

4. Beratungsgremium

Berechnungen und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Düsseldorf

30.05.2018

Vorgehen / Projektskizze

2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

1. Unterlagen... ..Modellerstellung... 5. Kalibrierung...
6. Sensitivitätsanalyse mit Variation von:
 - a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig
 - b) Ausgangsteifigkeit bindig
 - c) Ausgangskonsolidationsbeiwert
 - d) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig
 - e) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig
 - f) Hebungsfaktor nichtbindig
 - g) Hebungsfaktor bindig



Vorgehen / Projektskizze



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

1. Variation GW-Ganglinie:
 - a) Verschiebung aller Grundwasserganglinien parallel nach oben
 - b) Verschiebung aller Grundwasserganglinien parallel nach unten
 - c) Verschiebung einzelner Grundwasserganglinien im Absenkungsmaximum um ± 20 m (Annahme: 7 GW-Leiter x 2 = 14 Fallunterscheidungen)
2. Variation Schichtmächtigkeit

2.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

1. Unterlagen... ..Modellerstellung... 5. Kalibrierung...
6. Neuberechnung

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

3

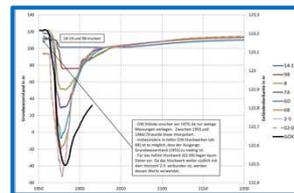
Erste Ergebnisse



= Einwirkung =

= Reaktion =

= Widerstand =



Abtastung	1/1974	1/1976	1/1978	1/1980	1/1982	1/1984	1/1986	1/1988	1/1990	1/1992	1/1994	1/1996	1/1998	1/2000	1/2002	1/2004	1/2006	1/2008	1/2010	1/2012	1/2014
1/1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/17	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/18	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/21	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/22	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/23	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/24	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/27	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/28	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/29	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

4

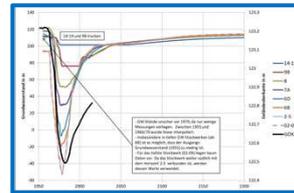
Erste Ergebnisse



Grundwasser-
absenkung = Einwirkung =

Setzungen /
Hebungen = Reaktion =

Boden- = Widerstand =
eigenschaften



Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

Geologie & Grundwasser & Messung GOK

Datum	14-19	5C	5B	5A	5	7F/7D/7B	7A	6E	6D	6C	6B	6
01.10.1965	110,90		111,95		122,00		118,00		114,50		94,20	
01.10.1966	110,87		111,82		121,93		117,93		114,07		94,11	
01.10.1967	110,84		111,89		121,86		117,83		113,63		94,02	
01.10.1968	110,81		111,86		121,79		117,74		113,20		93,93	
01.10.1969	110,78		111,83		121,71		117,65		112,76		93,84	
01.10.1981	110,75		111,80		121,64		117,57		112,33		93,75	

...

Datum	14-19				5C				5B				5A			
	Spannung															
01.10.1965	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	111,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
01.10.1966	0,03	0,38	0,23	0,23	1,22	0,73	1,22	111,82	0,13	1,22	0,00	1,22	0,64	0,93	0,93	
01.10.1967	0,03	0,35	0,23	0,23	1,22	0,73	1,22	111,80	0,13	1,22	0,00	1,22	0,64	0,93	0,93	
01.10.1968	0,03	0,32	0,23	0,23	1,22	0,73	1,22	111,78	0,13	1,22	0,00	1,22	0,64	0,93	0,93	

...

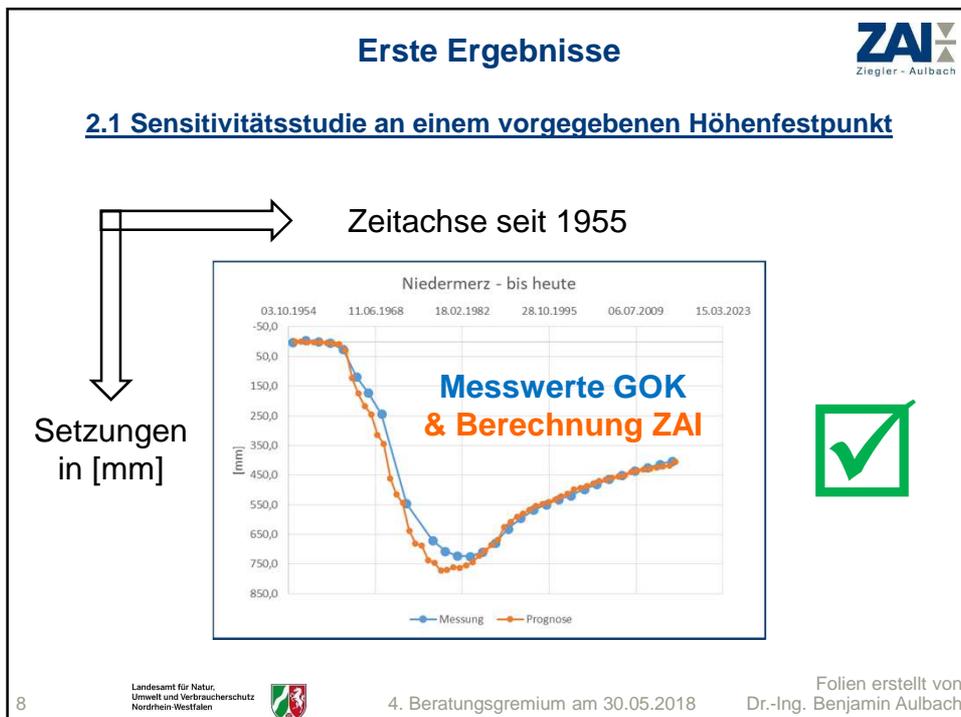
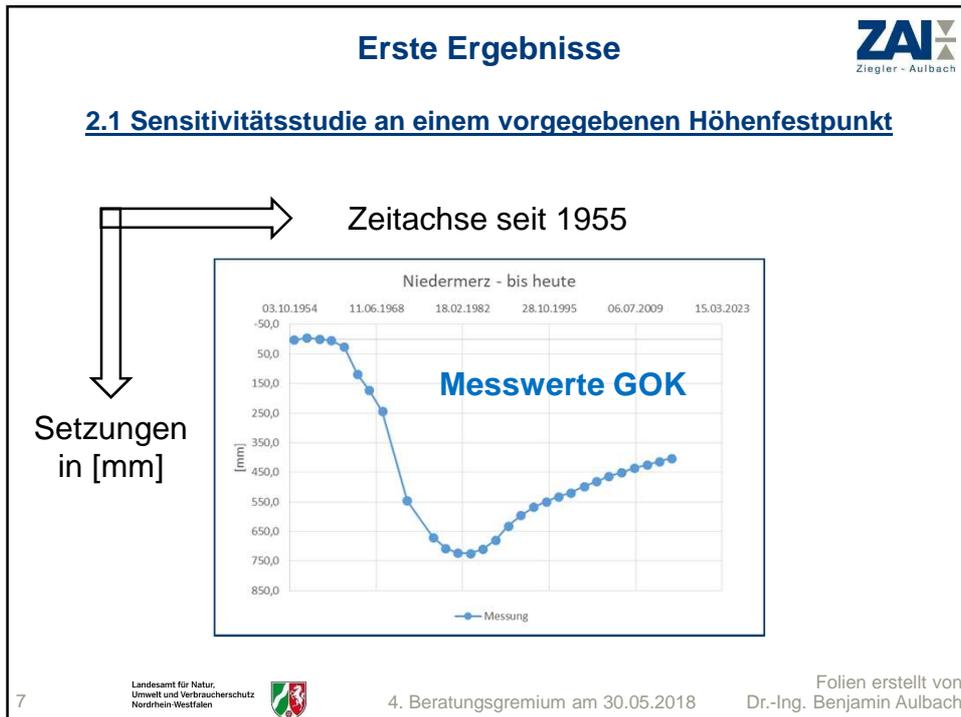
Datum	Gesamtsetzungen												
	14-19	5C	5B	5A	5	7F/7D/7B	7A	6E	6D	6C	6B	6A	2-5
01.10.1965	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01.10.1966	0,01	0,00	0,19	0,00	0,10	0,00	0,07	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	-0,01
01.10.1967	0,03	0,00	0,39	0,01	0,19	0,00	0,14	0,01	0,63	0,01	0,00	0,00	-0,03
01.10.1968	0,04	0,01	0,58	0,02	0,28	0,01	0,21	0,02	0,84	0,02	0,00	0,00	-0,04
01.10.1969	0,06	0,03	0,77	0,03	0,38	0,01	0,28	0,03	1,25	0,03	0,00	0,00	-0,05
01.10.1981	0,07	0,05	0,97	0,05	0,48	0,02	0,36	0,06	1,59	0,05	0,00	0,01	-0,06
01.10.1981	-0,28	0,07	1,53	0,08	0,92	0,02	0,44	0,09	2,05	0,08	0,01	0,01	0,41

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach



Erste Ergebnisse

ZAI
Ziegler - Aulbach

2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

Zeitachse seit 1955 bis 2200

Setzungen in [mm]

9

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse

ZAI
Ziegler - Aulbach

2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

Fazit Modellierung Niedermerz:

- ▼ Datenbereitstellung über LANUV ✔
- ▼ Modellerstellung & Kalibrierung ✔
- ▼ Sehr gute Abbildung Setzungen ✔
- ▼ Sehr gute Abbildung Hebungen ✔
- ▼ Prognose bis 2200 ✔
- ▼ Basis für Sensitivitätsanalyse ✔

10

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

6. Sensitivitätsanalyse

mit Variation von:

- a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig
- b) Ausgangsteifigkeit bindig
- c) Ausgangskonsolidationsbeiwert
- d) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig
- e) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig
- f) Hebungsfaktor nichtbindig
- g) Hebungsfaktor bindig

Widerstand



11

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

6. Sensitivitätsanalyse

mit Variation von:

- a) Ausgangsteifigkeit** nichtbindig
- b) Ausgangsteifigkeit bindig
- c) Ausgangskonsolidationsbeiwert
- d) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtb.
- e) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig
- f) Hebungsfaktor nichtbindig
- g) Hebungsfaktor** bindig

Widerstand



12

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

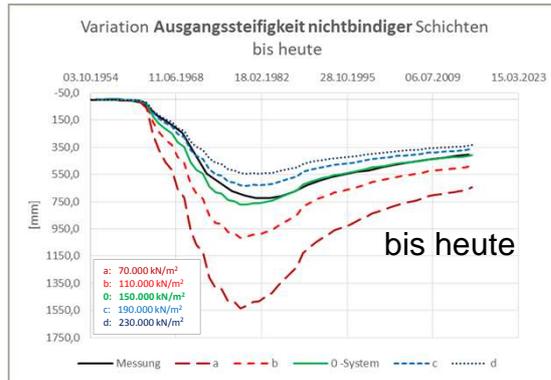
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig



- Erhöhung
- 0-System
- Reduzierung

13

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

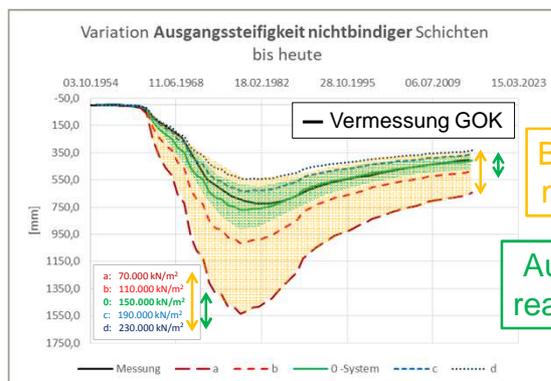
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig



Bodenmech. theoretisch möglicher Wertebereich

Aufgrund der Messdaten realistischer Wertebereich

14

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

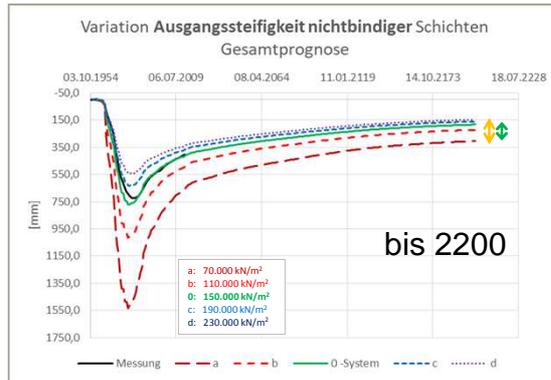
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

theoret. > realist.
Streuweite

15

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

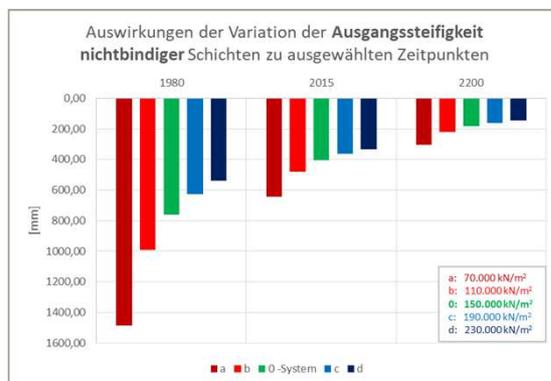
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

a) Ausgangsteifigkeit nichtbindig



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

durchgängig
Einfluss auf Ergebnis

16

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

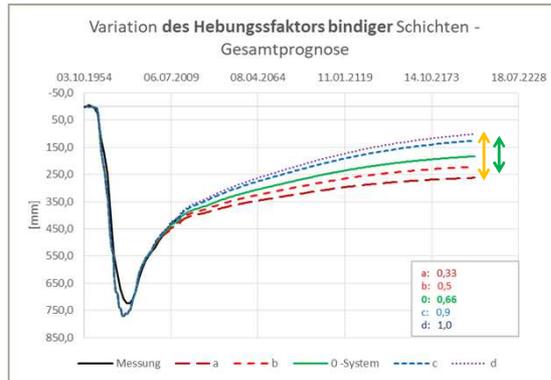
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

g) Hebungsfaktor bindig



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

theoret. > realist.
Streuweite

17

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

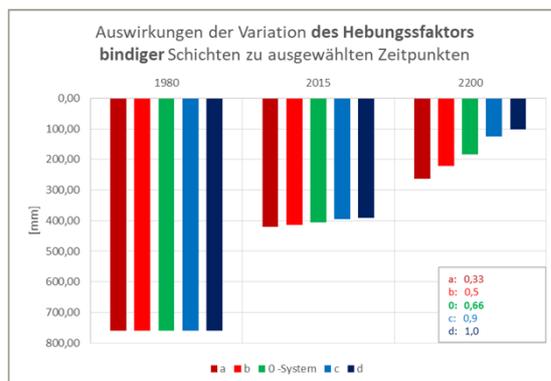
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

g) Hebungsfaktor bindig



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

bis heute (2015)
kaum Einfluss

18

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

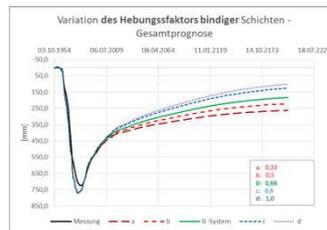
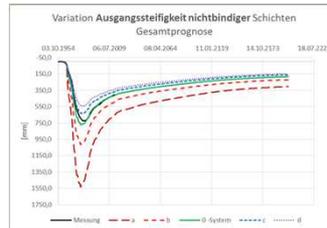
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse

2.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

Fazit Variation Bodenkenneiwerte:

- ▼ Variation sämtlicher Eingangswerte in Abstimmung mit LANUV
- ▼ Variation innerhalb theoretisch denkbarer Wertebereiche
- ▼ Tatsächliche Streuweite i.d.R. deutlich geringer (vgl. Messwerte)
- ▼ Auswirkungen sowohl quantitativ als auch zeitlich verschieden



19



Vorgehen / Projektskizze

2.2 Bewertung der Eingangsdaten

Variation GW-Ganglinie:

- a) Verschiebung aller Grundwasserganglinien parallel nach oben
- b) Verschiebung aller Grundwasserganglinien parallel nach unten
- c) Verschiebung einzelner Grundwasserganglinien im Absenkungsmaximum um ± 20 m (Annahme: 7 GW-Leiter \times 2 = 14 Fallunterscheidungen)

Einwirkung



20

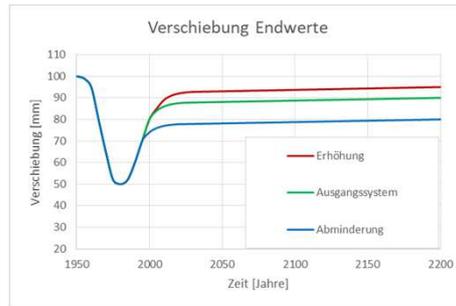


Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

- a) Endwert aller GW-Ganglinien **5 m höher**
 b) Endwert aller GW-Ganglinien **10 m tiefer**



21

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

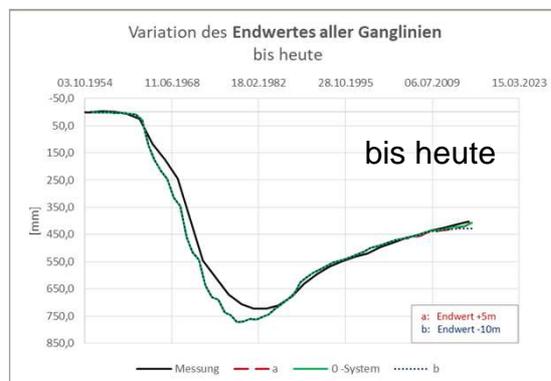
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

- a) & b) Endwert aller GW-Ganglinien 5 m höher & 10 m tiefer



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

22

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

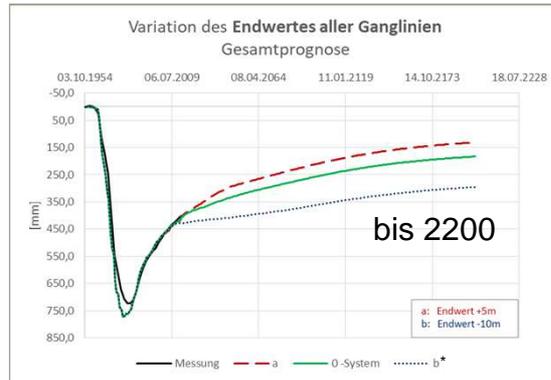
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

a) & b) Endwert aller GW-Ganglinien 5 m höher & 10 m tiefer



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

* „Knick“ in Kurve aufgrund künstlich generierter GW-Ganglinien

23

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

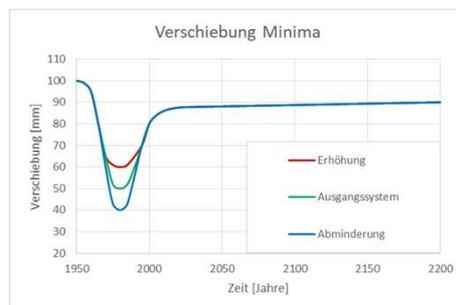
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

c) bis m) Minima jeweils 10 m höher & 10 m tiefer



24

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

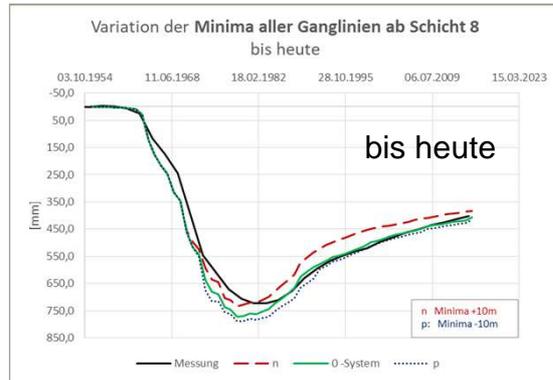
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

c) bis m) Minima **aller Schichten** gleichzeitig 10 m höher & 10 m tiefer



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

25

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

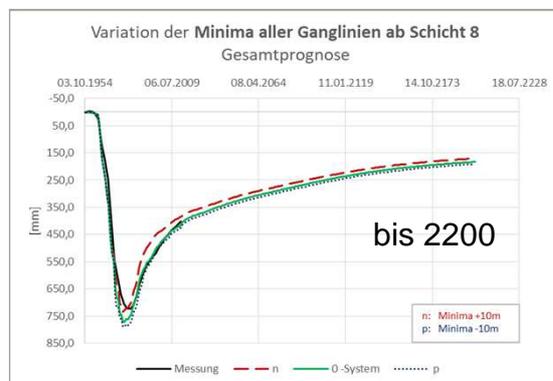
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse



2.2 Bewertung der Eingangsdaten

c) bis m) Minima **aller Schichten** gleichzeitig 10 m höher & 10 m tiefer



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

26

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

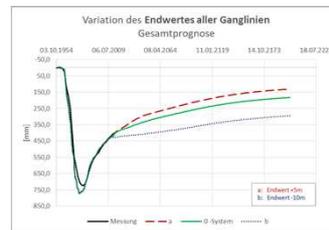
Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse

2.2 Bewertung der Eingangsdaten

Fazit Variation GW-Ganglinien:

- ▼ Variation der GW-Ganglinien in Abstimmung mit LANUV
- ▼ Variation innerhalb sinnvoller Wertebereiche
- ▼ Abweichung der Minima von untergeordneter Bedeutung
- ▼ Richtige Prognose des GW-Wiederanstiegs ist bedeutsam



27



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

Erste Ergebnisse

2.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

- Analog zu erstem Punkt
- **Neuberechnung** mit abweichenden **Eingangsdaten** (Schichtprofil, GW)

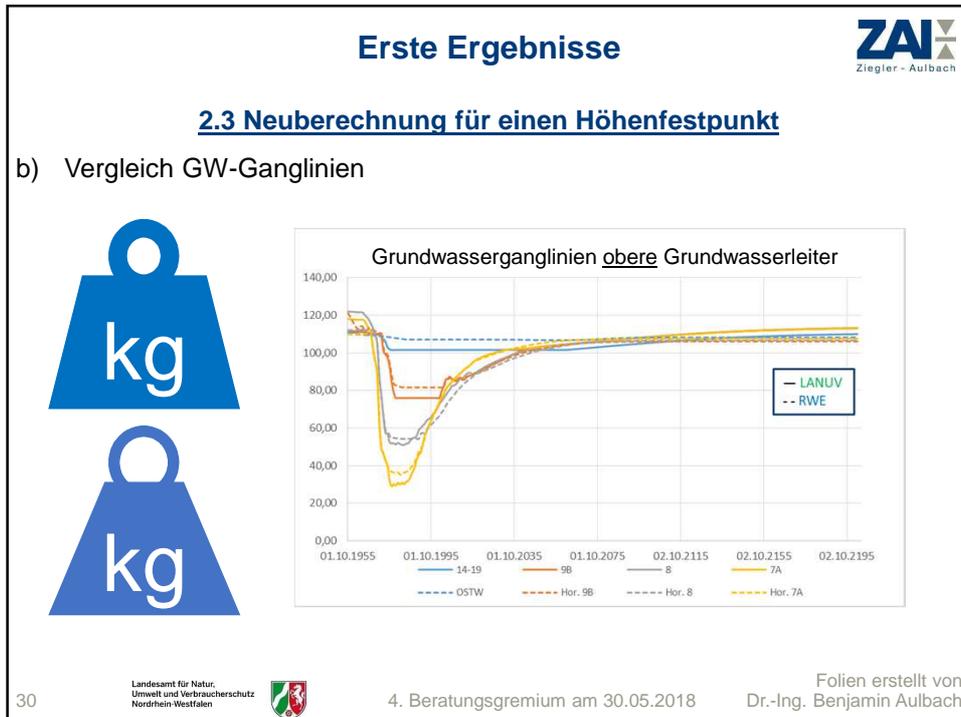
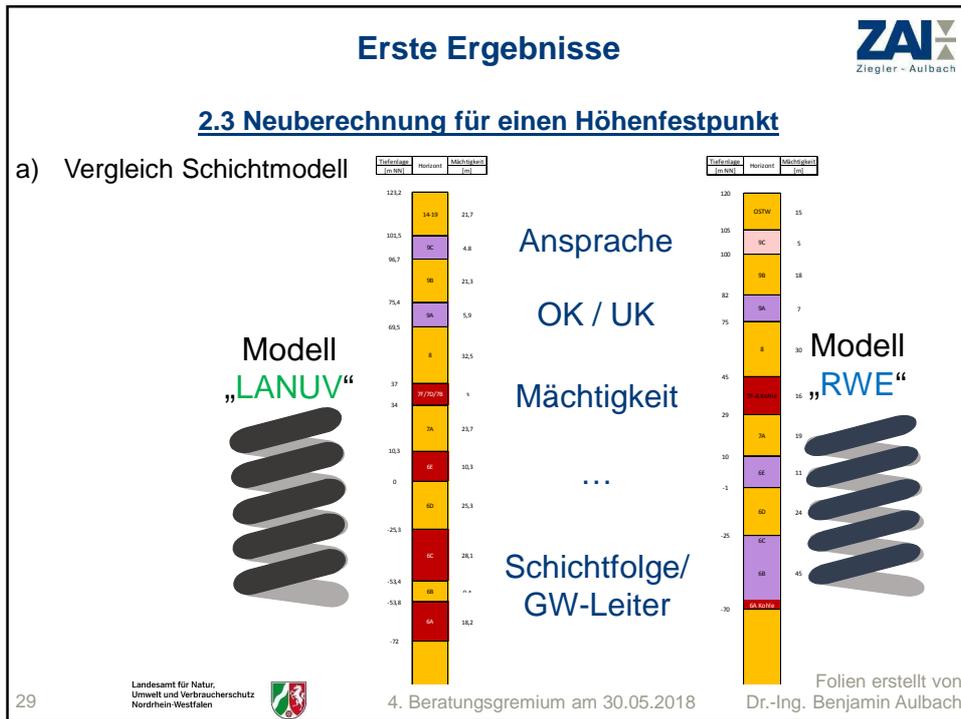


28



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach



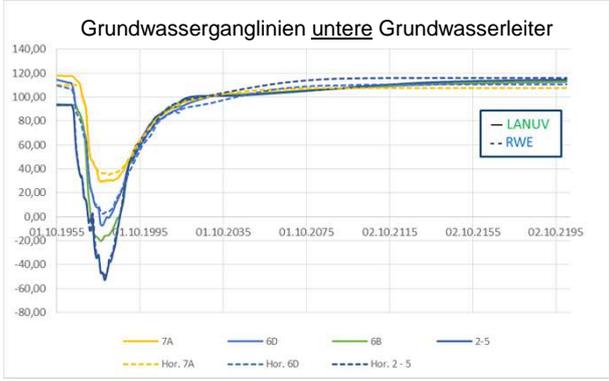
Erste Ergebnisse



2.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

b) Vergleich GW-Ganglinien



31 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

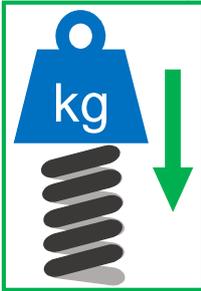
Folien erstellt von Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

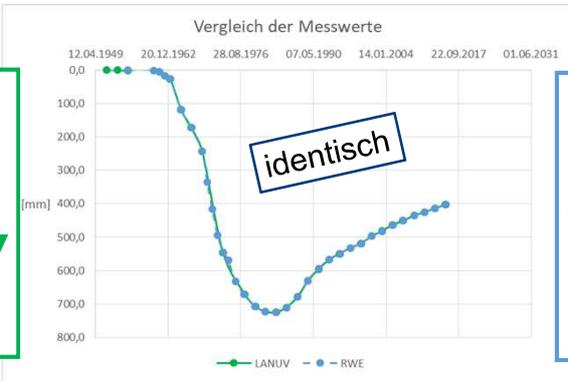
Erste Ergebnisse



2.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

c) Vergleich Messdaten





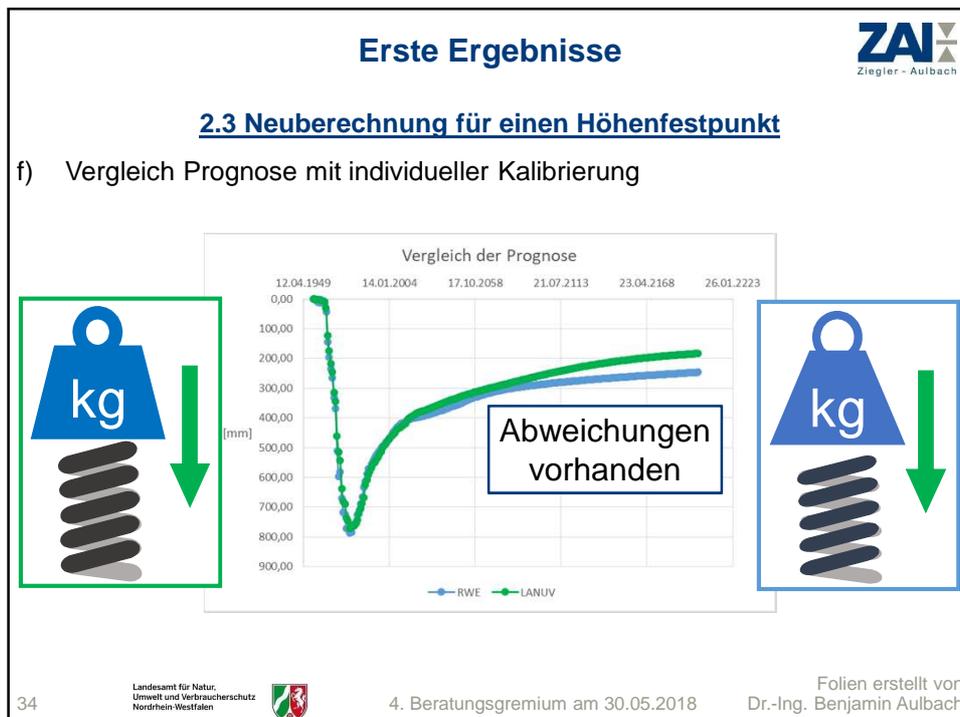
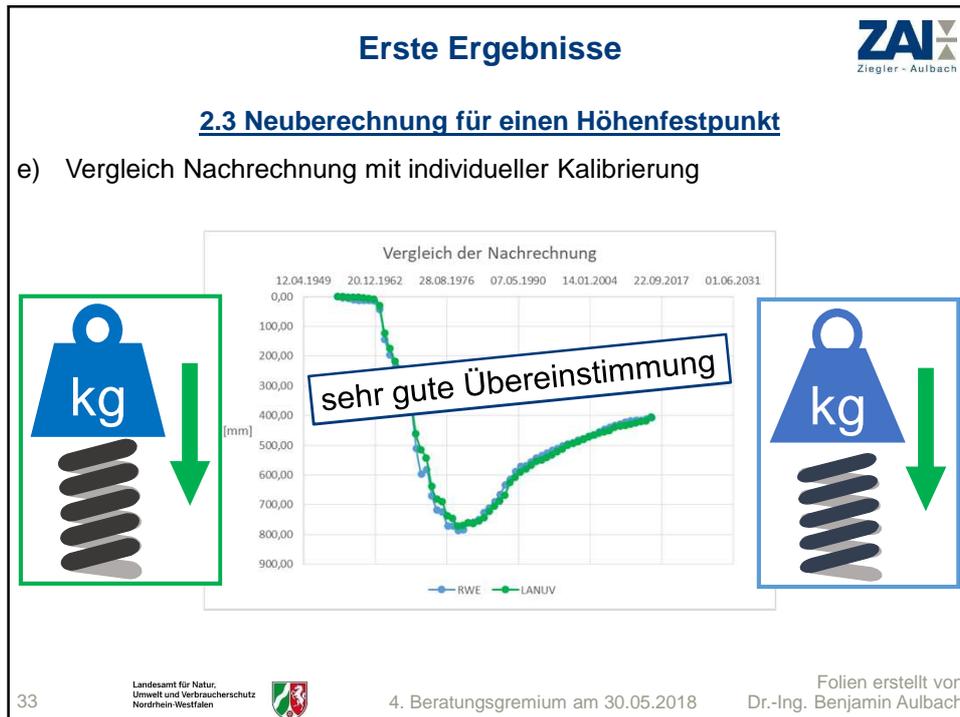


32 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von Dr.-Ing. Benjamin Aulbach



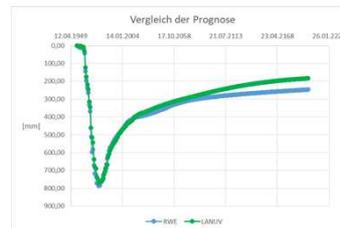
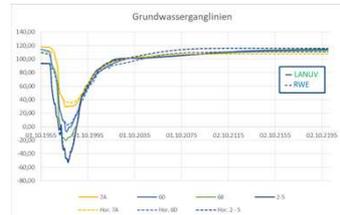
Erste Ergebnisse



2.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

Fazit Vergleich Niedermerz:

- ▼ Unterschiede in den Eingangsdaten (Schichtmodell & GW-Ganglinien)
- ▼ Beide Modelle liefern nach Kalibrierung vergleichbare, sehr gute Ergebnisse ✓
- ▼ Geringe Unterschiede bei der Prognose, aber Anpassungen später möglich 📝



35

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



4. Beratungsgremium am 30.05.2018

Folien erstellt von
Dr.-Ing. Benjamin Aulbach