

Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose im Rheinischen Braunkohlerevier

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Agenda

- 1) Motivation
- 2) Methodenvergleich
 - Nachrechnung und Prognose für Niedermerz
 - Nachrechnung und Prognose für Ahe
 - Zwischenfazit
- 3) Kriechen
- 4) Hydraulisch-mechanische Kopplung
- 5) Endbewertung



Motivation

3



1 – Motivation

Ausgangssituation:

Berechnung der Bodenbewegung mit **Methode nach Ziegler und Aulbach**.

Dieses Modell...

- ▼ basiert auf bodenmechanischen Grundsätzen und berücksichtigt entscheidende Faktoren,
- ▼ bildet das bis dato gemessene Verhalten sehr gut ab,
- ▼ ermöglicht die Prognose zukünftiger Bodenbewegungen,
- ▼ kann relativ einfach an geänderte Bedingungen (Betrieb, GW-Haltung) angepasst werden,
- ▼ kann durch fortlaufende Messungen und Nachkalibrierung stetig verbessert werden.

4



1 – Motivation



Ausgangssituation:

Literatur- und Methodenrecherche im Auftrag des LANUV

- ▼ Ergebnis: folgende Programme möglicherweise zur Berechnung von sämpfungsbedingten Bodenbewegungen geeignet:
 - ▼ PLAXIS (als 1D-Berechnung)
 - ▼ D-Settlement (als 1D-Berechnung)
 - ▼ MODFLOW-Package SUB-WT, SUB-CR oder IBC (als 1D-Berechnung)
- ▼ Außerdem möglicherweise Abbildung von:
 - ▼ Bodenkriechen
 - ▼ hydraulisch-mechanischer Kopplung

5

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019

1 – Motivation



Ziel dieses Vorhabens ist ...

- ▼ eine Bodenbewegungsprognose,
- ▼ mithilfe der drei erwähnten Softwarelösungen,
- ▼ an zwei exemplarischen Leitnivelementpunkten (einer mit hohem, einer mit niedrigem Anteil bindiger Schichten),
- ▼ zum Vergleich mit bisheriger Methode,
- ▼ zur Ermittlung des möglichen Einflusses von Bodenkriechen und hydraulisch-mechanischer Kopplung.

6

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Facharbeitsgruppensitzung LANUV

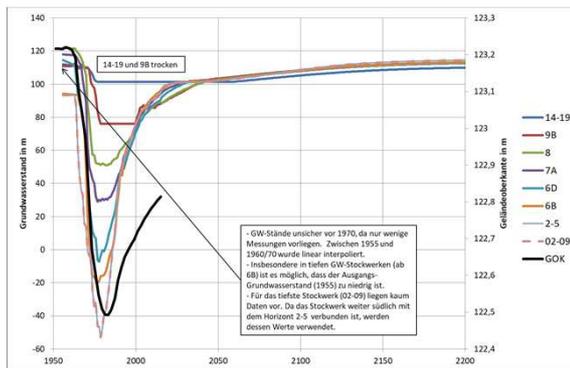
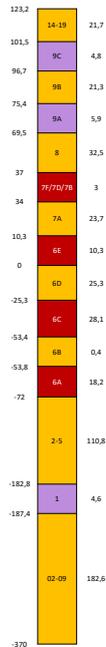
10.10.2019

Methodenvergleich Niedermerz

7

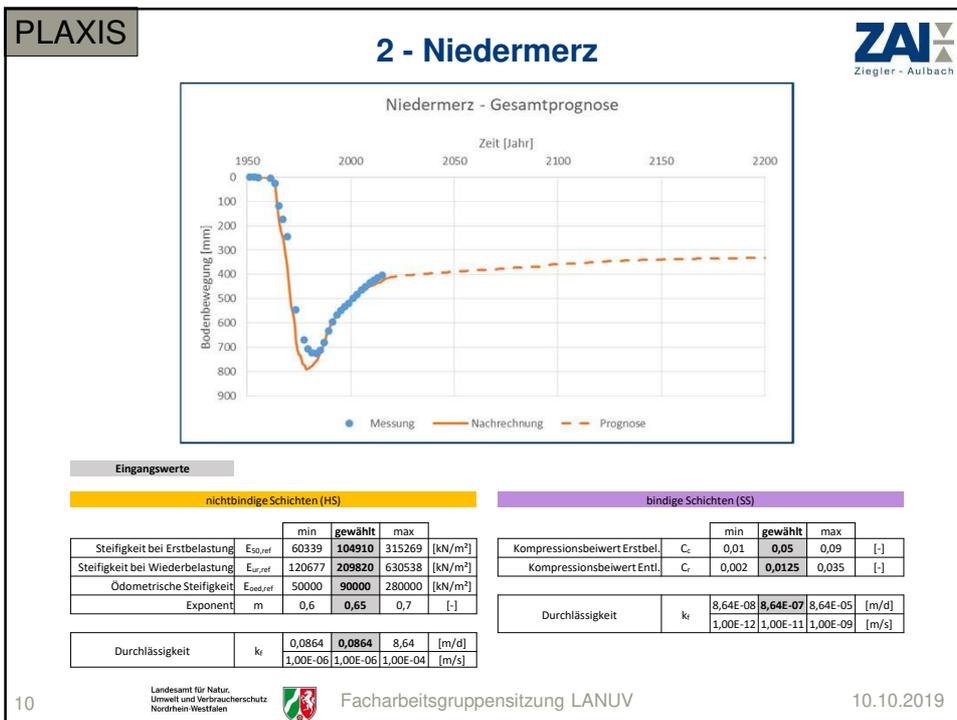
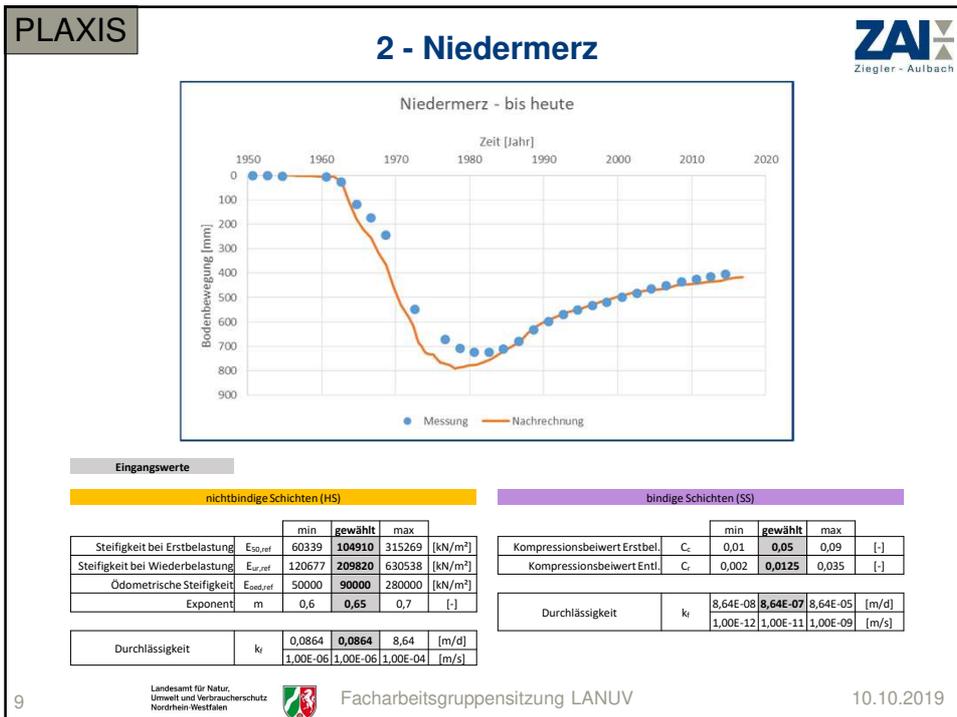


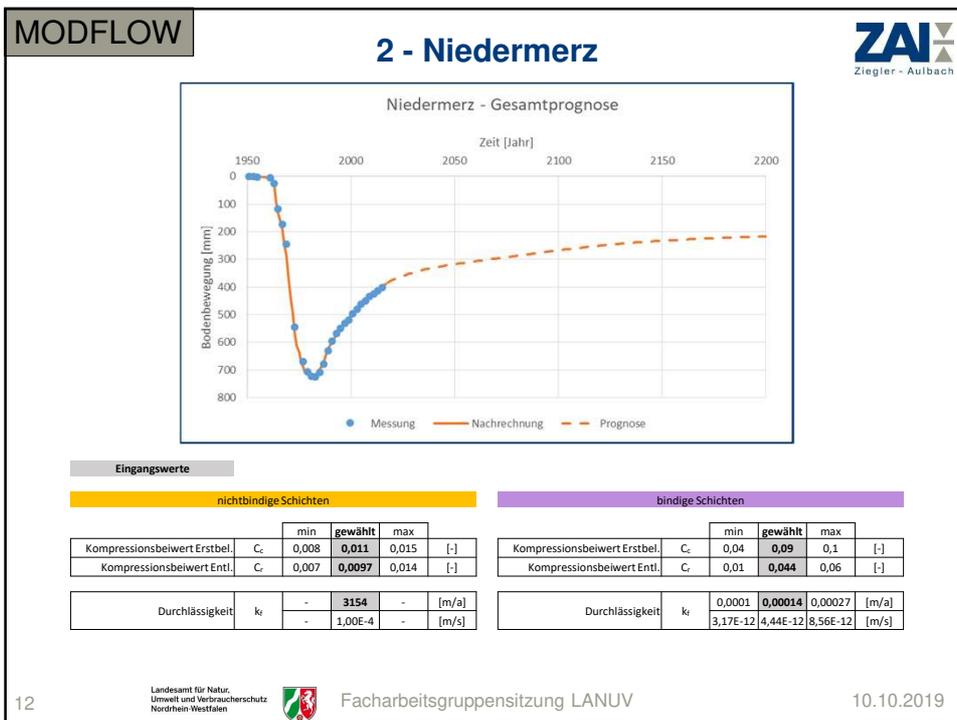
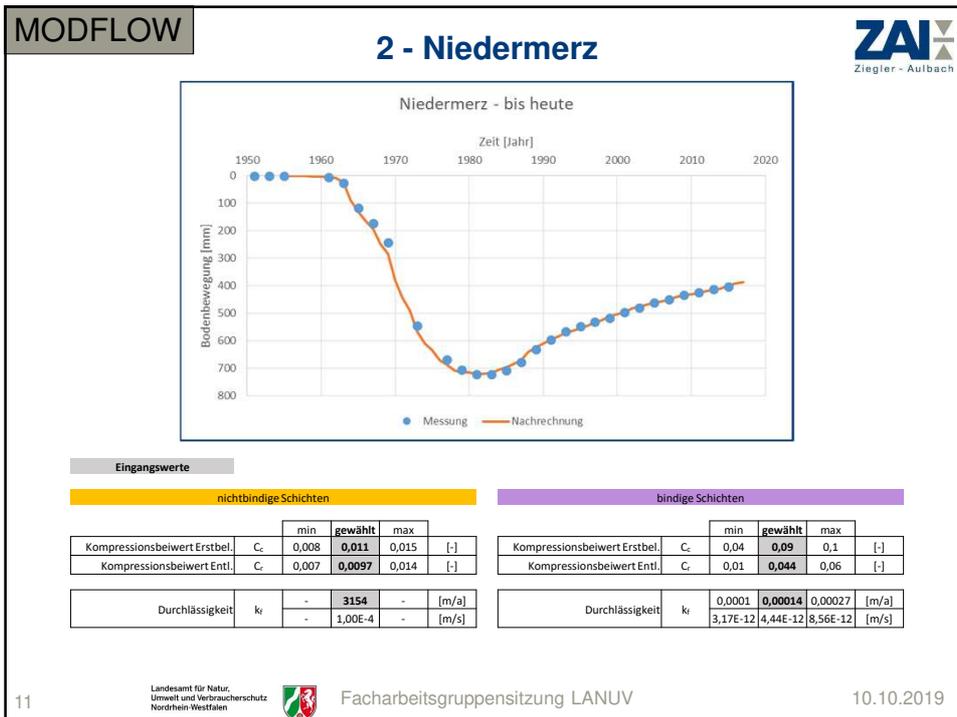
2 - Niedermerz

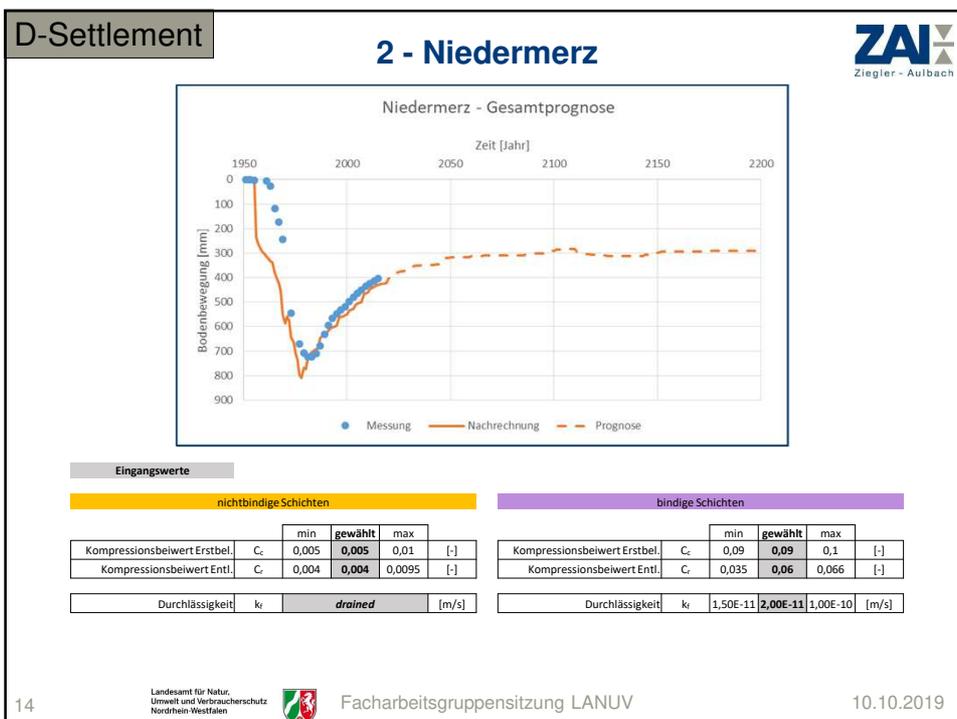
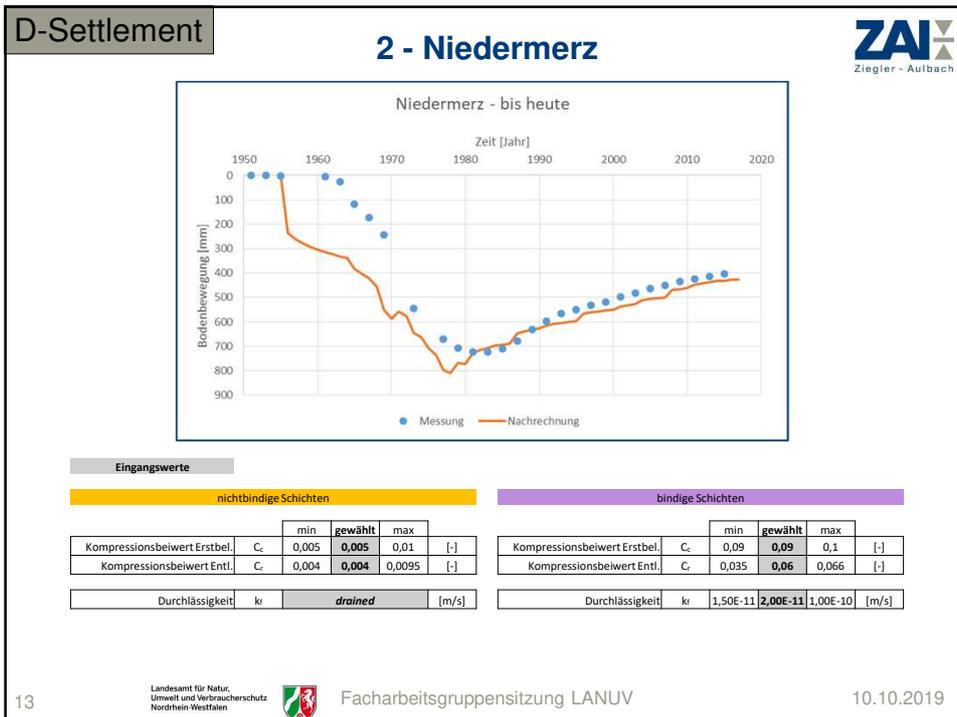


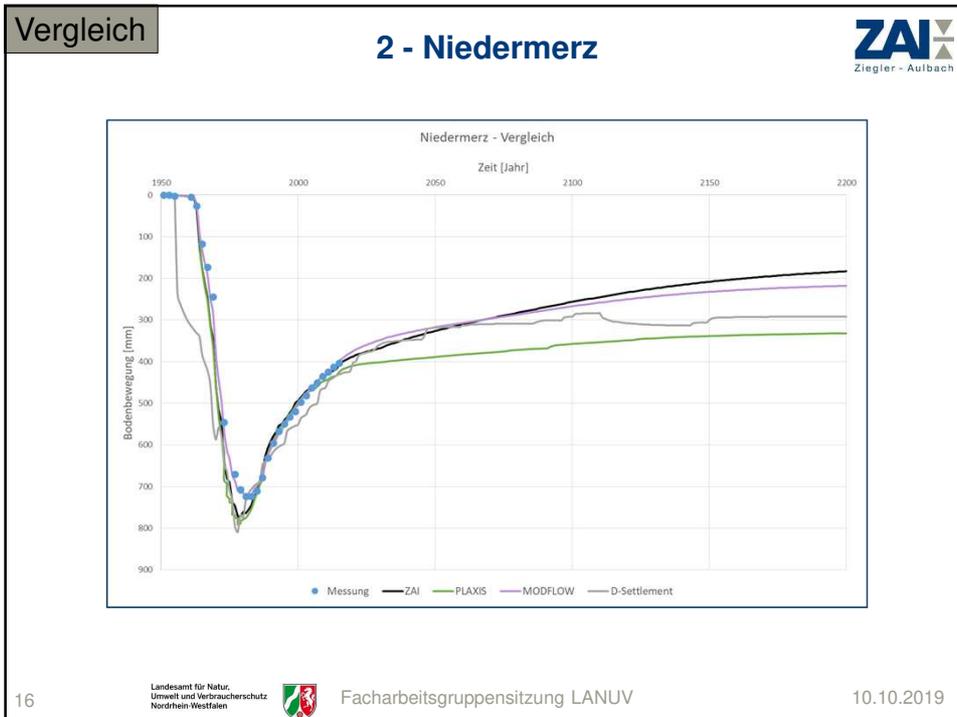
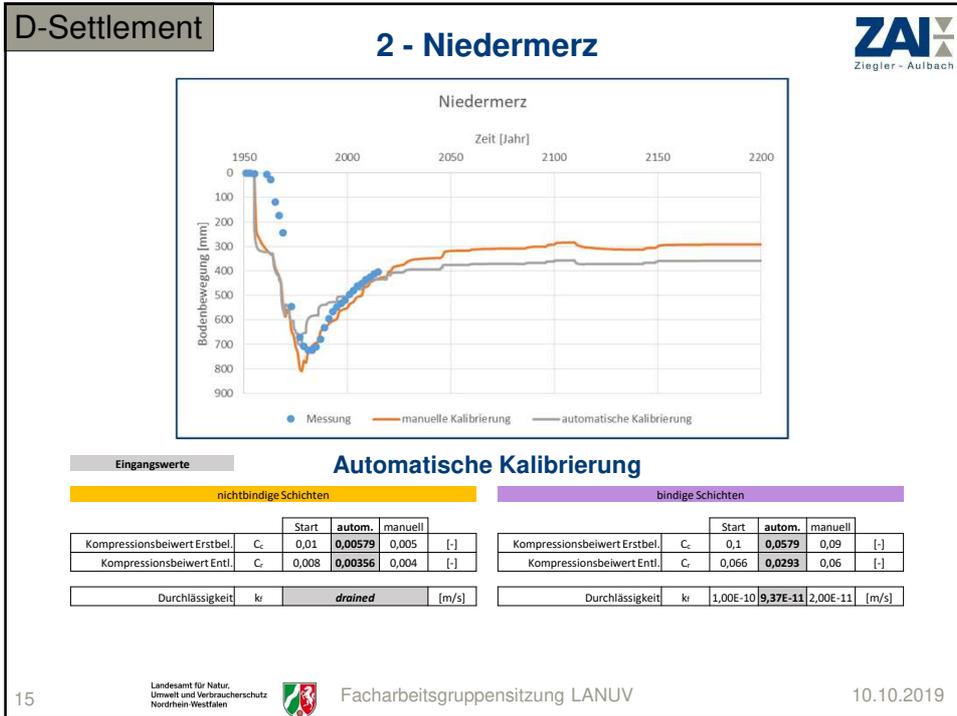
8

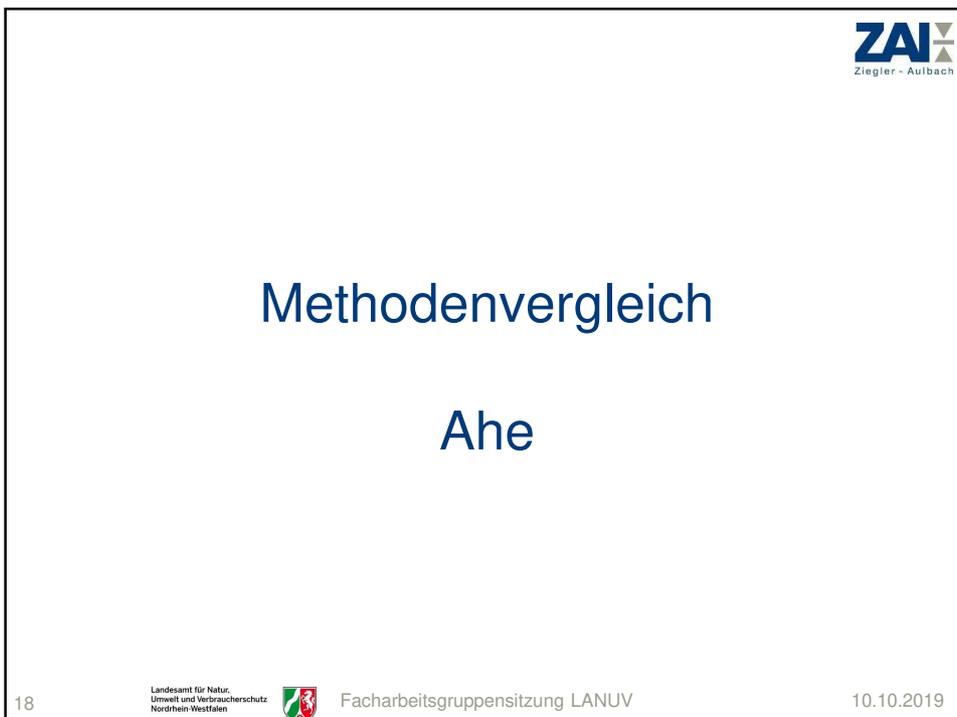
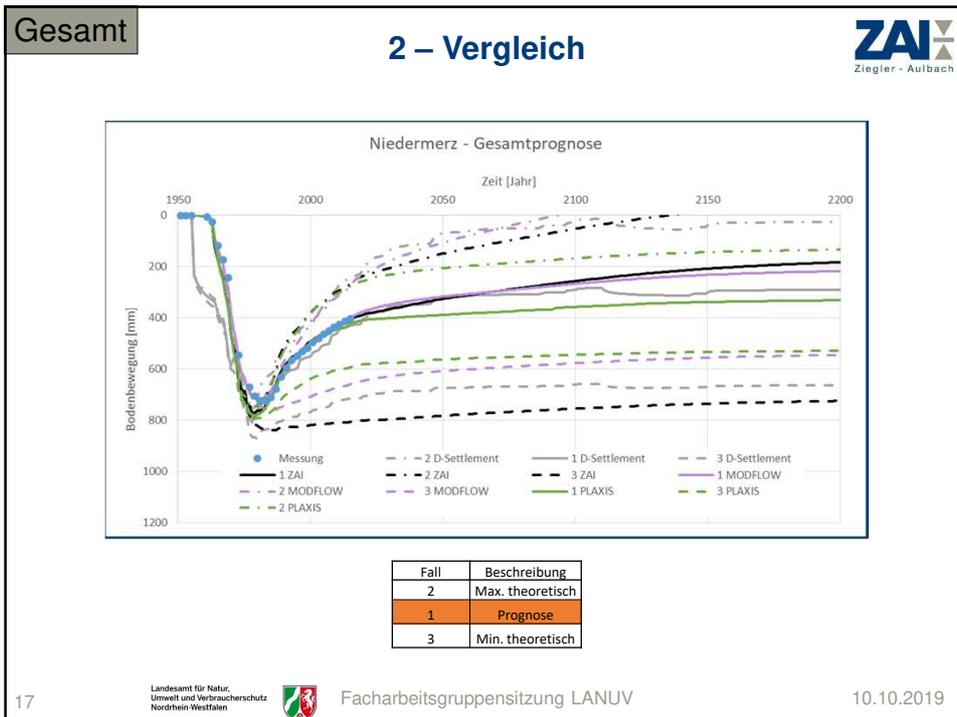


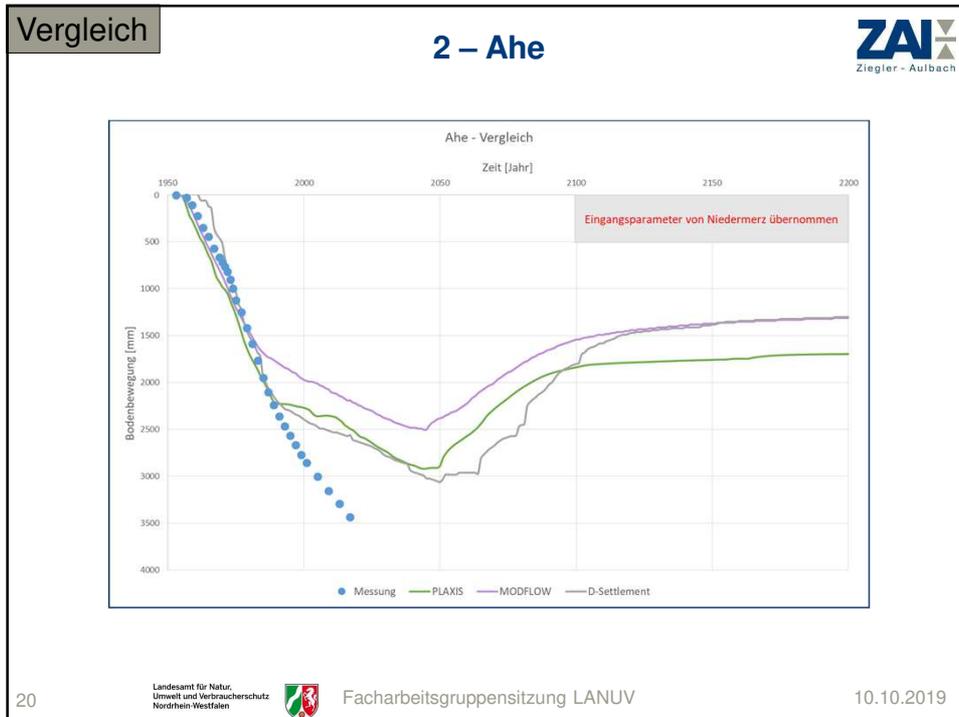
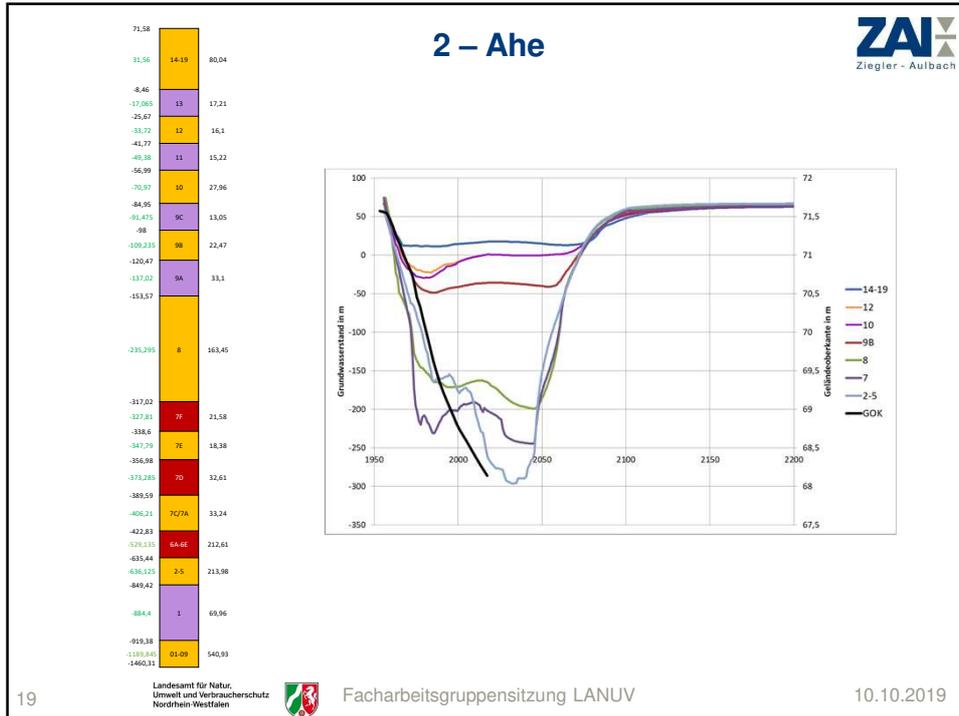


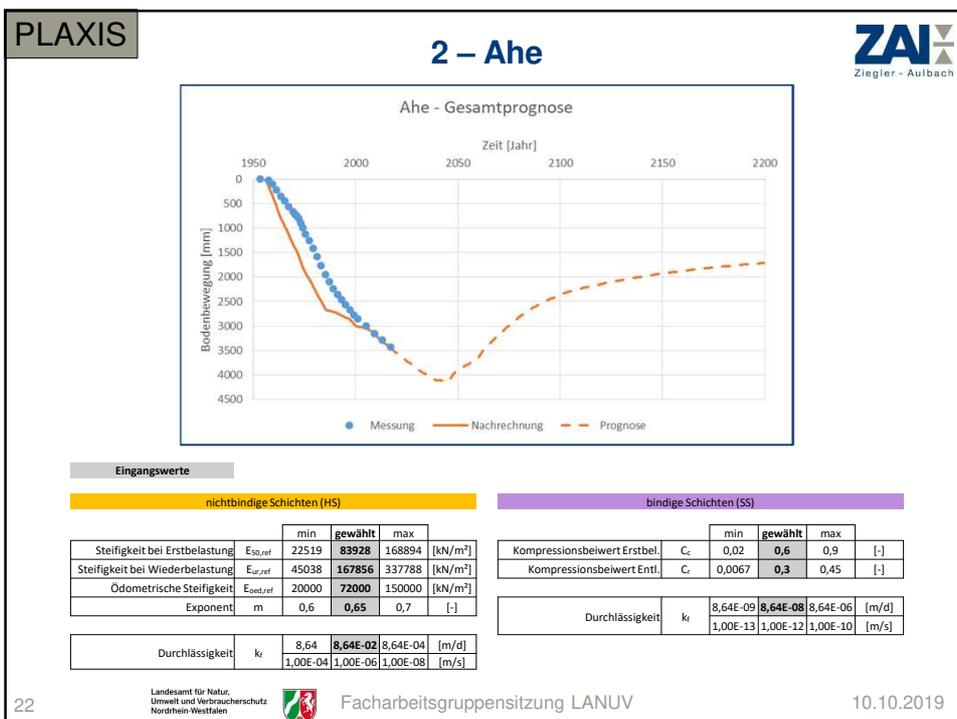
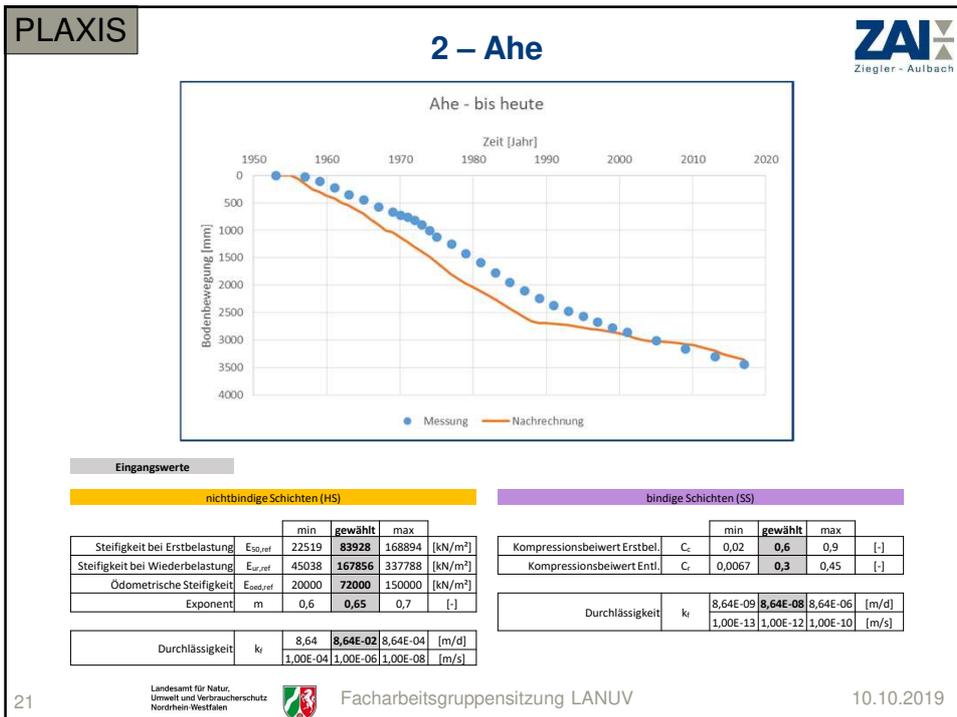


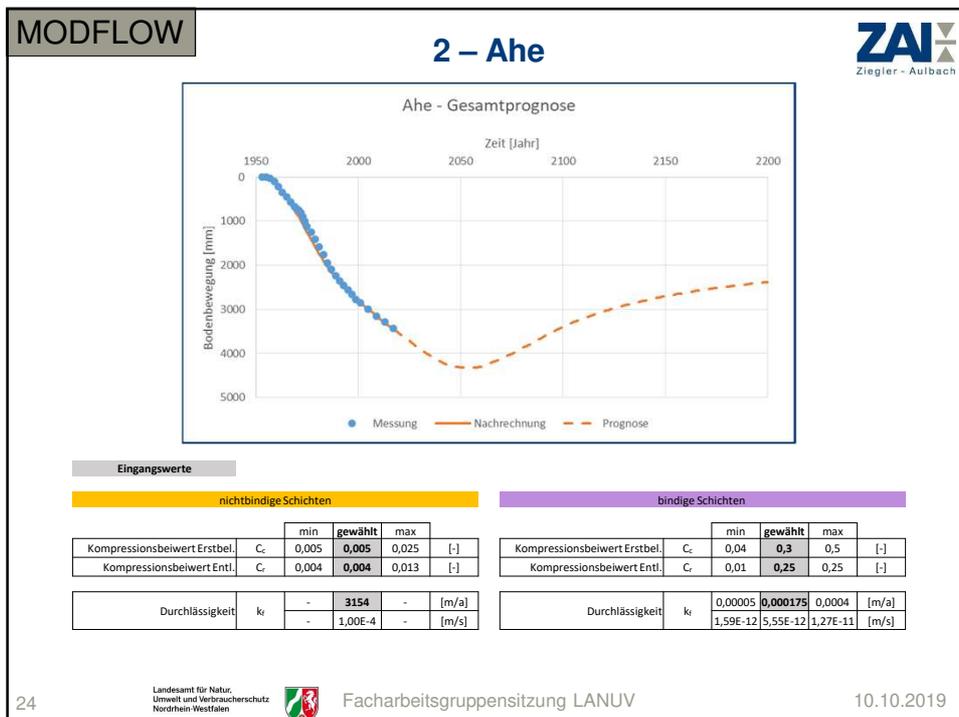
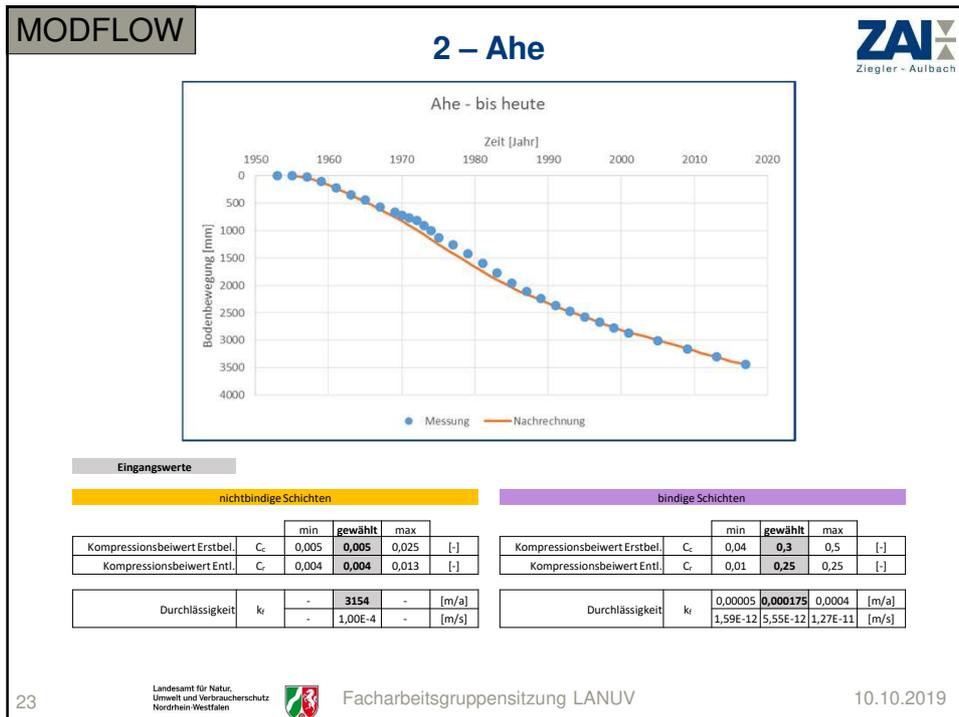


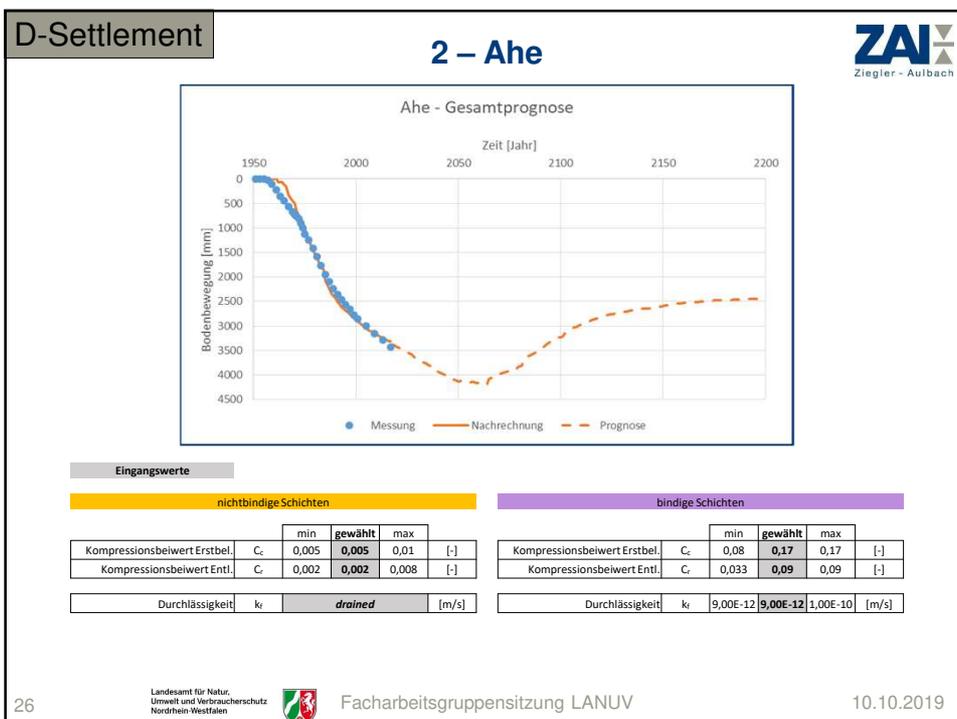
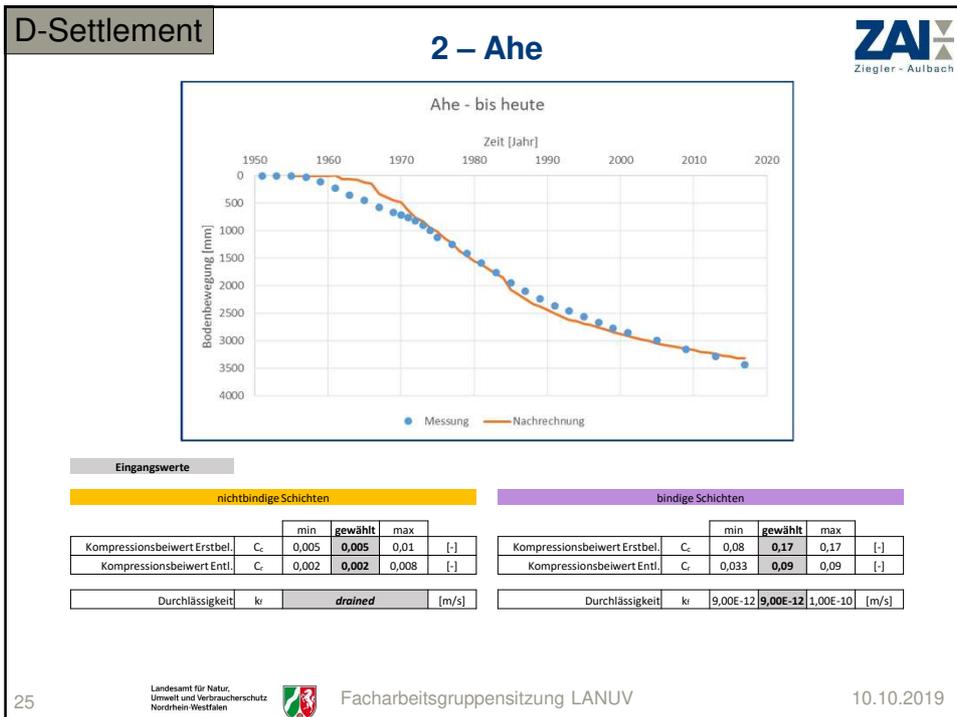


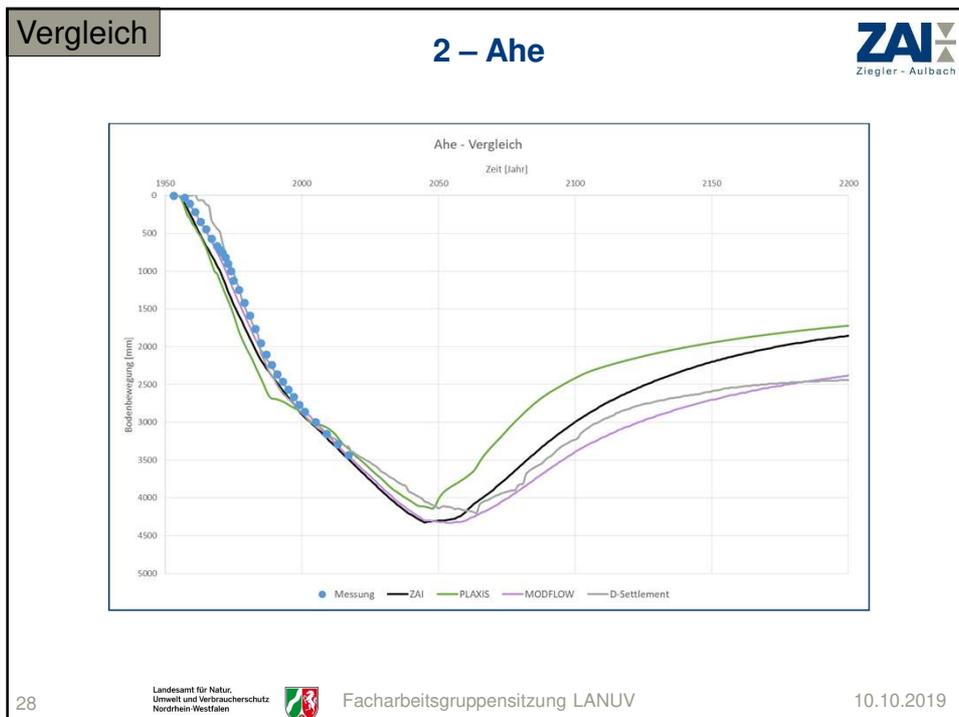
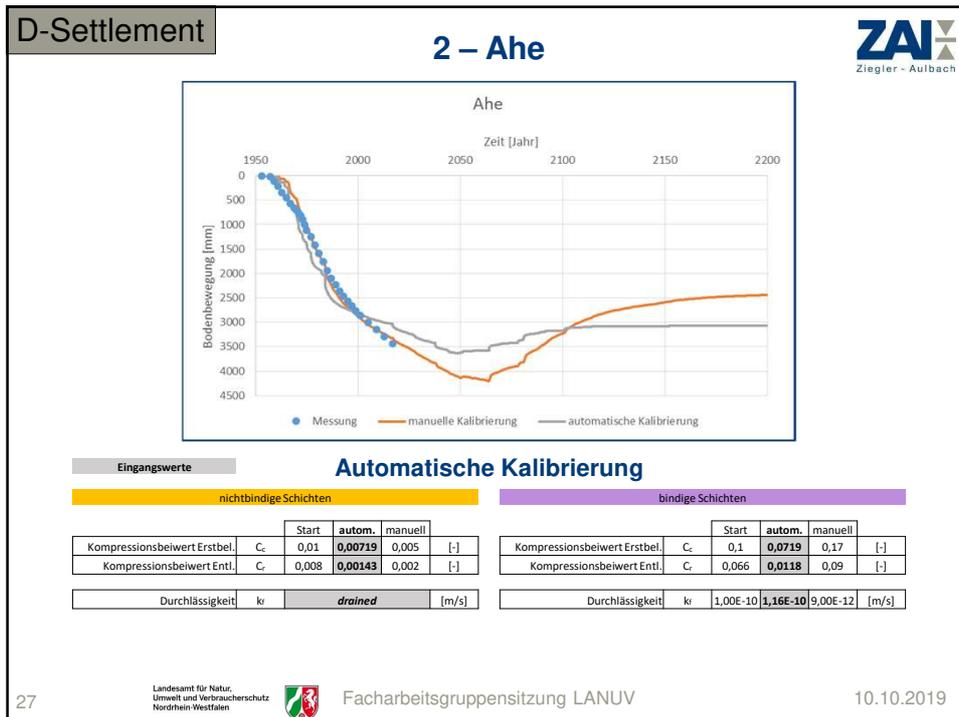


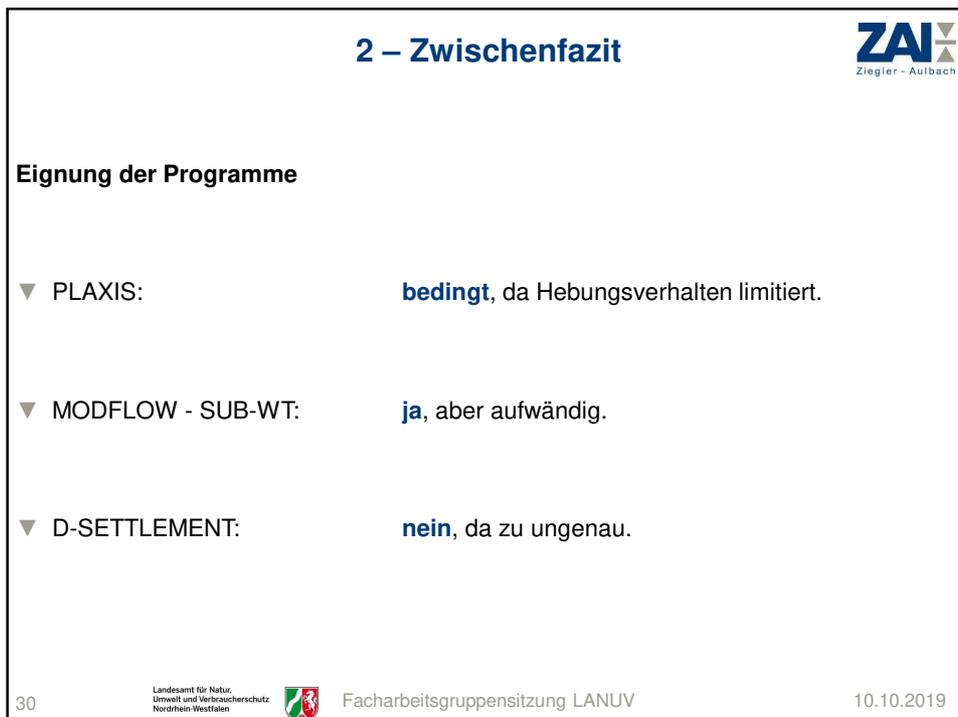
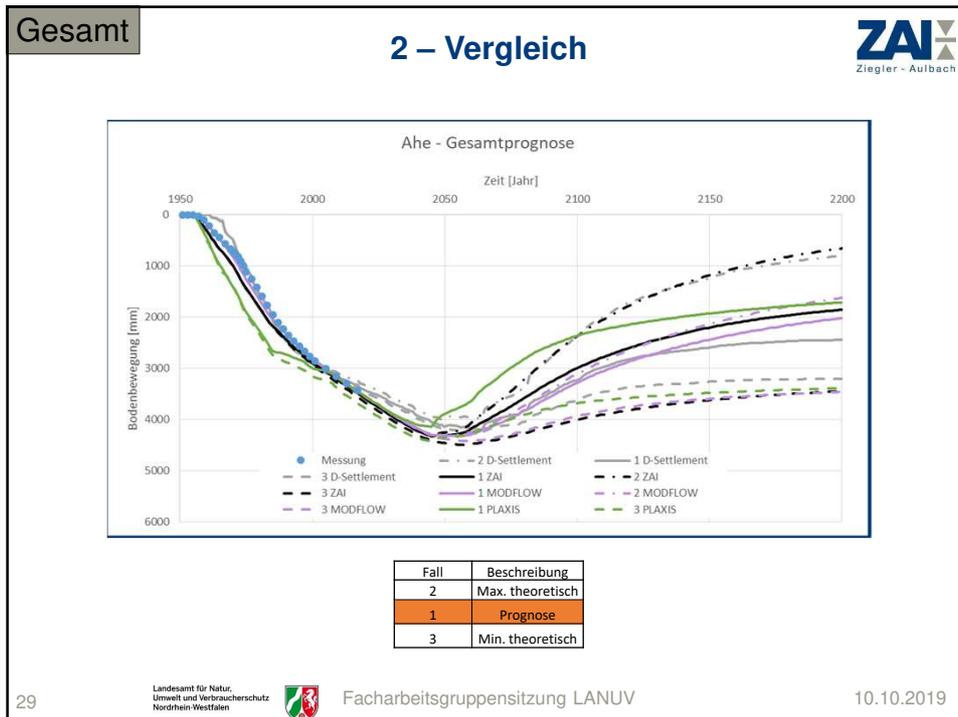






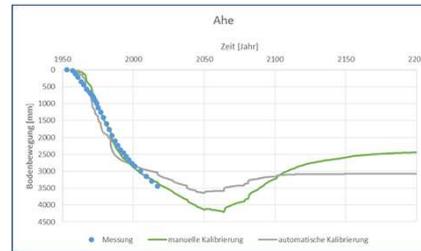
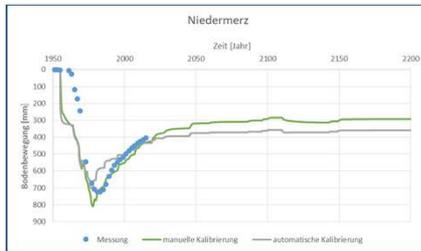






2 – Zwischenfazit

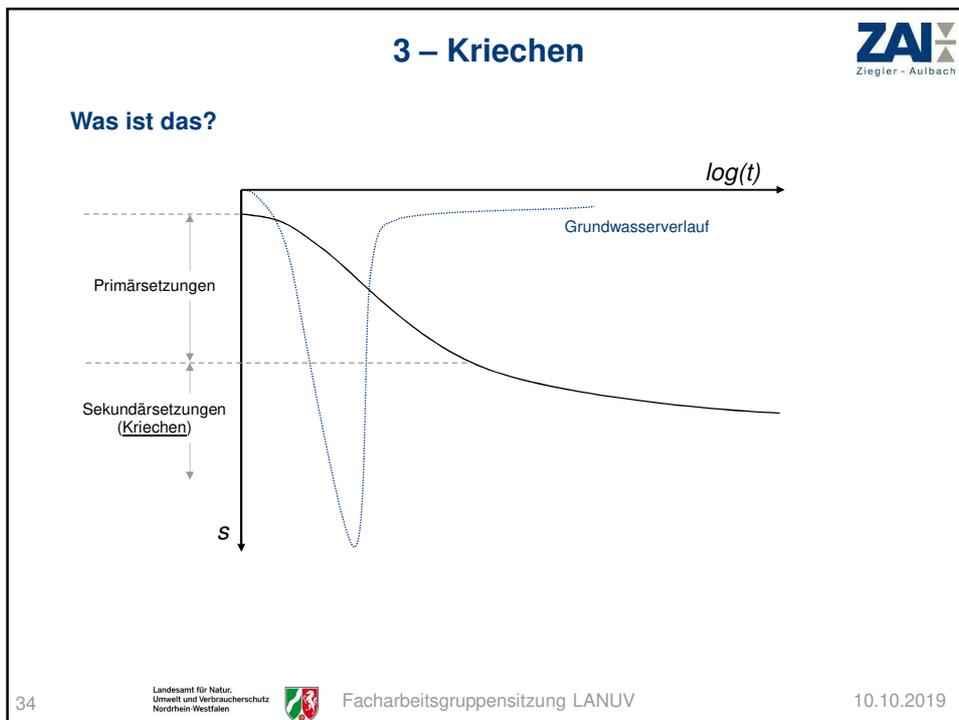
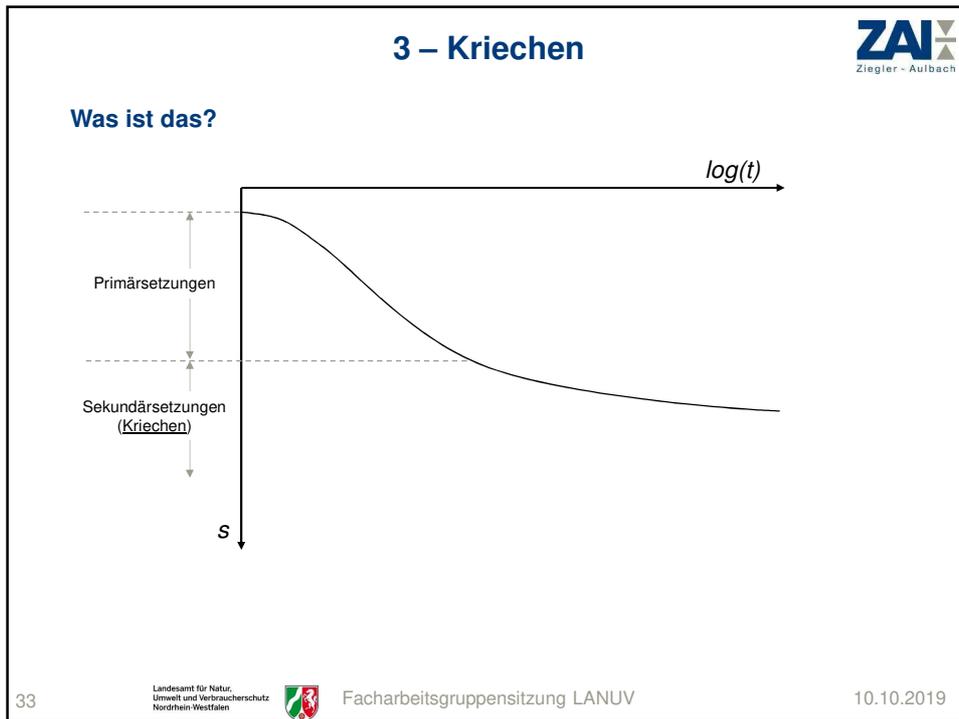
Automatische Kalibrierung



- ▼ Möglichkeiten begrenzt bzw. für vorliegenden Fall nicht optimal (z.B. keine Unterscheidung zwischen Bodenarten möglich, sondern „globale“ Variation)
- ▼ Ergebnisse werden nicht besser als bei manueller Kalibrierung

Kein Vorteil

Kriechen



3 – Kriechen



Was ist das?

- ▼ Zeitabhängige Setzung (in Abhängigkeit der Überkonsolidierung)
- ▼ Umlagerung des Korngerüstes
- ▼ Auch als Sekundärsetzung bezeichnet
- ▼ Kann bei bindigen Böden von Bedeutung sein
- ▼ Tritt erst nach Abschluss der Konsolidierung auf
- ▼ Rechnerische Berücksichtigung über den Kriechbeiwert C_α

35

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

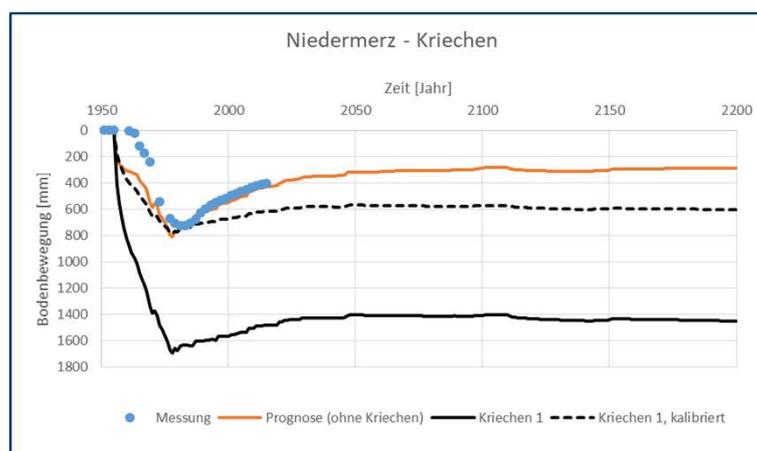


Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019

D-Settlement

3 – Kriechen



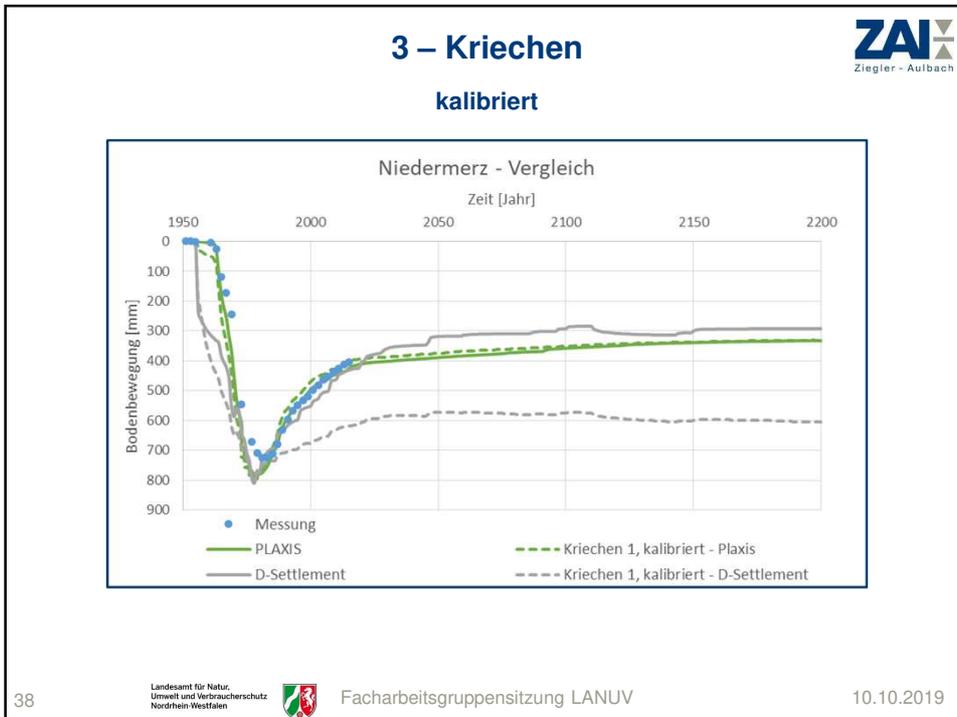
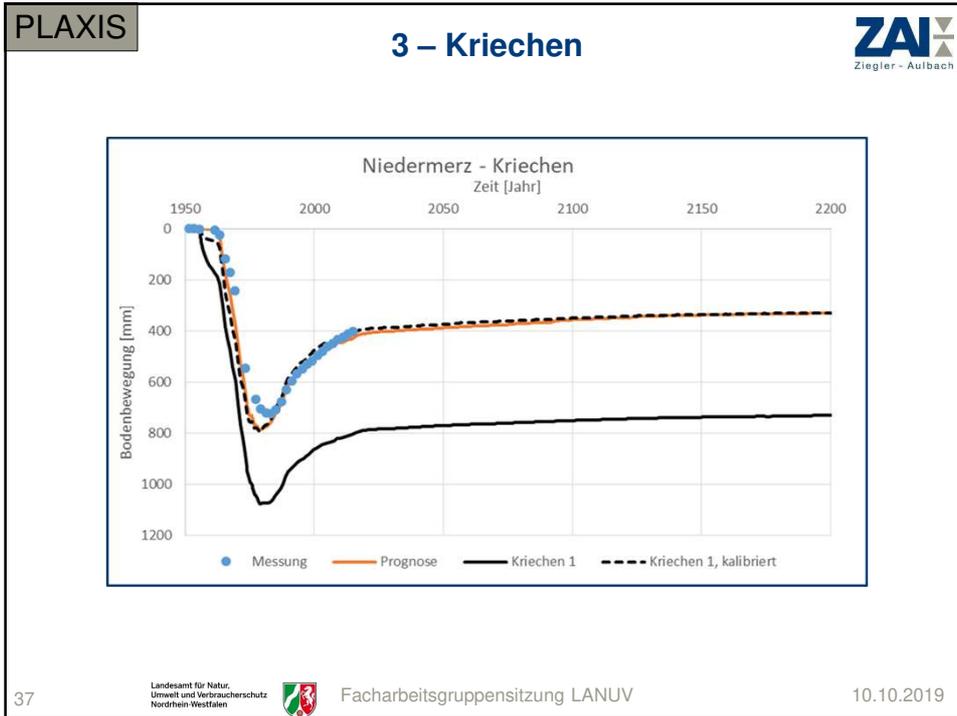
36

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



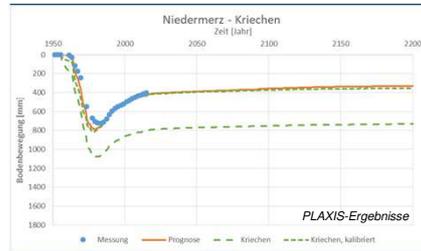
Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019



3 – Kriechen

Zwischenfazit



- ▼ Ohne Kalibrierung keine zutreffende Abbildung möglich
- ▼ Mit Kalibrierung entweder vernachlässigbar oder unlogisch
- ▼ Ergebnisse werden nicht genauer oder besser

Nicht notwendig

Hydraulisch- mechanische Kopplung

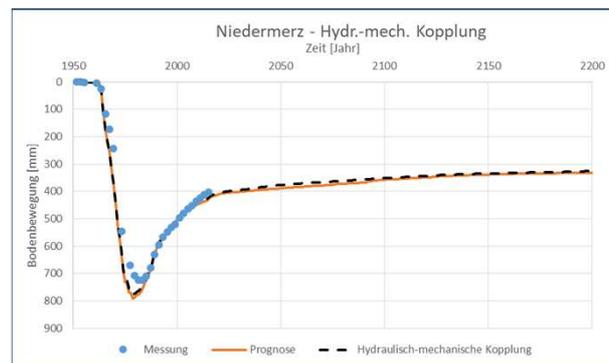
4 – Hydr.-mech. Kopplung

Was ist das?

- ▼ Berücksichtigung einer Änderung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Dehnung

$$k = k_0 \cdot 10^{-\frac{1+e_0}{c_k} \cdot \varepsilon} \quad \Leftrightarrow \quad \log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

4 – Hydr.-mech. Kopplung



- Berücksichtigung von Änderungen der Durchlässigkeit mit Änderung der Porenzahl möglich (Parameter c_k):

$$\log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

D-Settlement

4 – Hydr.-mech. Kopplung

ZAI
Ziegler - Aulbach

Niedermerz - Hydr.-mech. Kopplung

Eingangswerte

nichtbindige Schichten				bindige Schichten			
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,005	[-]	Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,09	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_c	0,004	[-]	Kompressionsbeiwert Entl.	C_c	0,06	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained	[m/s]	Durchlässigkeit	k_f	2,00E-11	[m/s]
Permeability strain modulus		PSM	0,0237	0,0474*	0,0948	[-]	

$$PSM = \frac{C_c k_f}{1+e_0} = \frac{C_c}{1+e_0}$$

*entspricht Empfehlung D-Settl.-Manual

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019

D-Settlement

4 – Hydr.-mech. Kopplung

ZAI
Ziegler - Aulbach

Niedermerz - Hydr.-mech. Kopplung

Eingangswerte

nichtbindige Schichten				bindige Schichten			
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,005	[-]	Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,09	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_c	0,004	[-]	Kompressionsbeiwert Entl.	C_c	0,06	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained	[m/s]	Durchlässigkeit	k_f	2,00E-11	[m/s]
Permeability strain modulus		PSM	0,0237	0,0474*	0,0948	[-]	

$$PSM = \frac{C_c k_f}{1+e_0} = \frac{C_c}{1+e_0}$$

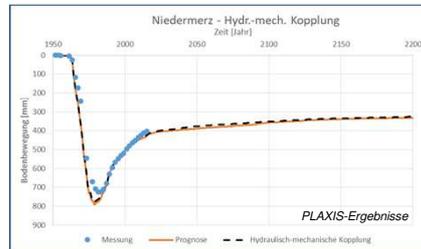
*entspricht Empfehlung D-Settl.-Manual

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019

4 – Hydr.-mech. Kopplung Zwischenfazit



- ▼ Hat einen sehr geringen Einfluss auf die Größe der Setzung.
- ▼ Hat einen unwesentlichen Einfluss auf den Charakter des Setzungsverlaufes.
- ▼ Ergebnisse werden nicht genauer oder besser

Nicht notwendig

Endbewertung

PLAXIS

5 – Endbewertung



- ▼ PLAXIS ist ein vollwertiges Finite Elemente-Programm, das „auch“ für die eindimensionale Bewegungsprognose genutzt werden kann; d.h. viele numerische Parameter zu definieren, die für das betrachtete Problem eigentlich nicht relevant sind
- ▼ *Handling*: Mit ein wenig Einarbeitungszeit gut zu bedienen, Erfahrung in FE-Modellierung von Vorteil
- ▼ *Handling*: Einlesen der GW-Ganglinien über Textdateien
- ▼ *Handling*: Ein- und Ausgabe über grafische Oberfläche, Benutzerführung über Sequenz von Eingabefeldern, Vielzahl von Ausgabevariablen

47

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

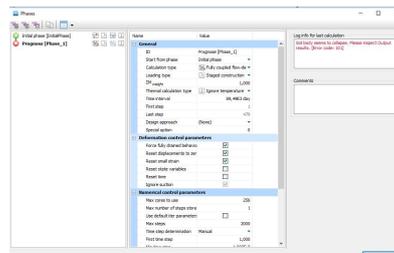
10.10.2019

PLAXIS

5 – Endbewertung



- ▼ Zur Berücksichtigung der gewünschten Bodeneigenschaften sind hochwertige Materialmodelle erforderlich => keine einfachen funktionalen Zusammenhänge der Modellparameter
- ▼ PLAXIS beschränkt in allen verwendeten Materialmodellen das Steifigkeitsverhältnis: $E_{50}^{ref} / E_{ur}^{ref} \leq 0,5$
- ▼ Für einige Parameterkombinationen ergeben sich numerische Konvergenzprobleme, die keine physikalische Entsprechung haben können



48

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019

MODFLOW

5 – Endbewertung

ZAI
Ziegler - Aulbach

- ▼ MODFLOW ist „nur“ Compiler:
Grafische Benutzeroberfläche (GUI) zusätzlich benötigt
(*ModelMuse* kostenlos verfügbar) 
- ▼ *Handling*: Keine intuitive Bedienung, lange Einarbeitungszeit,
Programmierverständnis hilfreich 
- ▼ *Handling*: Ausgabe nur als Text-Datei;
Ergebnisdarstellung z.B. über Excel möglich 

49  Facharbeitsgruppensitzung LANUV 10.10.2019

MODFLOW

5 – Endbewertung

ZAI
Ziegler - Aulbach

- ▼ ModelMuse auf 40 Layer beschränkt:
Auf Anfrage von ZAI Umprogrammierung/Erweiterung
durch den Entwickler (USGS) 
- ▼ SUB-WT: Keine hydraulisch-mechanische Kopplung möglich
Nachfrage bei Entwickler bestätigt, dass dies nicht möglich ist 
- ▼ SUB-WT: Kein Kriechen möglich
Nachfrage bei Entwickler bestätigt, dass dies nicht möglich ist 

50  Facharbeitsgruppensitzung LANUV 10.10.2019

D-Settlement **ZAI**
Ziegler - Aulbach

5 – Endbewertung

- ▼ Kein Einlesen von Grundwasserganglinien möglich. Einzelne Wasserstände müssen über jeweils drei verschiedene Schritte manuell eingegeben werden. Copy+Paste kann bei diesen Schritten nicht effektiv eingesetzt werden. ●
- ▼ 250 Jahre, sieben verschiedene GW-Leiter (Niedermerz), jeweils 3 Schritte – über 5000 Einzelschritte wären zur Eingabe notwendig
- ▼ Die implementierte automatisierte Kalibrierung verändert alle Werte global. Eine Unterscheidung der Schichttypen findet nicht statt! Daher sind die Ergebnisse sehr ungenau. Manuell sind die Kurven besser zu kalibrieren. ●

51 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  Facharbeitsgruppensitzung LANUV 10.10.2019

D-Settlement **ZAI**
Ziegler - Aulbach

5 – Endbewertung

- ▼ Maximale 89 verschiedenen Wasserständen möglich Nachfrage bei Deltares bestätigt, dass nicht mehr möglich evtl. in einer nächsten Version 200 << 2000 ●
↓
●
↓
●
- ▼ Notlösung: Verwendung von stark vereinfachten Grundwasserganglinien möglich. ●

52 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  Facharbeitsgruppensitzung LANUV 10.10.2019

5 – Endbewertung			
Programmvergleich			
Software	PLAXIS	MODFLOW SUB-WT	D-Settlement
Einschränkungen	- Verhältnis Cc zu Cr begrenzt - Teilweise numerische Probleme	- Programmierverständnis oder 2. Software für Eingabe erford. - keine hydr.-mech. Kop. / kein Kriechen	- begrenzte Anzahl an Wasserständen
Qualität der Nachrechnung	0	+	-
Handling	- Nach Einarbeitungszeit gut zu bedienen - Komplexere Materialmodelle als für dieses Problem notwendig (zusätzliche Eingaben) - Einfaches Einlesen der GW-Ganglinien möglich - Viele Möglichkeiten der Darstellung und Ausgabe der Ergebnisse	- Längere Einarbeitungszeit erforderlich - Modellerstellung aufwendig - Einfaches Einlesen der GW-Ganglinien möglich - In Summe 5 Programme erforderlich: MODFLOW, SUB-WT, ModelMuse, ModelViewer & Excel	- Nach Einarbeitungszeit gut zu bedienen - Geom. Modellerstellung überschaubar - kein autom. Einlesen von mehreren Wasserständen - mehrschrittige manuelle Eingabe erforderlich - Grafische Darstellung und Ausgabe der Ergebnisse

53

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019



5 – Endbewertung	
Eignung der Programme	
▼ PLAXIS:	bedingt , da Hebungsverhalten limitiert.
▼ MODFLOW - SUB-WT:	ja , aber aufwändig.
▼ D-SETTLEMENT:	nein , da zu ungenau.
▼ ZAI:	ja , durch Methodenvergleich nochmals bestätigt.
Berücksichtigung weitere Effekte:	
▼ Hydraul.-Mech. Kopplung:	nicht notwendig , da vernachlässigbar.
▼ Kriechen:	nicht notwendig , da vernachlässigbar/unlogisch.

54

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019





ZAI
Ziegler - Aulbach

„It all starts with solid ground engineering“

55

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Facharbeitsgruppensitzung LANUV

10.10.2019