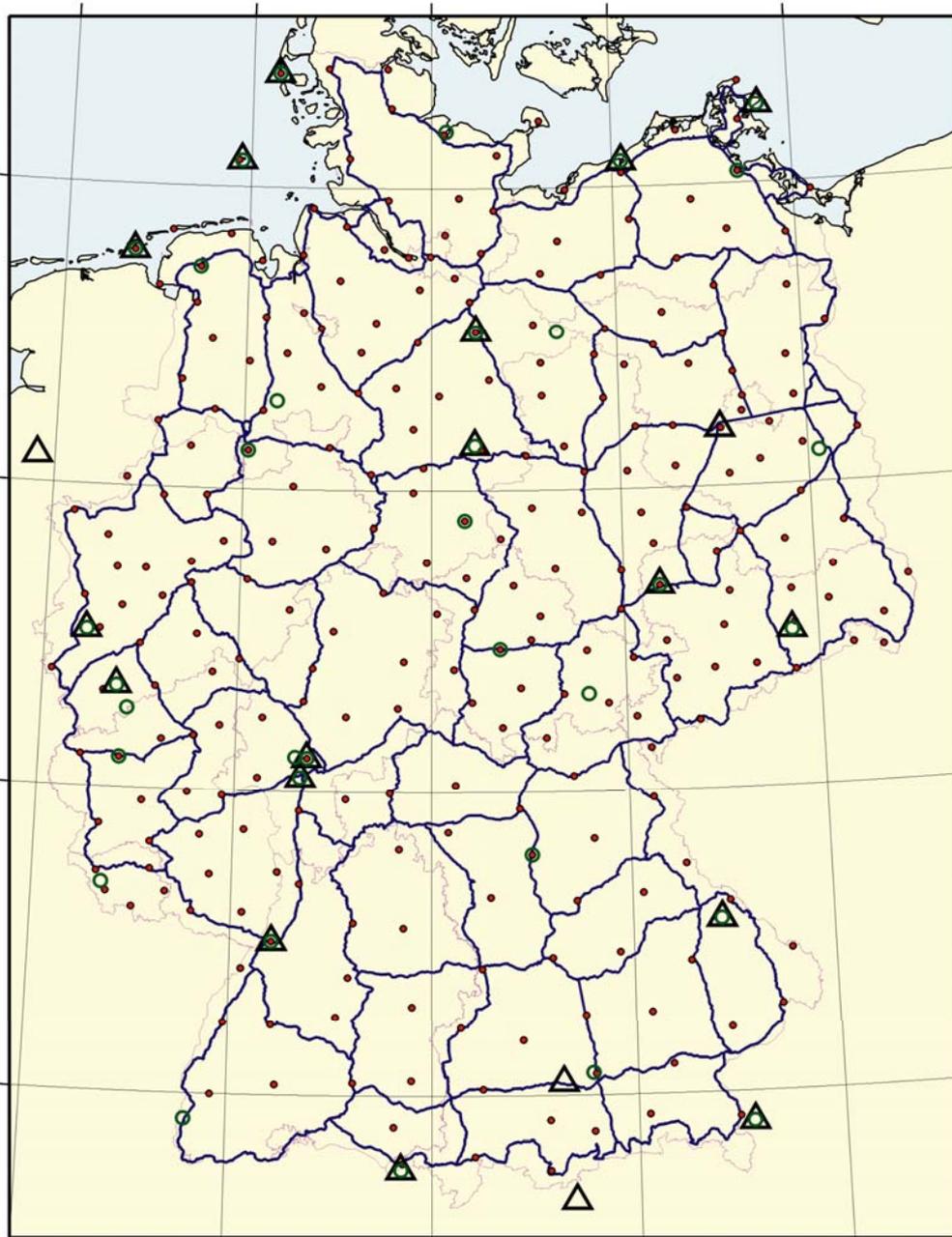


# Vorhandene Nivellements-Information

(aufbereitet bei der LGN in Hannover)

Werden mit Oberflächen-schwerewerten umgerechnet in Geopotentielle Koten:  $C_i$

Derzeit laufende Messkampagne zur Erneuerung des DHHN



## Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes 2006-2011

### Vorgesehene Messungen :

- 14.000 km Nivellement
- GNSS Kampagne mit ca. 250 Punkten :  
geometrischer Bezug zum Nivellement
- SAPOS-Daten
- Absolutschweremessung  
auf GNSS Punkten

# DHHN 12

# NKN I

Vorliegende Daten  
mit Koordinaten



◆ DHHN12 (1977 & 1987)



◆ NKN I (1928 - 1937)



# NKN II

Vorliegende Daten  
mit Koordinaten



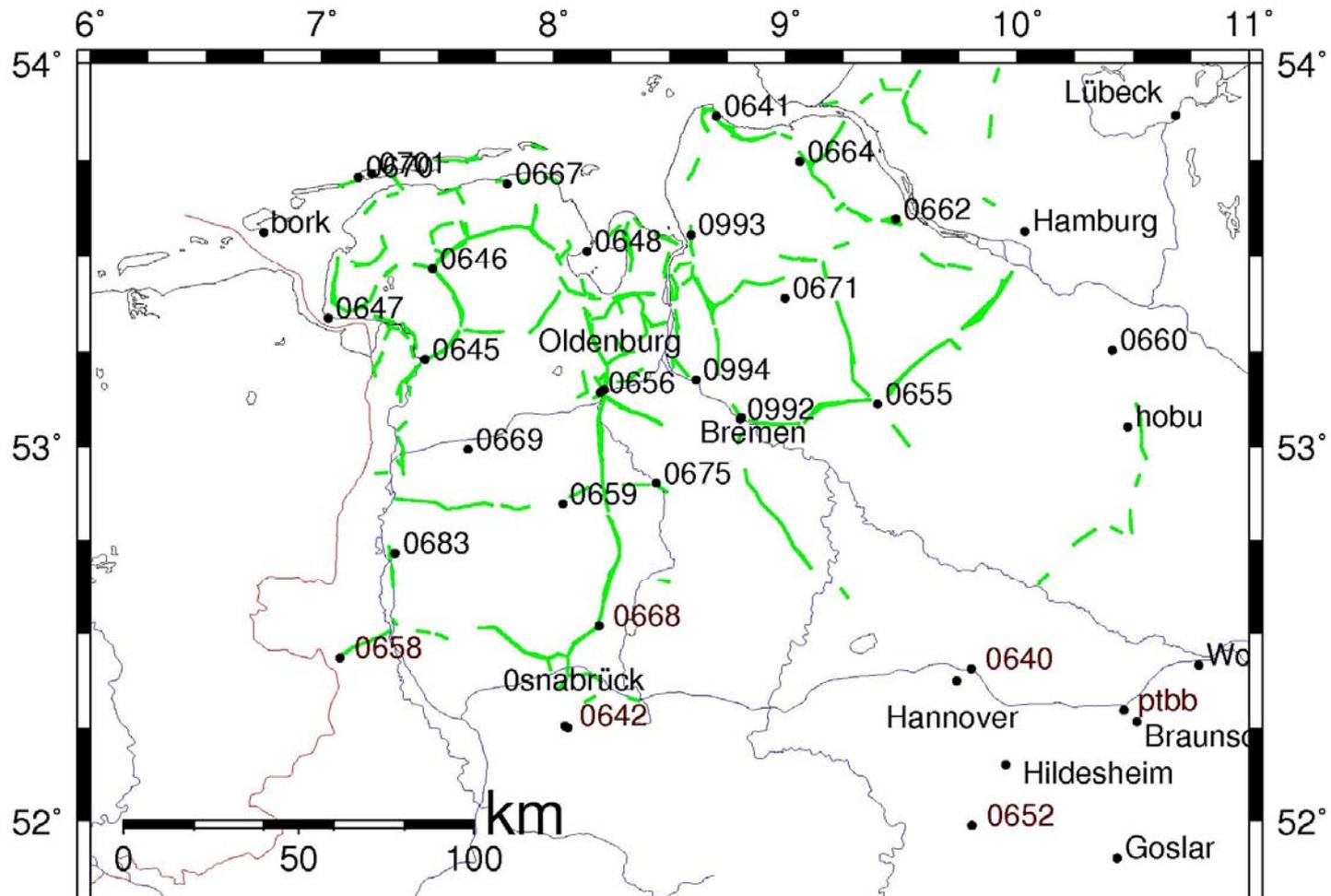
# NKN III



# Auswerteansatz: Doppelte Differenzen

Nivellierte Höhendifferenz zwischen

- zwei Punkten mit geometrischem Mindestabstand von 2 km
- zwei Zeitpunkten mit einem Mindestzeitintervall von 1 Jahr



# Zu nutzende GPS-Informationen

## Verfügbare GPS- Daten

- SAPOS-Stationen in Niedersachsen (ab 1996) inkl. Stationen auf/an Pegeln
- SAPOS-Stationen in Schleswig-Holstein ( ab 2005)
- GREF-Stationen im nordwestdeutschen Bereich

## Reprozessieren

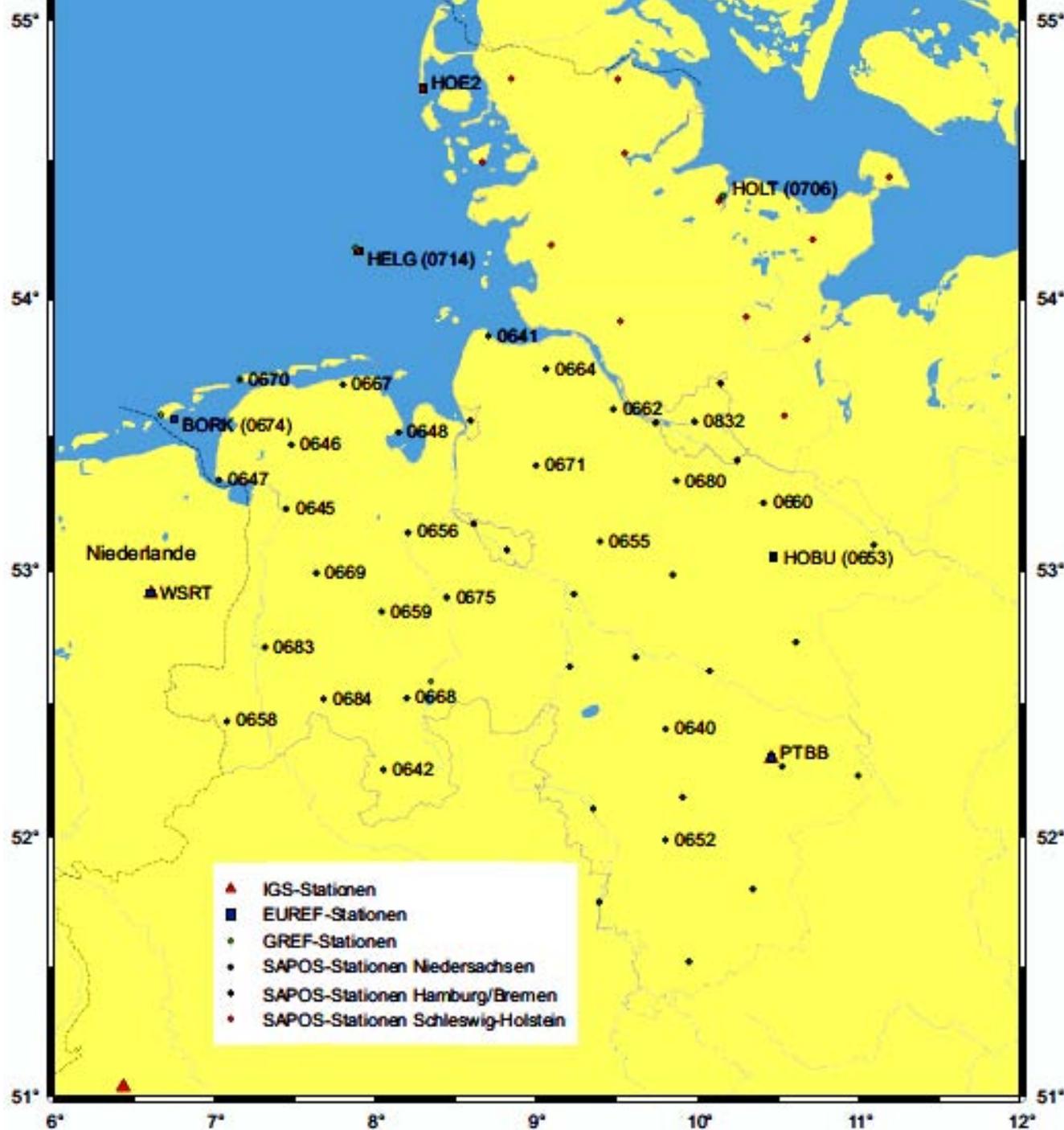
- mit der Software WaSoft (Wanninger)
- Präzise Ephemeriden (IGB00)
- Präzise Näherungskoordinaten (ITRF2000)
- relative Antennenkorrekturen
- verschiedene Parametersätze

=> Tageslösungen im SINEX-Format:  
3D-Koordinaten mit Kovarianzmatrizen

## Transformation

Je GPS-Lösung wird im kinematischen Auswertemodell ein Satz von Transformationsparametern eingeführt / mitgeschätzt

5. Nov. 2008



# Verwendete GPS-Stationen

Datenbasis:  
max. 1996-2006,  
z.T. nur 2 Jahre

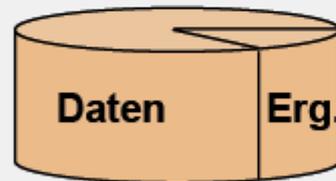
# Datenbank und Software

## Im Projekt: (2005–2008)

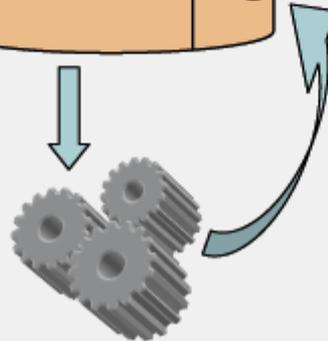
- Daten (Sammlung/ Untersuchung/ Aufbereitung) (BfG, LGN, TUD)



- Entwicklung Datenbank (LGN)



- Entwicklung Algorithmen + Software (TU-BS)

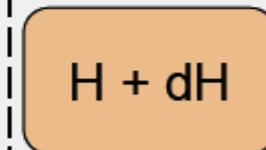


## Nach Projektende

- Einbeziehung

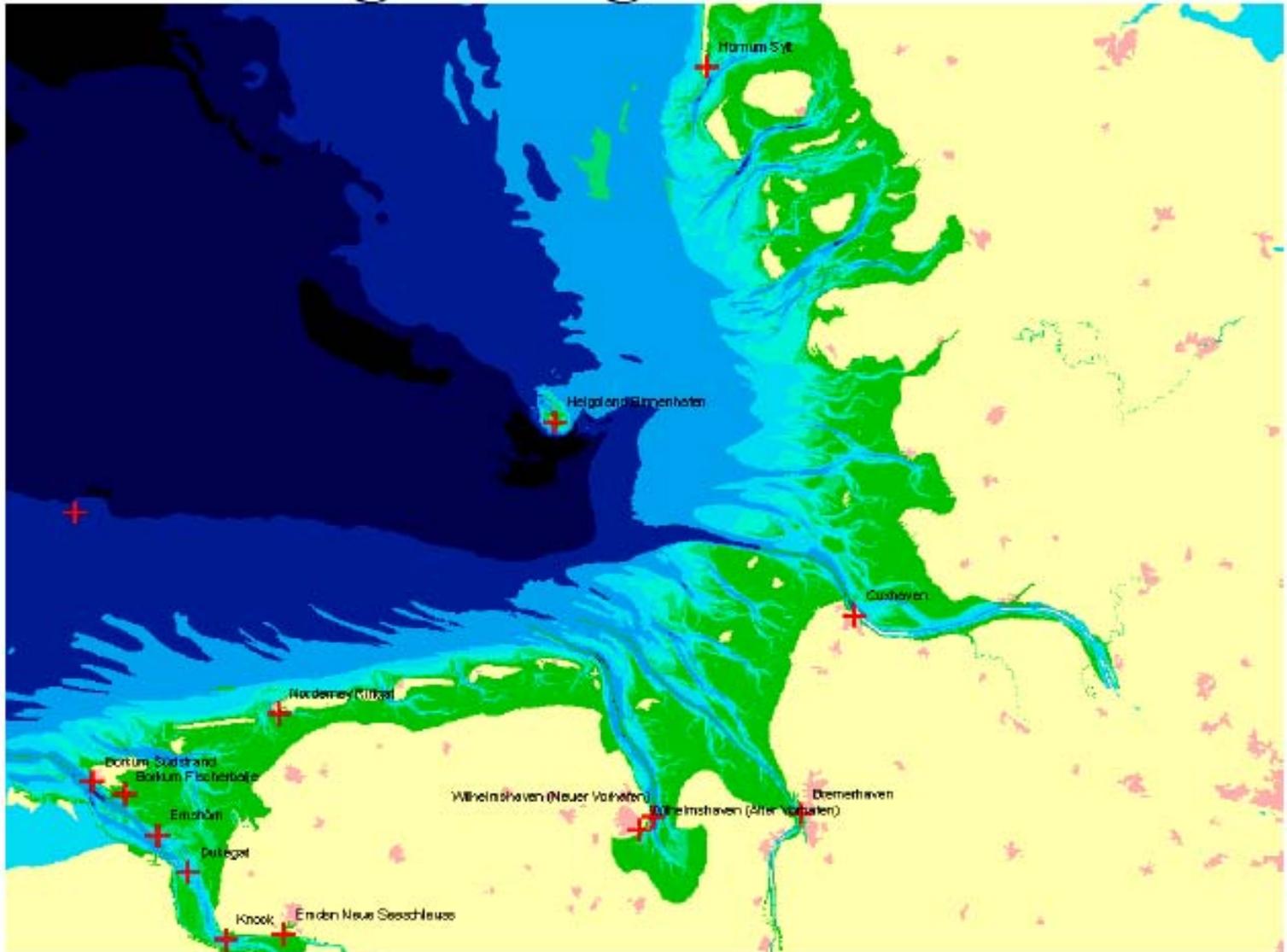


- Bereitstellung



Werkzeuge:  
Datenbank und  
Software

# IKÜS - Pegelanlagen



# Teilziel von IKÜS: Höhenänderungen von Land aus für Küsten- und Inselpegel bestimmen

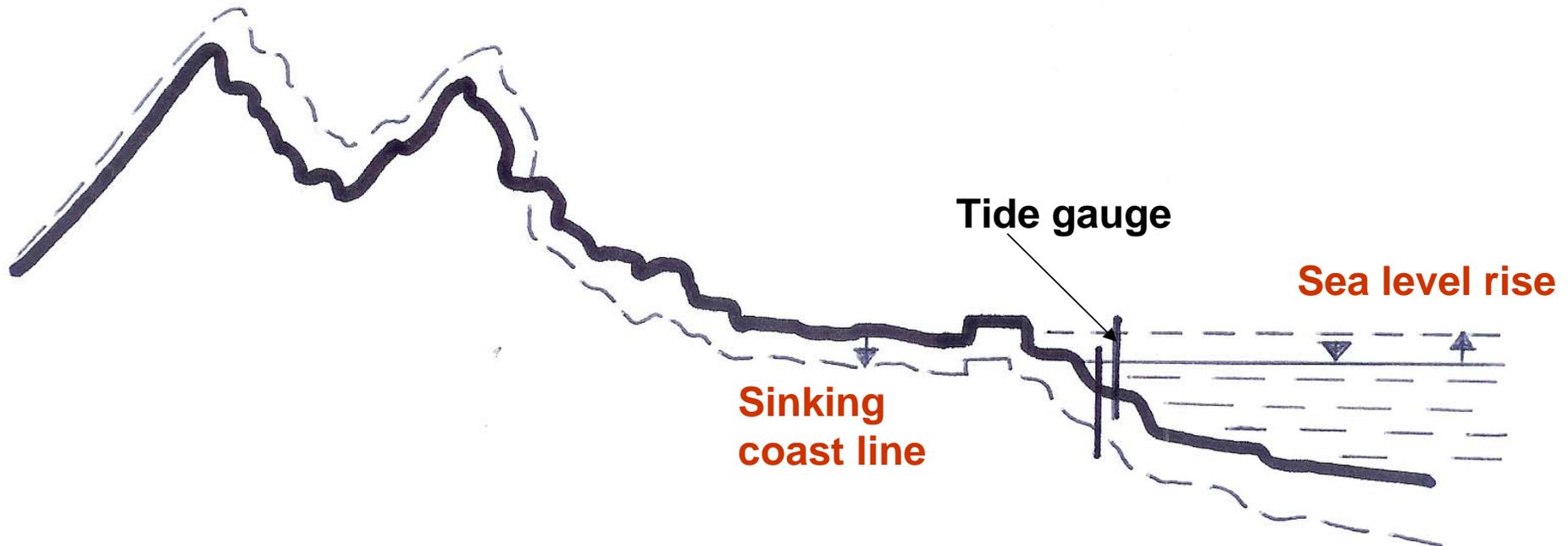
**Wichtig** : Eingehende Analyse der nivellitischen Anschlussmessungen und der Festlegungen der Pegelnullpunkte

**Aber:** Keine Aufbereitung der Pegelregistrierungen selbst und damit keine Berücksichtigung als unmittelbare Mess-Information über Höhenänderungen

**Warum:**

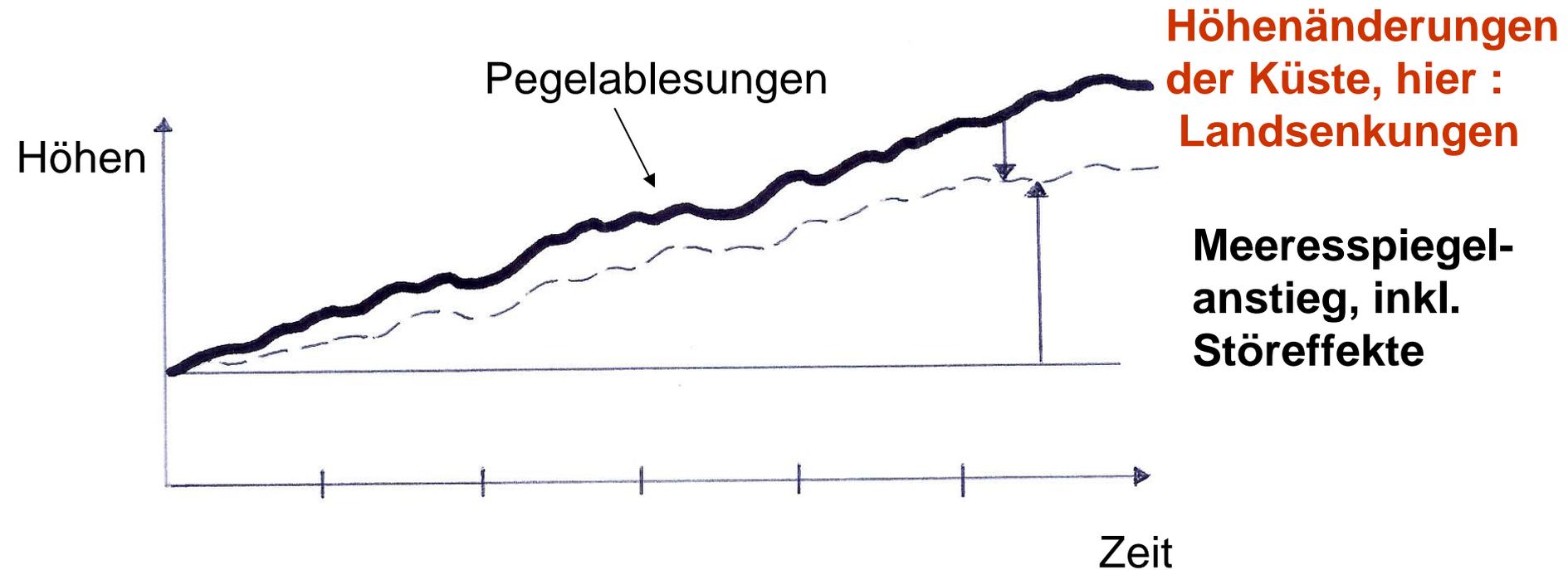
- Informationsgehalt von Pegelmessungen beinhaltet relative Höhenänderungen zwischen Land und Wasser am jeweiligen Ort, d.h. Einfluss von **Landenkungen** und **Meeresspiegelanstieg**
- In IKÜS sollte allein der landseitige Effekt bestimmt werden.

# Beziehungen zwischen Höhenänderungen an Land, Meeresspiegelanstieg und Pegelinformationen



**Absinken der Küsten muss zusätzlich zu  
Prognosen über Meeresspiegelanstieg bei der  
Bemessung von Küstenbauwerken berücksichtigt werden !**

# Zusammensetzung der Information in der Pegelaufzeichnung



$\Delta H(\varphi, \lambda, t)$  Höhenänderungen zum Zeitpunkt  $t$  an den Orten  $(\varphi, \lambda)$   
Ansatz : - Lineares Geschwindigkeitsmodell  
- Flächige Information

zu bestimmen aus :

$H(\varphi, \lambda, t, i, q)$  Referenzhöhen zum Zeitpunkt  $t$  an den Orten  $(\varphi, \lambda)$   
 $i$  : Anzahl,  $q$  : Qualität (im geologischen Sinne)  
- Bezug zu / abgeleitet aus globalem System  
- Konstante in Auswertemodell

+  $Lev(\varphi, \lambda, t, n, q)$  Nivellementsinformation mit der Netzausdehnung  $(\varphi, \lambda)$ ,  
 $t$  : Zeitspanne ( $> 100$  y),  $n$  : Anzahl der Epochen,  
 $q$  : Qualität (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, ...)

+  $GNSS(\varphi, \lambda, j, t, q)$  GPS, GALILEO, ... : 3D-Informationen im Bereich  $(\varphi, \lambda)$ ,  
 $j$  : Anzahl der Stationen, Zeitreihen mit  $t > 10$  y,  
 $q$  : Qualität (Genauigkeit, berücksichtigte Störeinflüsse, ..)

+  $Gravity(\varphi, \lambda, t, n, q)$  Schwereinformation im Bereich  $(\varphi, \lambda)$   
 $t$  : Zeitspanne,  $n$  : Anzahl der Epochen,  $q$  : Qualität

# IKÜS Auswertemodell

Lineare Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit.

$$X_t = X_{ref} + \dot{X} \cdot (t - t_{ref}) = X_{ref} + \Delta X_t$$

+ Berücksichtigung des gleichartigen Verhaltens von Nachbarschaftsbereichen durch **Radiale Basisfunktionen**

+ Modellierung von saisonale Bewegungen durch **periodische Funktionen**

**Ansatz:** Redundanz in den Datensätzen gefordert, d.h. es sind nur Gebiete ausgewertet, in denen GPS und Nivellement verfügbar waren

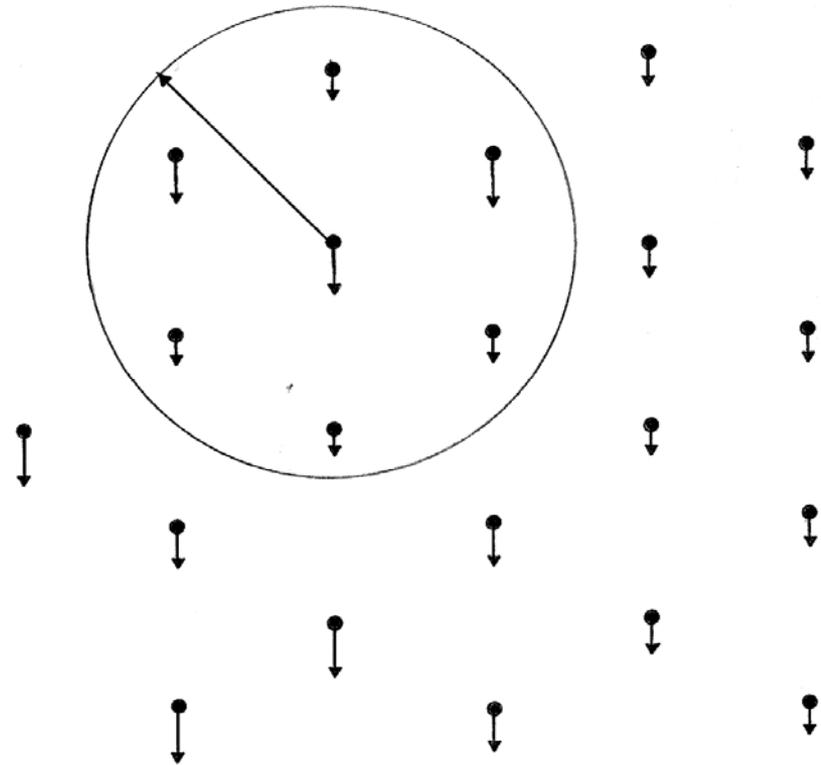
# Berücksichtigung von gleichartigem Verhalten in Nachbarschaftsbereichen

„Smoothing“/ Angleichen der Höhenänderungen in Nachbarschaftsbereich :

- **Kollokation**
- **Kriging**
- **Radiale Basisfunktionen**

## Fragen

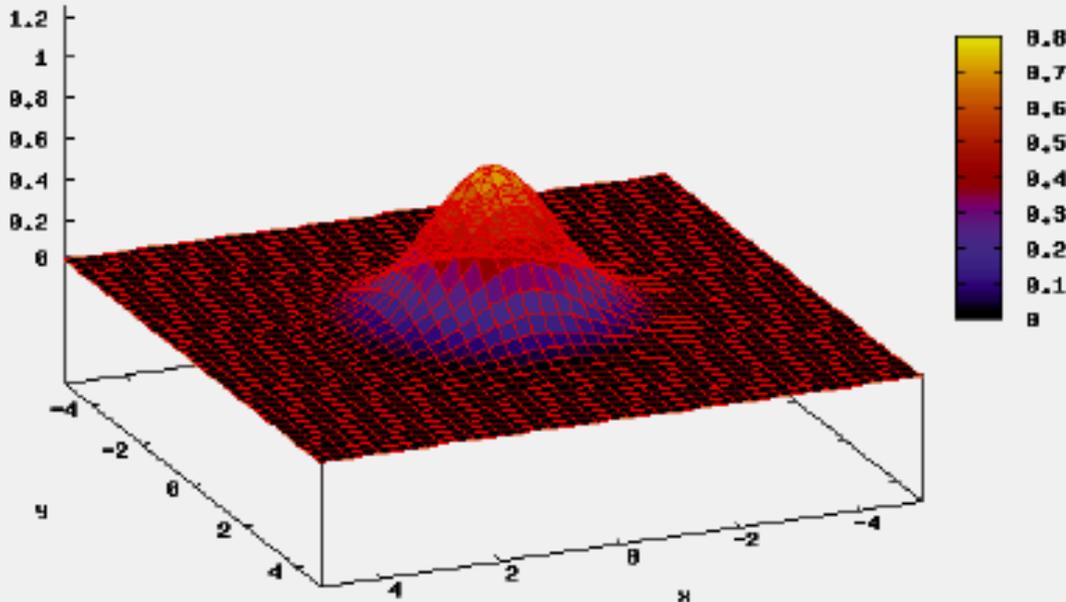
- wie weit geht Nachbarschaft ?
- was ist Funktion für das Beschreibung des „Gleichverhaltens“ ?



# Radiale Basisfunktionen zur flächenhaften Interpolation

$$c_j e^{-\alpha((x-x_j)^2+(y-y_j)^2)}$$

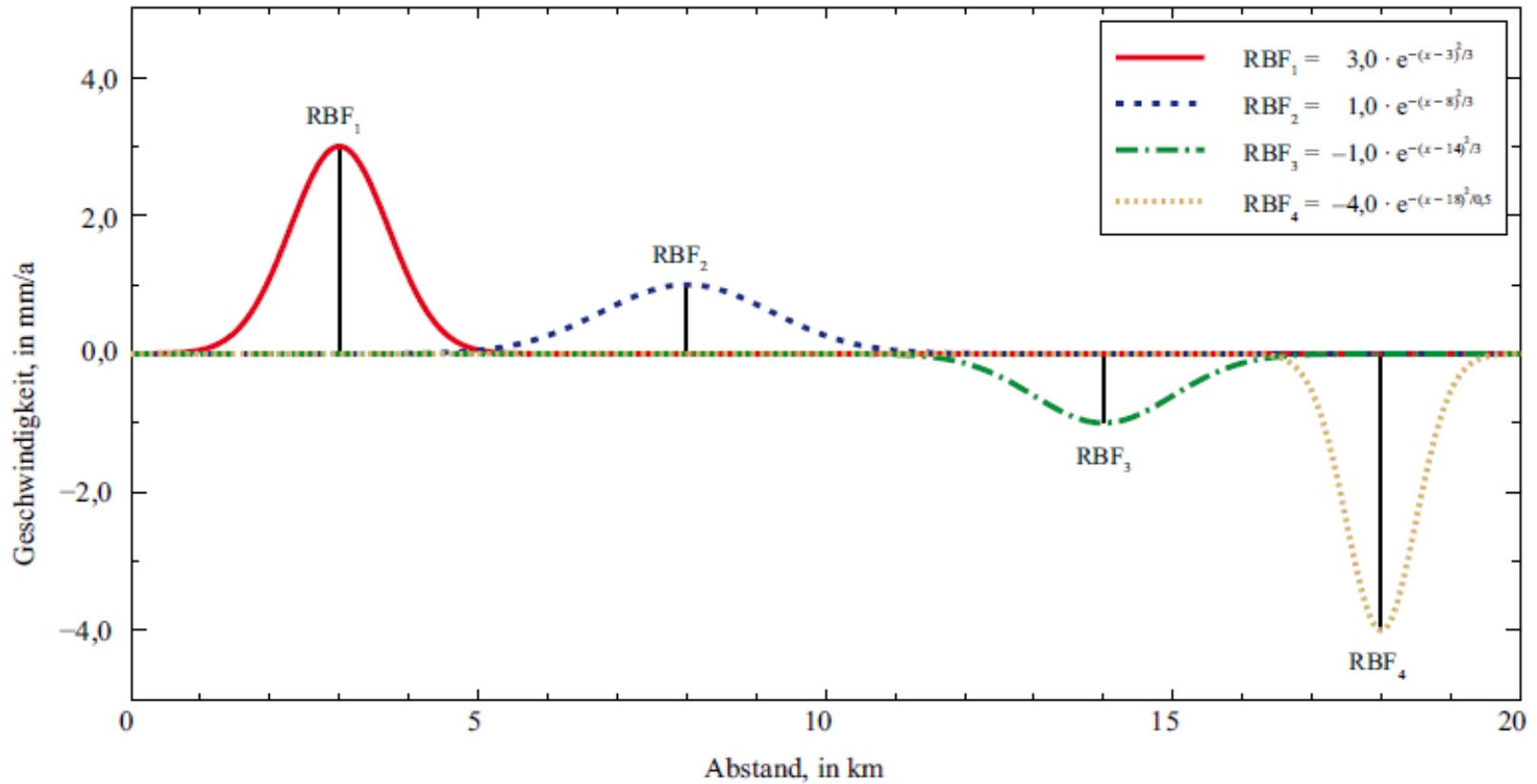
...



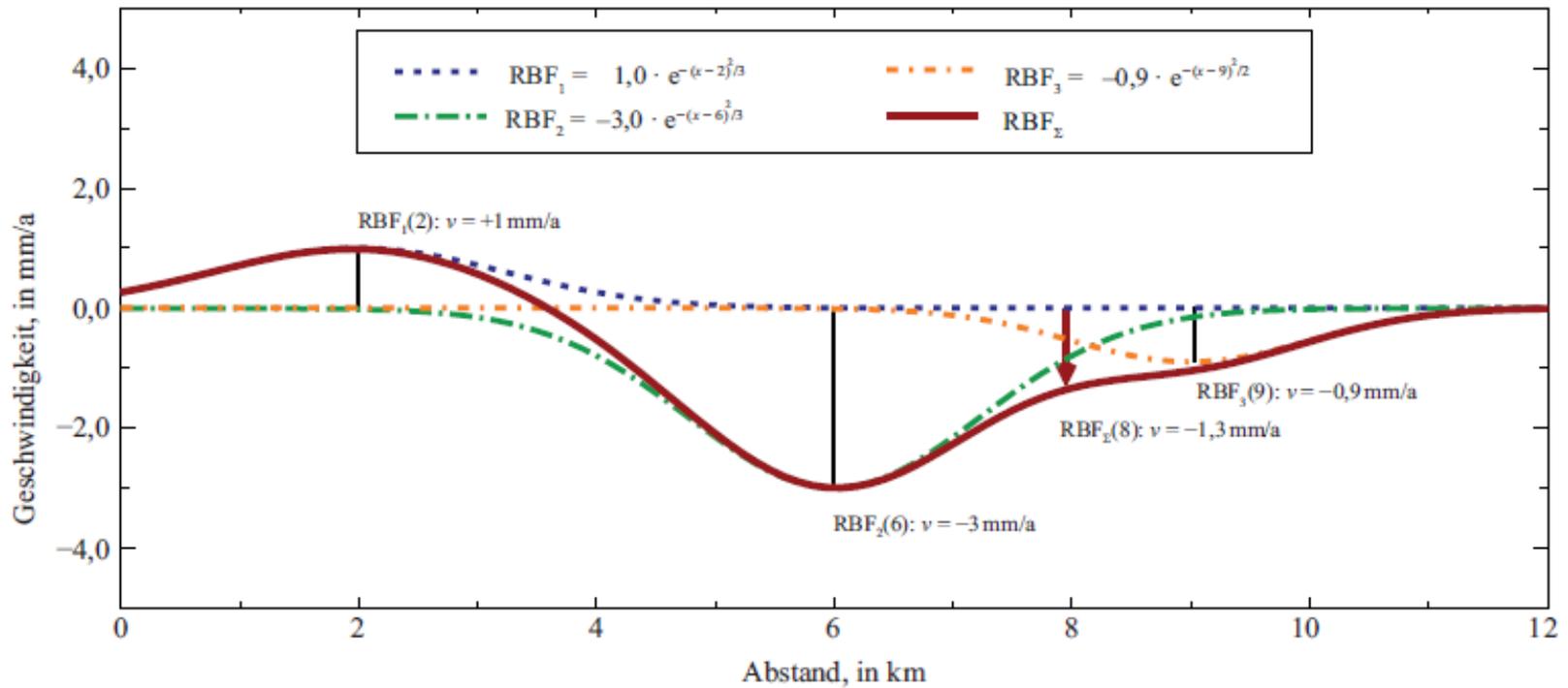
Typ :  
Gaußsche  
Glockenkurve

Positionierung  
nach Vorinformation

Korrelationslänge  
bei mehreren km,  
d.h. Überlagerung  
ist möglich und  
gewollt



**Abb. 2-30:** Beispiele von 2D-radialen Basisfunktionen mit unterschiedlicher Höhe und Steilheit.



**Abb. 2-31:** Summation der Anteile zweier radialer Basisfunktionen.

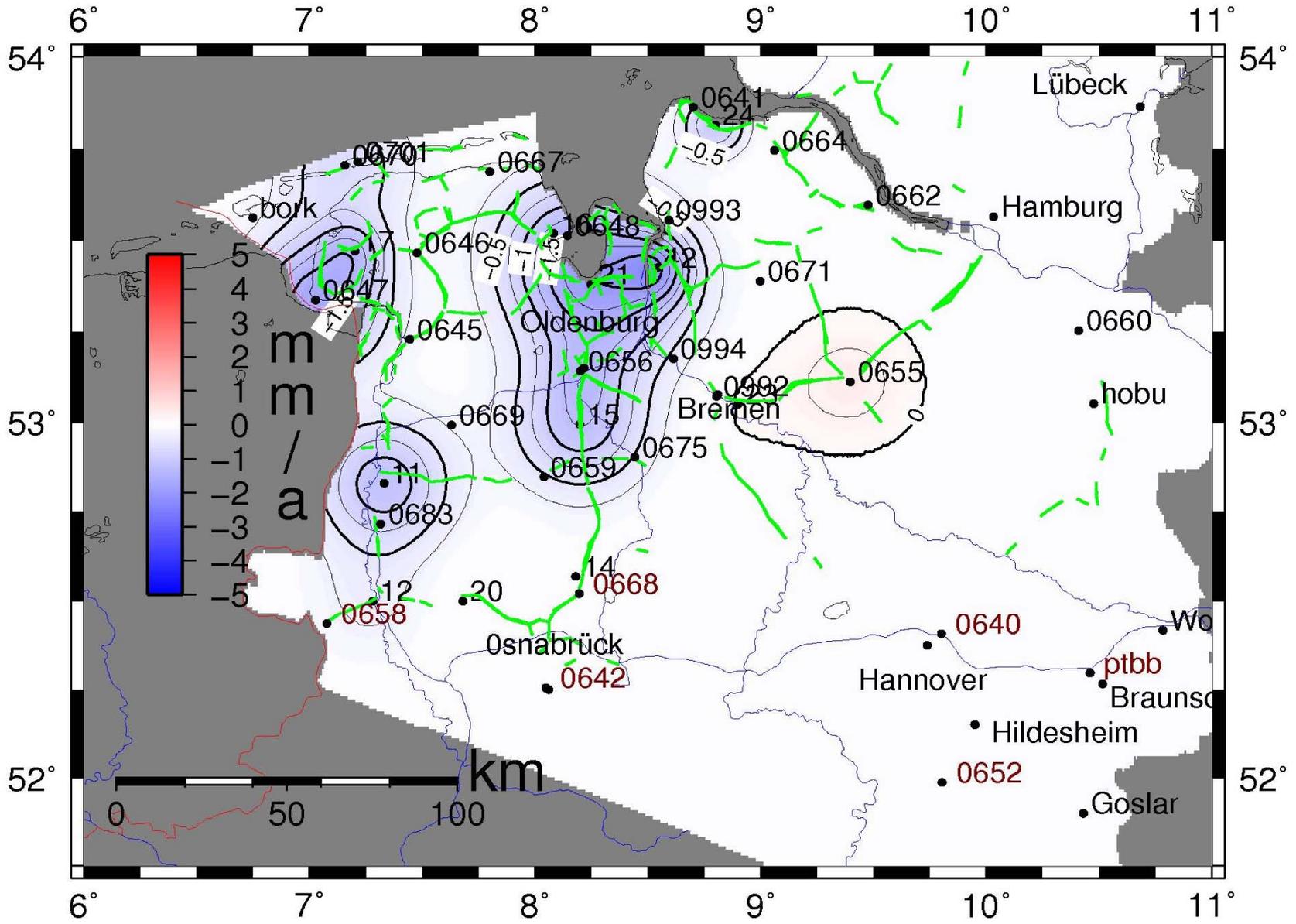
# Vollständiger Auswerteansatz für Nivellement mit Geschwindigkeitsfeld

$$\Delta C_t^{12} = (C_{ref}^2 + \dot{C}^2 \cdot (t - t_{ref}^2)) - (C_{ref}^1 + \dot{C}^1 \cdot (t - t_{ref}^1))$$

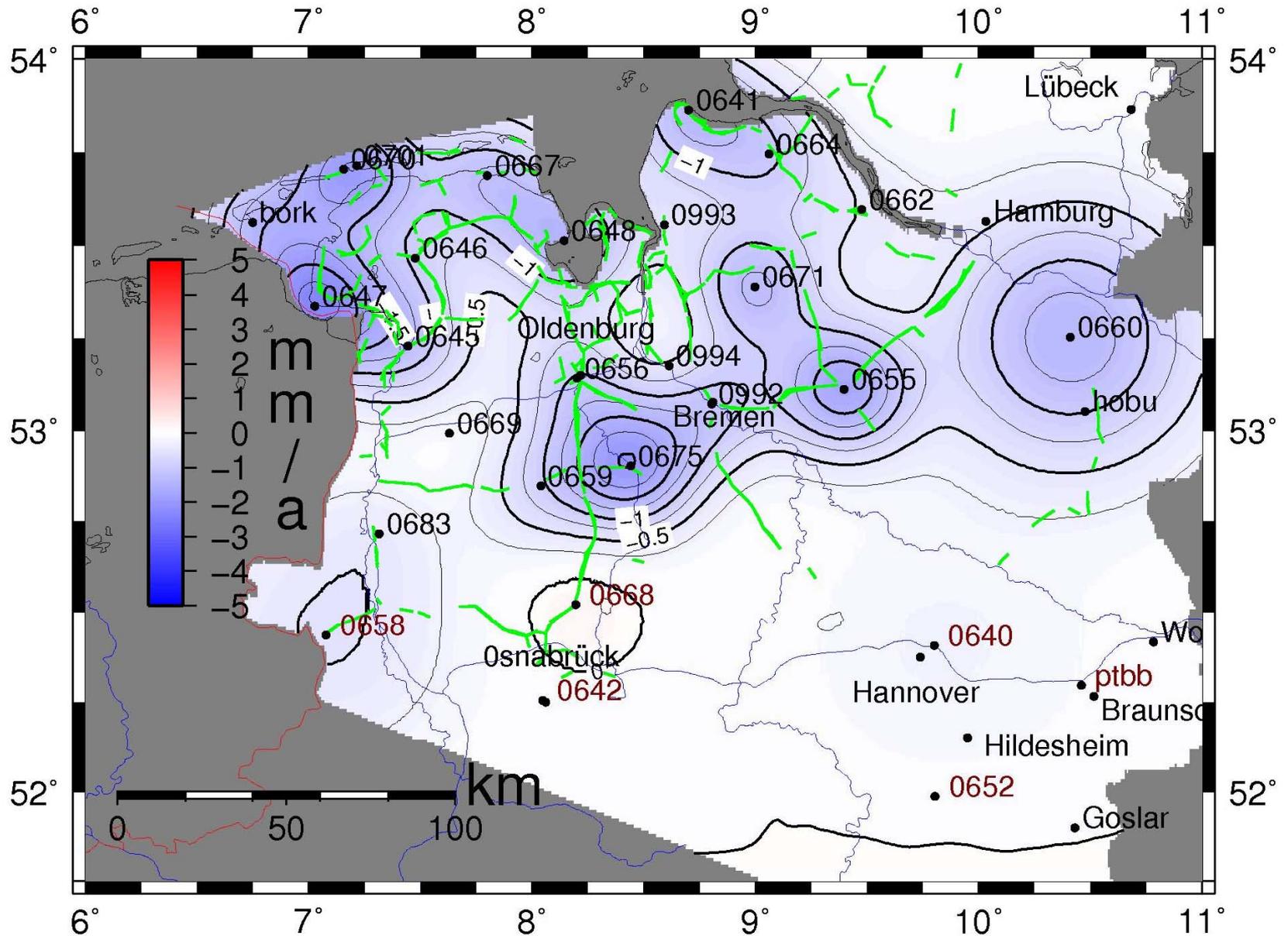
$$\Delta C_t^{ij} = C_{ref}^j + \underbrace{\sum_{k=1}^d c_k e^{(-\alpha((x^j - x_k)^2 + (y^j - y_k)^2))}}_{\text{Geschwindigkeitsfeld Punkt } j} (t - t_{ref}^j) - C_{ref}^i - \underbrace{\sum_{k=1}^d c_k e^{(-\alpha((x^i - x_k)^2 + (y^i - y_k)^2))}}_{\text{Geschwindigkeitsfeld Punkt } i} (t - t_{ref}^i)$$

Hier mit Potentialwerten  $C$  und Potentialdifferenzen  $\Delta C$

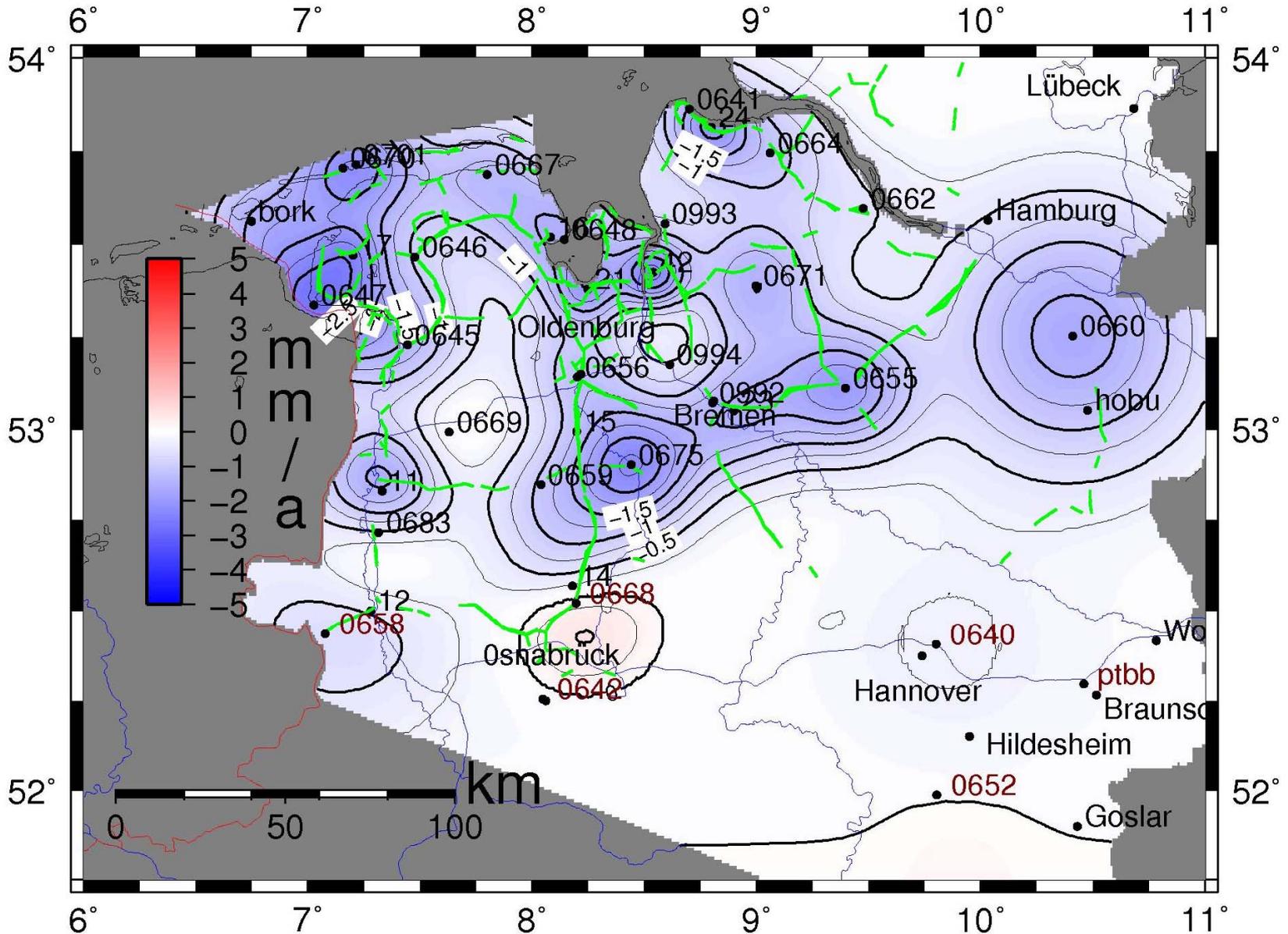
# Ergebnisse Nivellements



# Ergebnisse GPS



# Kombination Nivellement und GPS



# Zusammenfassung

- **Höhenänderungen durch strenge Kombination von Nivellements- und GPS-Messungen war erfolgreich**
- **Hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse, da redundante (=überprüfte) Mess-Information**

## Weitere/zukünftige Aufgaben (!?)

- **Hinzunahme neuerer Messungen**
  - permanente GPS-Stationen: Aussagen für Schleswig-Holstein
  - Erneuerung des DHHN 2006-2011: Neuere Tendenzen
- **Berücksichtigung von anthropogenen Einflüssen**  
(Erdgas- und Erdölentnahme, Änderungen des Wasserstandes, Küstenbaumaßnahmen, etc.)
- **Hinzunahme flächenhafter Sensoren: InSAR**
- **„Reduktion“ der Pegelaufzeichnungen um die nachgewiesenen Landsenkungen**

# der 7. tag

„Palmen in Bottrop“ –  
„Schade um Sylt“



Hann. Allg. Zeitung  
29.09.2007

Messverfahren	Genauigkeitsbegrenzende Einflussgrößen	Genauigkeit Höhe	Höhenänderung
Präzisionsnivellement	restliche systematische Effekte (u. a. Refraktion, Grundwasser)	8 mm (NKN: Osnabrück – Norderney 200 km)	0,1 – 0,3 mm/a aus kinematischer Netzausgleichung (Messepochenabstand 50 Jahre) (Wolfram 1999)
GNSS (GPS, GLONASS, Galileo)	Restfehler der Signalausbreitung (Mehrwegeeinflüsse, troposphärische Refraktion), Antennenverhalten	4 – 5 mm bei guter Stationsqualität (NN-SAT 2002)	0,5 mm/a bei guter Stationsqualität und Messzeitraum von 5 bis 10 Jahren (NN-SAT 2002)
Präzisions- schwere- messungen	Modellierung der Massenänderungen	10 – 15 mm Richter u. a. (1998) (= 30 – 50 nms <sup>-2</sup> ) bzw. 3 – 7 mm (= 10 – 20 nms <sup>-2</sup> ) (Wilmes u. a. 2003)	zur Zeit 20 mm → 2 mm/a bei Messepochenabstand von 10 Jahren