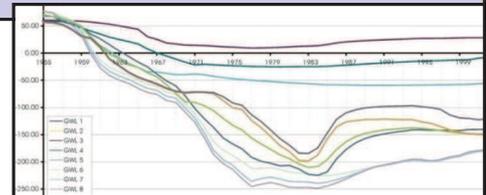


Modellierung und Prognose der aus Grundwasserabsenkung und Grundwasserwiederanstieg resultierenden Bewegungen der Geländeoberfläche

Martin Ziegler
RWTH Aachen

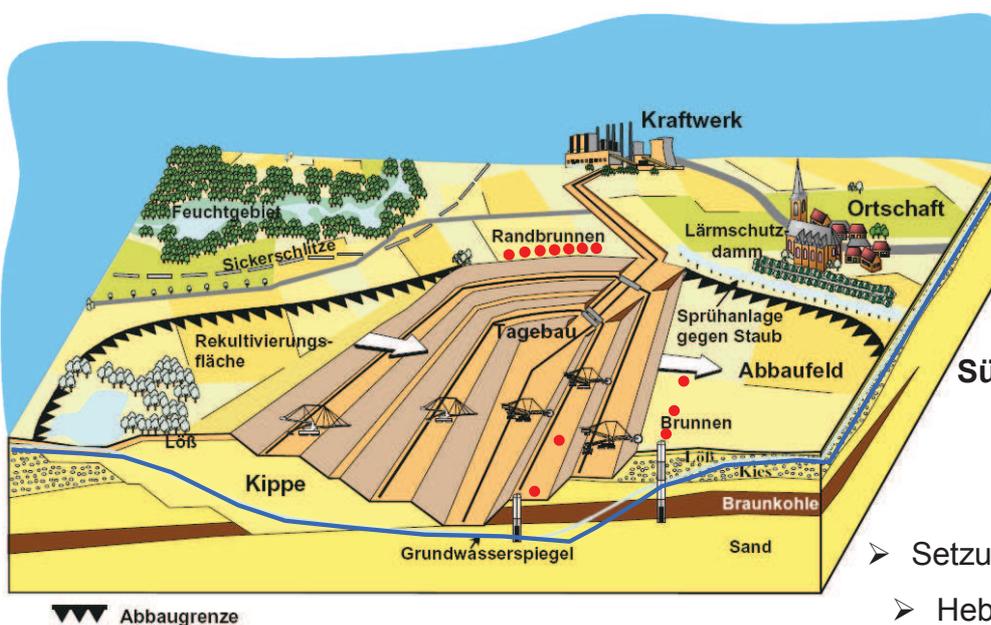
Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung
2. Bodenmechanische Grundlagen
 - Kompressionsverhalten
 - Konsolidationsverhalten
3. Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004
4. Grundlagen Modell Ziegler/Aulbach 2016



Einleitung und Problemstellung

Schema eines Braunkohlentagebaues im Rheinischen Revier

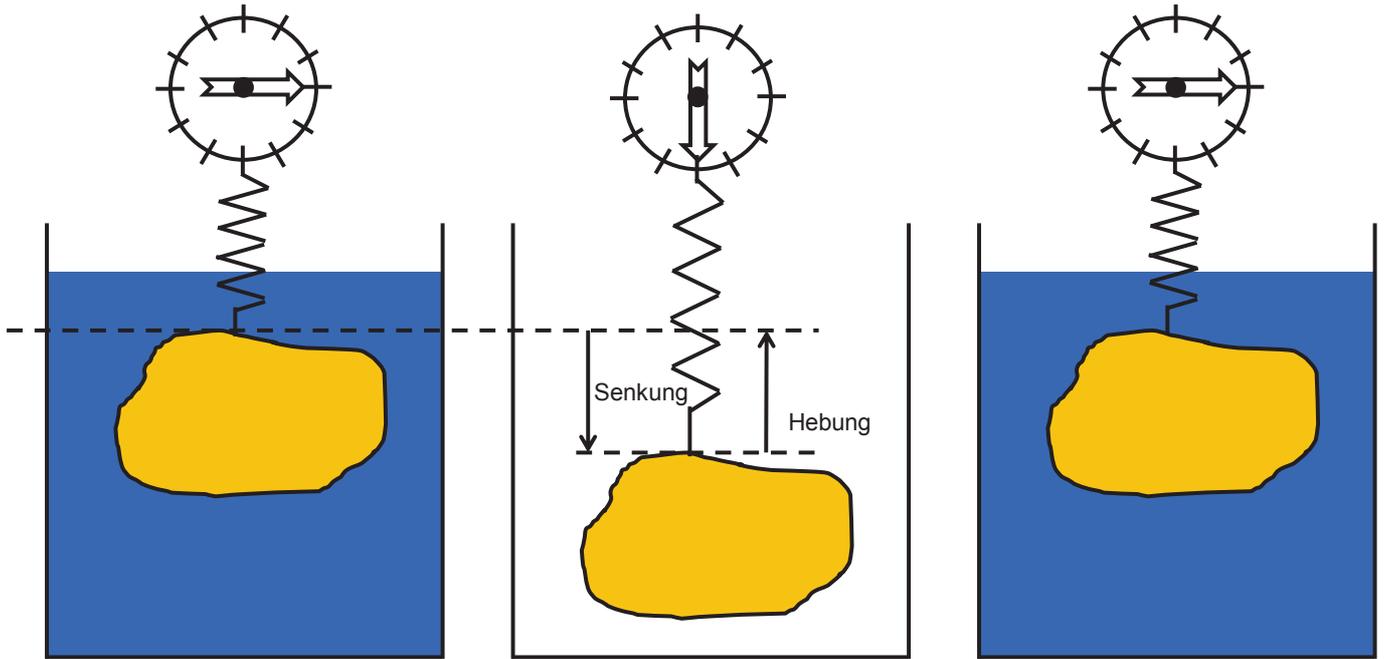


Sümpfungsmaßnahmen

- seit Mitte 50er
- Fläche 3000 km²
- Setzungen bei GW-Absenkung
- Hebungen bei GW-Anstieg

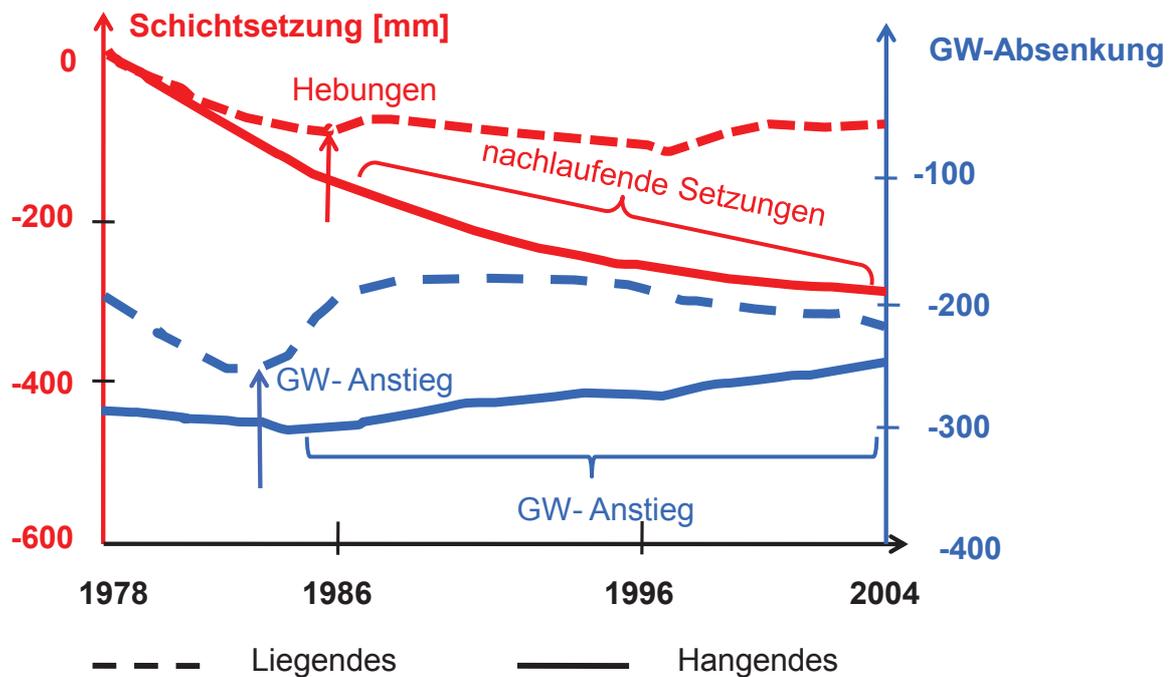
Schema Braunkohletagebau mit Sümpfungsmaßnahmen (Quelle Debriv)

Einleitung und Problemstellung



Erwartete Auftriebswirkung bei Grundwasserabsenkung und -wiederanstieg

Einleitung und Problemstellung



Gemessene GW-Änderungen und zugehörige Schichtbewegungen

Einleitung und Problemstellung

Markscheiderische Prognose

Prinzip: „Betrag der GW-Absenkung → Senkungsrate“

Hebungen = Hebungsfaktor ($<1,0$) · Senkungsrate

Modelldefizit bei GW- Anstieg: keine nachlaufenden Senkungen abbildbar

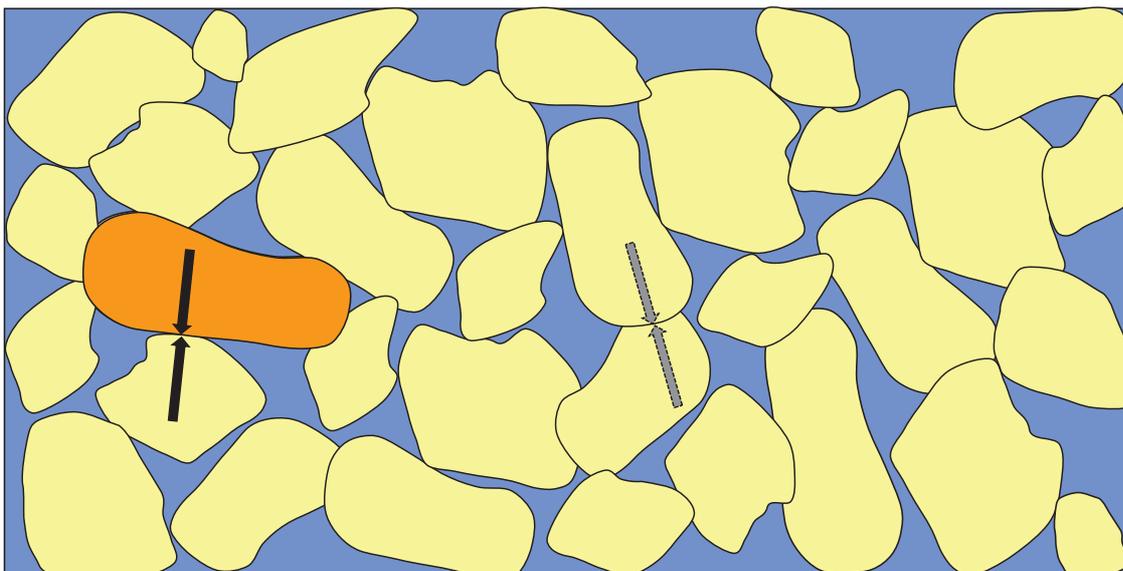
Model GiB (Ziegler/Giese - 2004)

- Basierend auf bodenmechanischen Grundsätzen (Konsolidierungstheorie v. Terzaghi)
- Einbeziehung des tatsächlichen Schichtprofils und der GW-Ganglinien
- Verwendung gemessener oder nachvollziehbar sinnvoll abgeleiteter Bodenparameter
- Möglichst nur ein Satz Bodenparameter für eine Scholle
- Möglichst schichtgenaue Kalibrierung anhand Daten von Versuchsbrunnen
- Kalibrierung der Eingangsparameter nur in physikalisch sinnvollen Grenzen

Literatur: Ziegler, M.; Giese, S.; Schaefer, W.; Forkel, Ch.:
Prognose sumpfbingsbedingter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier.
In: *Geotechnik 30* (2007), H. 1, S. 48-54.



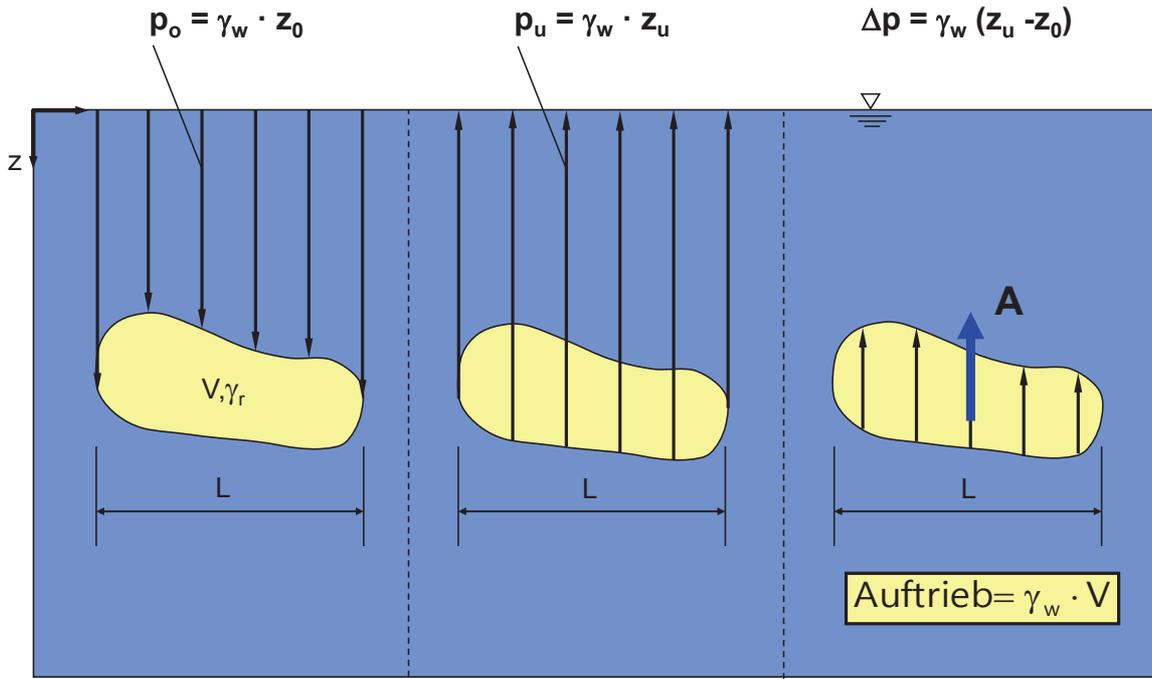
Bodenmechanische Grundlagen



Vereinfachtes Bodenmodell mit wassergefüllten Poren und Punktkontakten



Bodenmechanische Grundlagen



a) Druck von oben

b) Druck von unten

c) Auftrieb als resultierende Druckkraft
= Gewicht des verdrängten Wasservolumens

Auftrieb nach dem Prinzip des Archimedes

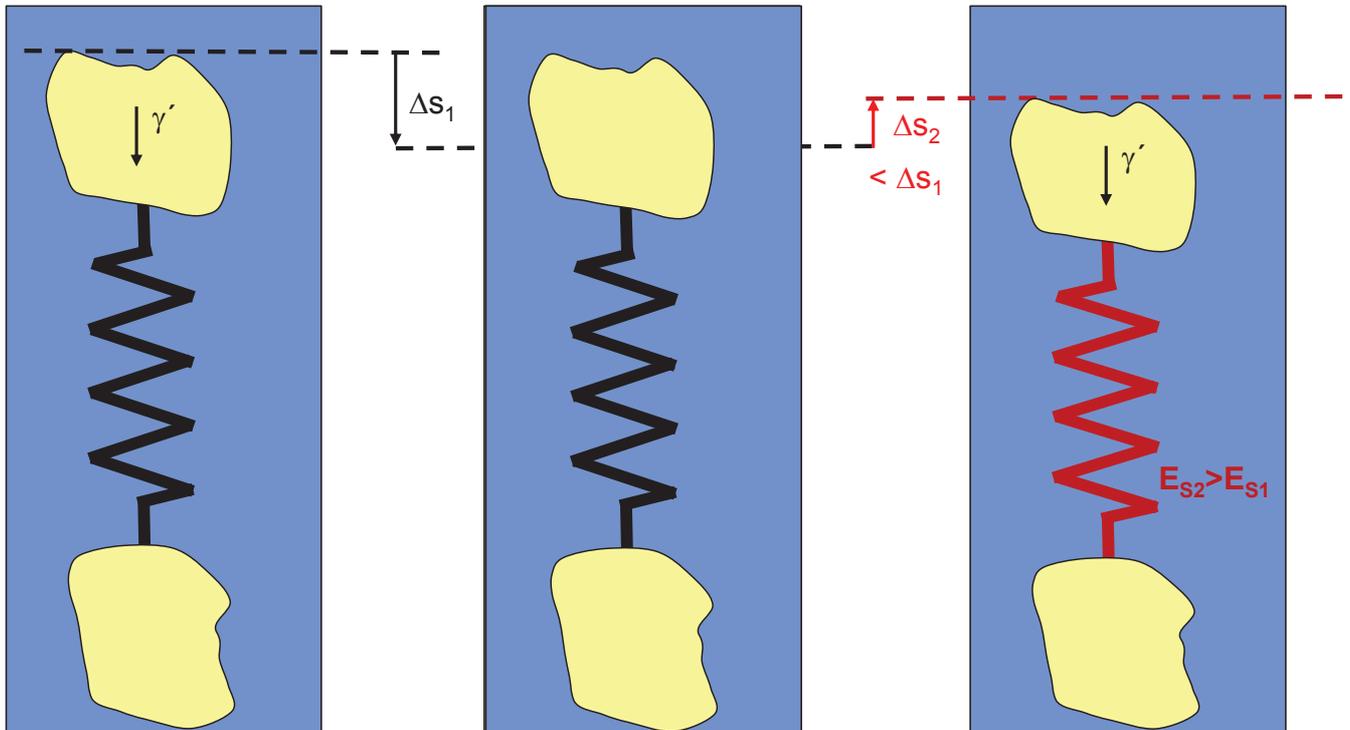
7.2.17

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



7

Bodenmechanische Grundlagen



Ursprüngliche Situation

GW-Absenkung

GW-Wiederanstieg

7.2.17

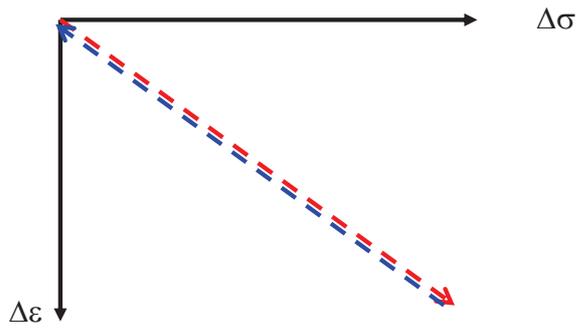
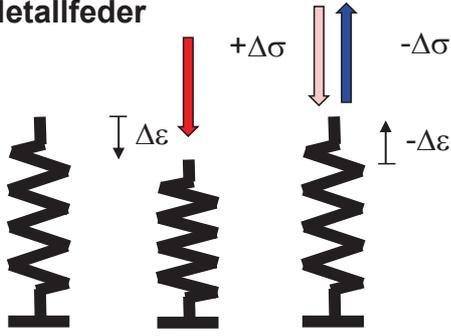
Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



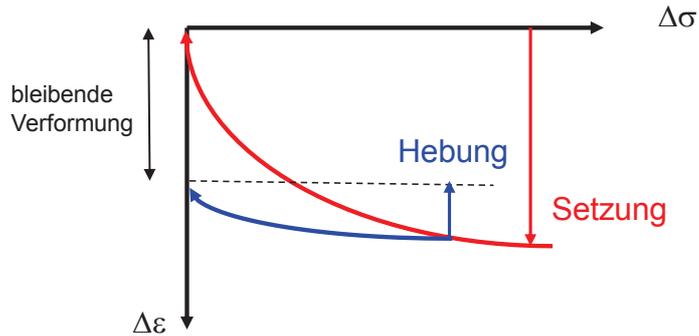
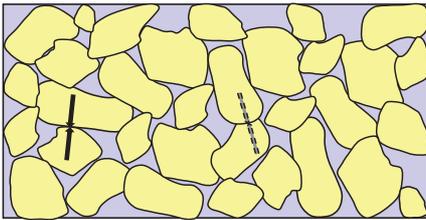
8

Bodenmechanische Grundlagen

Metallfeder



Boden

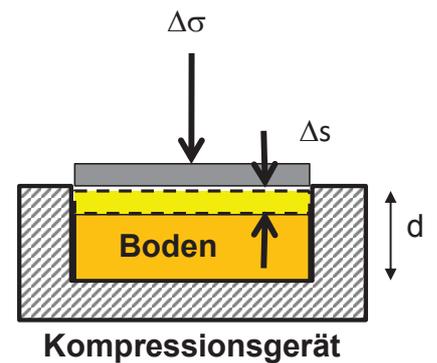
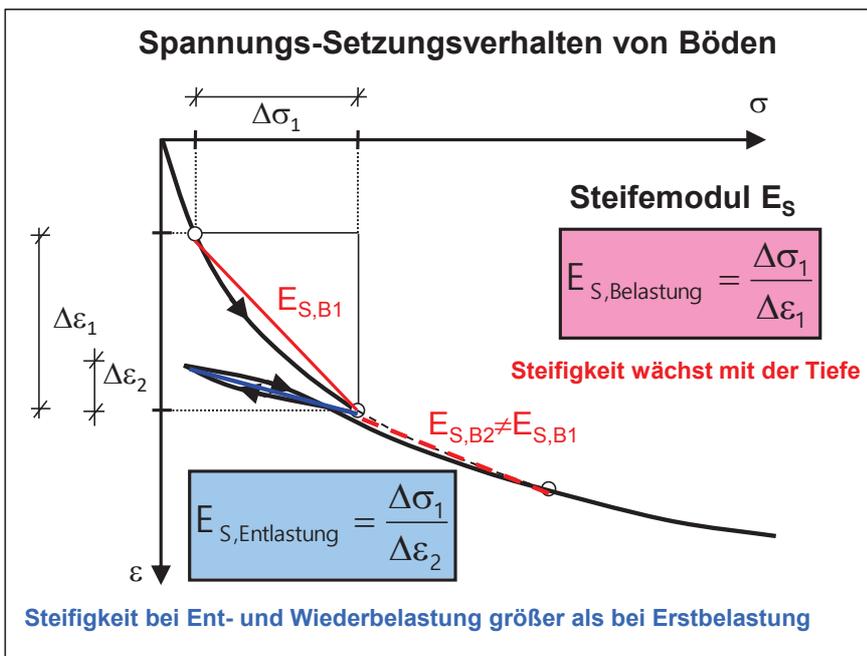


Nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei Be- und Entlastung



Bodenmechanische Grundlagen

Spannungs-Setzungsverhalten von Böden



Auflast: $\Delta\sigma$

Setzung: Δs

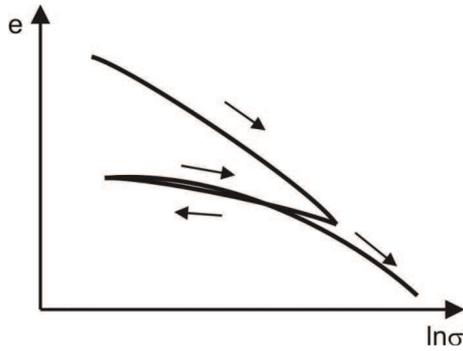
Verzerrung: $\Delta\varepsilon = \Delta s/d$

Nichtlineares Setzungsverhalten im Kompressionsgerät mit abschnittsweiser Linearisierung mittels Steifemodul E_s

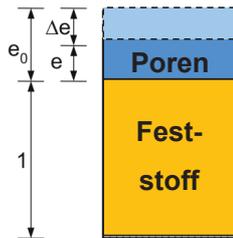
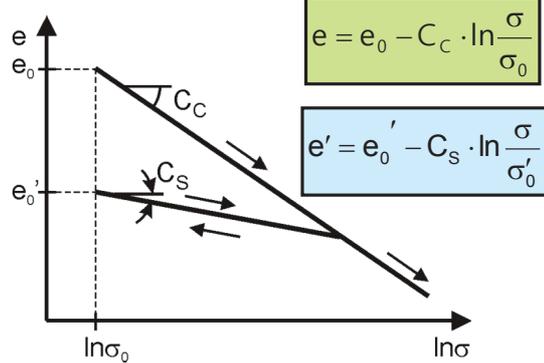


Bodenmechanische Grundlagen

Kompressionskurve



Idealisierter Verlauf



$$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

spannungsabhängiger Steifemodul

$$E_{S1}(\sigma) = \frac{1 + e_0}{C_C} \cdot \sigma \quad \text{bzw.}$$

$$E_{S2}(\sigma) = \frac{1 + e'_0}{C_S} \cdot \sigma$$

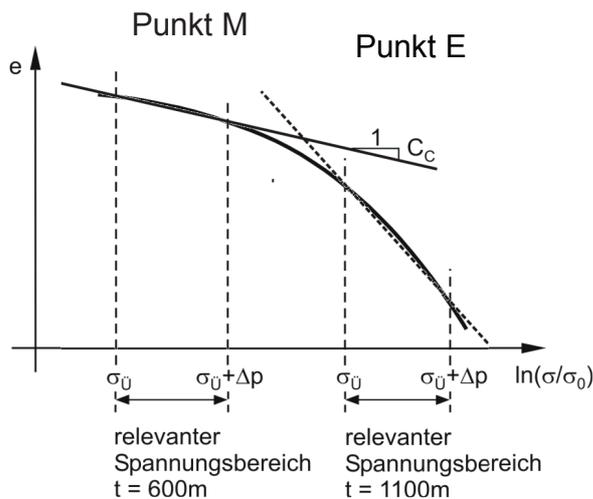
Verhältnis C_S/C_C legt Hebungsfaktor fest

Kompressionsgesetz nach Terzaghi für den baupraktischen Spannungsbereich

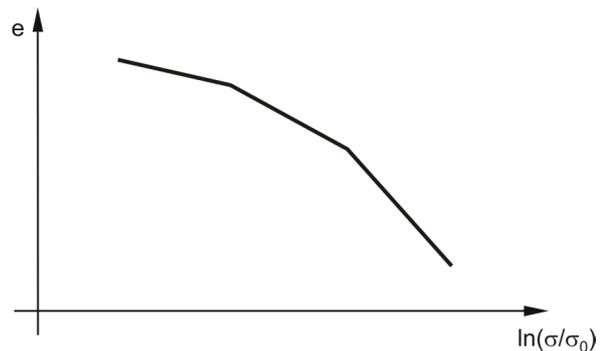


Bodenmechanische Grundlagen

spannungsabhängige Anpassung



Idealisierung



$$C_{C,M} = C_{C,E} \cdot \left(\frac{\sigma_{\bar{U},M}}{\sigma_{\bar{U},E}} \right)^{2 - \frac{\sigma_{\bar{U},M}}{\sigma_{\bar{U},E}}} = 0,002 \cdot \left(\frac{6137,3}{10174,7} \right)^{2 - \frac{6137,3}{10174,7}} = 0,002 \cdot 0,494 = 0,001$$

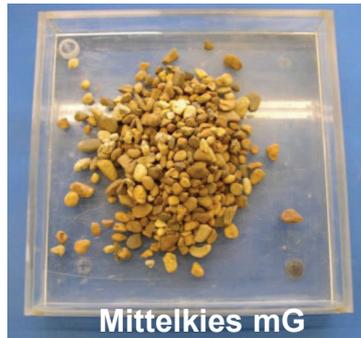
Spannungsabhängige Erweiterung des Kompressionsgesetzes für die Tiefe (Giese)



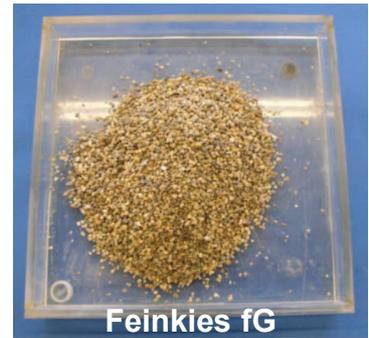
Bodenmechanische Grundlagen



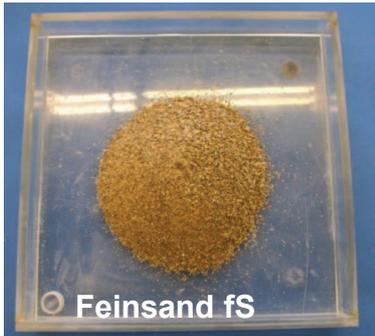
Grobkies gG



Mittelkies mG



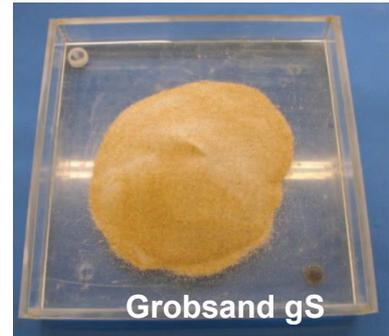
Feinkies fG



Feinsand fS



Mittelsand mS



Grobsand gS

Nichtbindige Böden aus Sanden und Kiesen
(durchlässig, geringe und keine zeitverzögerten Setzungen)

Bodenmechanische Grundlagen



flüssig



breiig



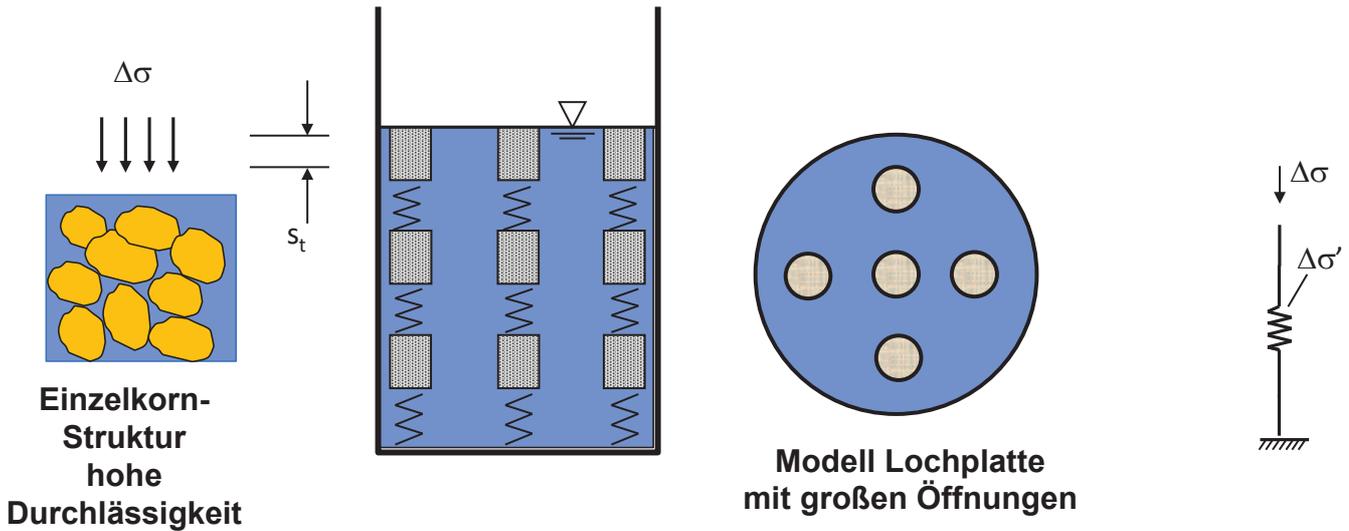
weich



steif

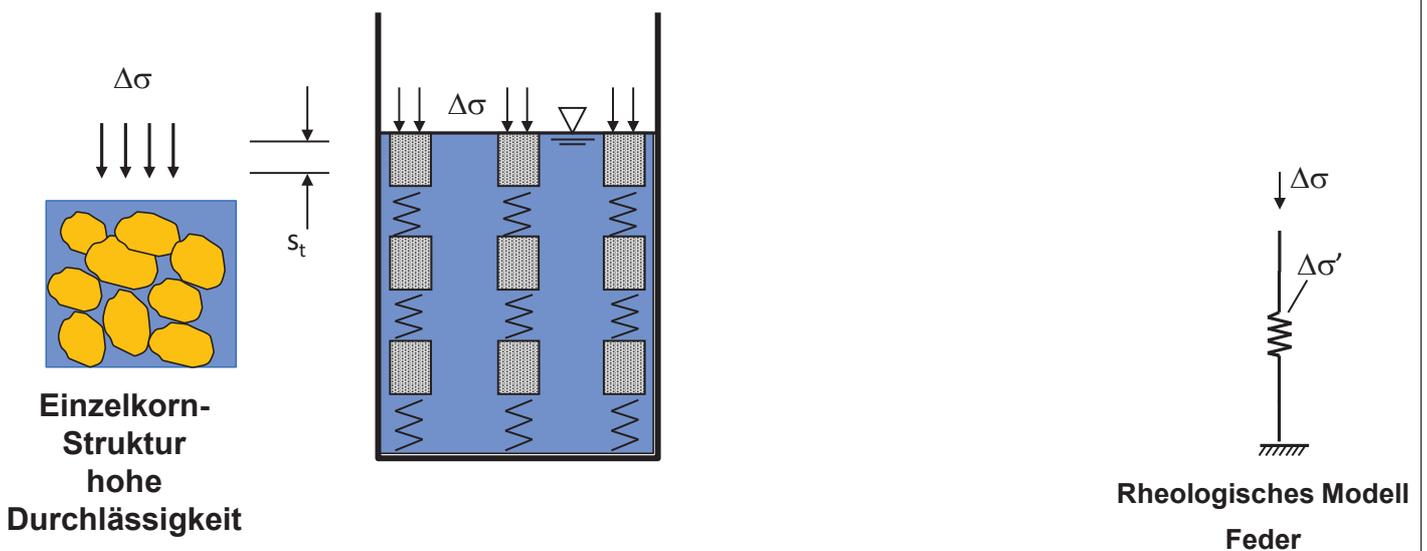
Bindige Böden (Schluffe und Tone)
(Zustand (Konsistenz) wassergehaltsabhängig, gering durchlässig, große und zeitversetzte Setzungen)

Bodenmechanische Grundlagen



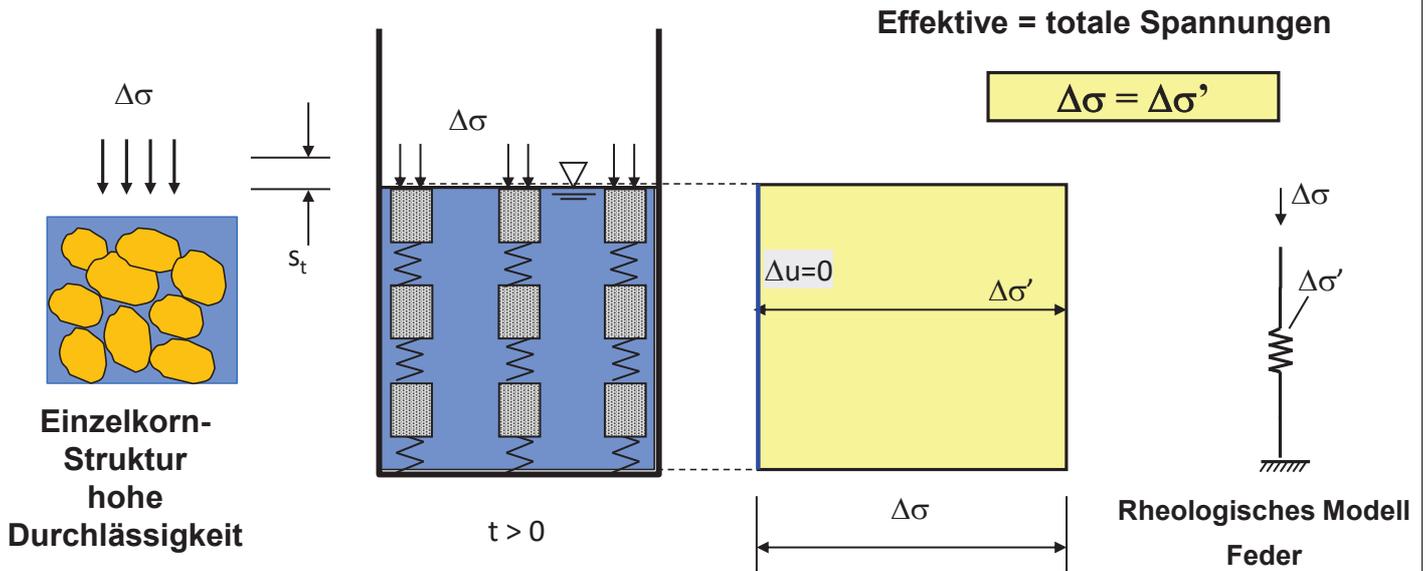
Zeit-Setzungsverhalten von nichtbindigen Böden (Sand, Kies)

Bodenmechanische Grundlagen



Zeit-Setzungsverhalten von nichtbindigen Böden (Sand, Kies)

Bodenmechanische Grundlagen

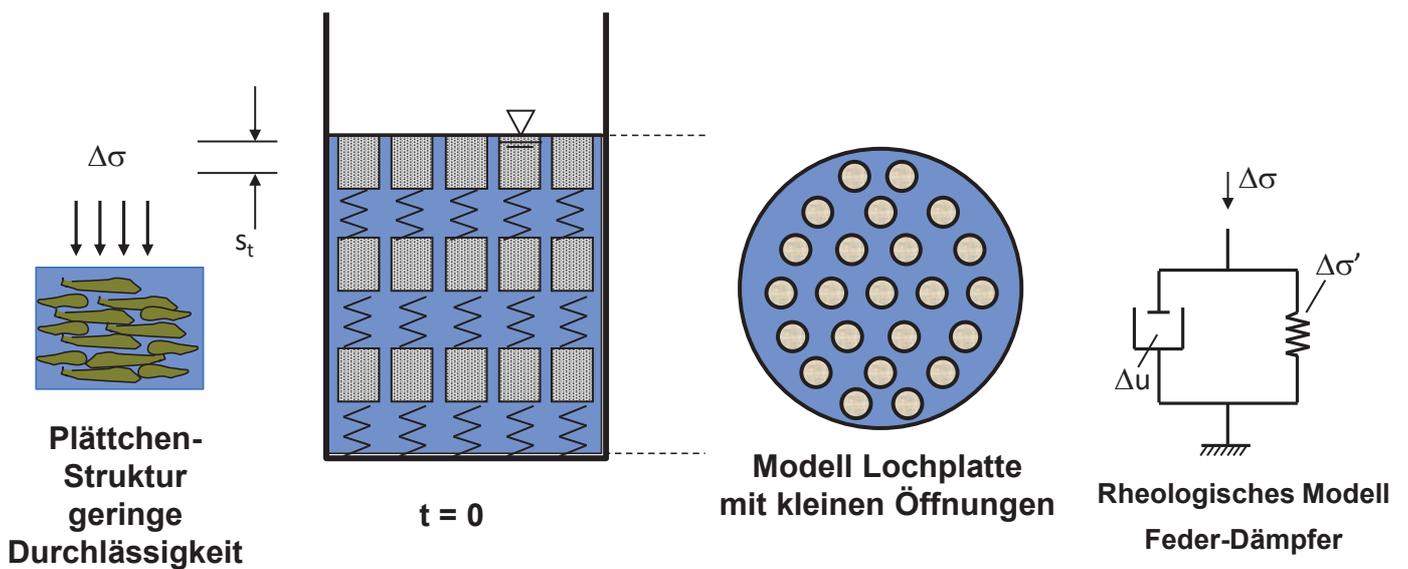


Zeit-Setzungsverhalten von nichtbindigen Böden (Sand, Kies)



Bodenmechanische Grundlagen

Kolbenmodell für die Konsolidationstheorie nach Terzaghi

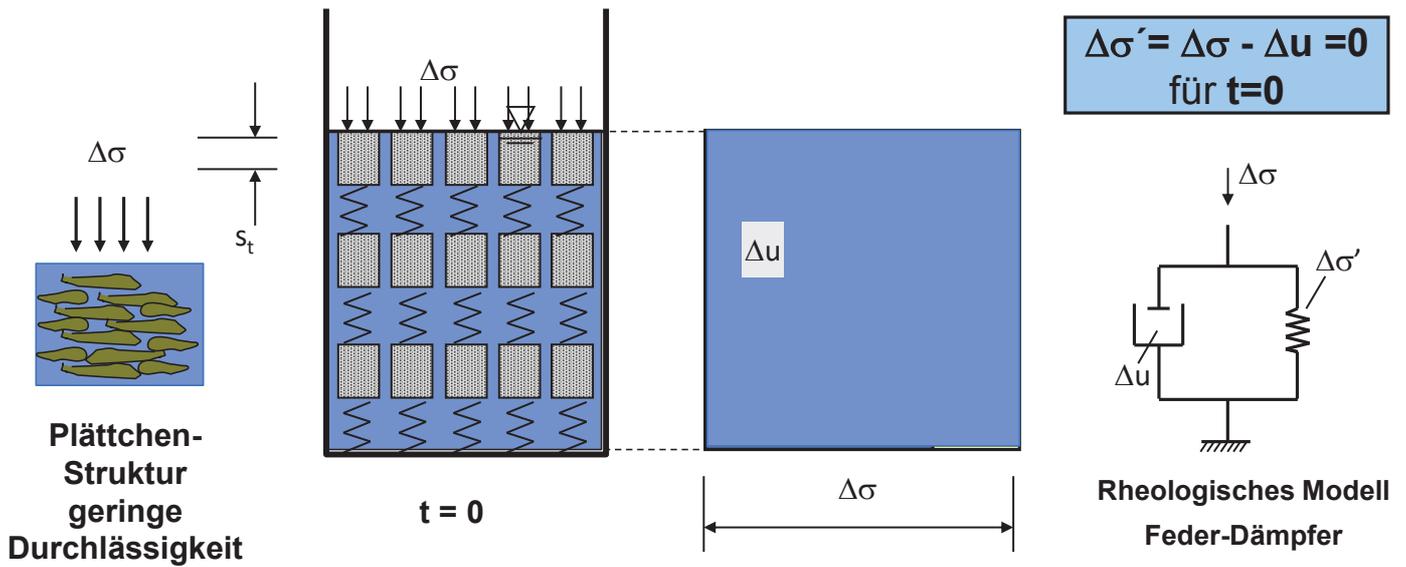


Verzögertes Zeit-Setzungsverhalten von bindigen Böden



Bodenmechanische Grundlagen

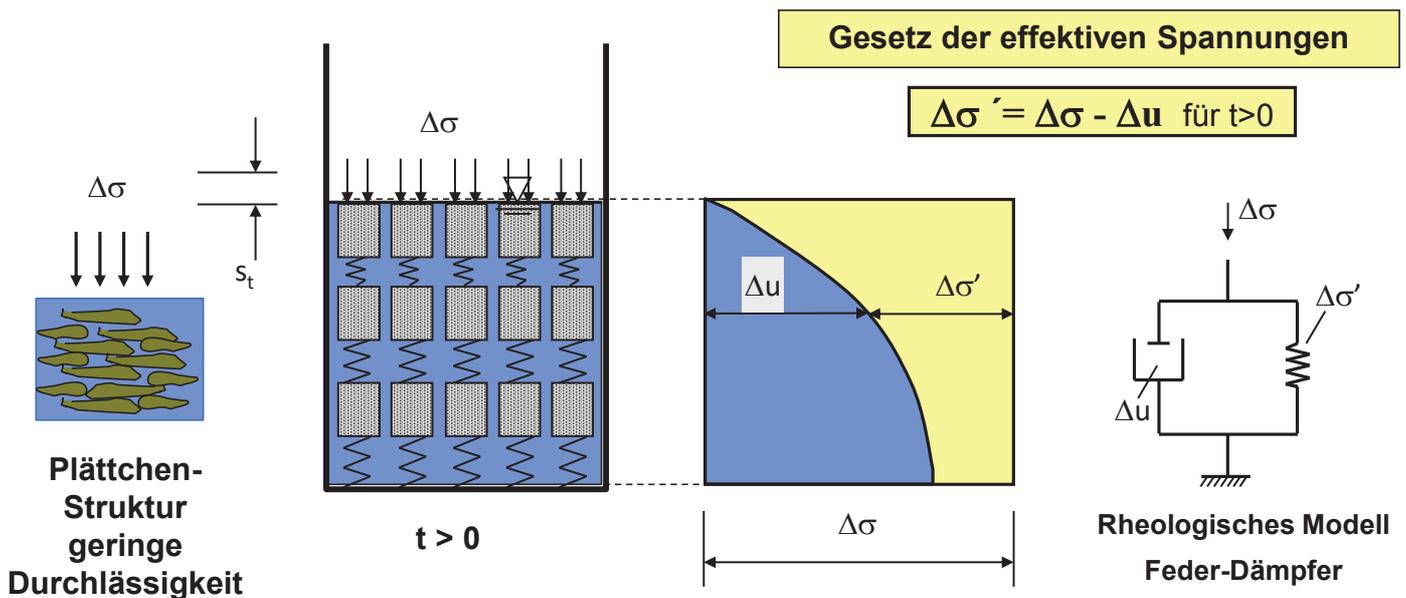
Kolbenmodell für die Konsolidationstheorie nach Terzaghi



Verzögertes Zeit-Setzungsverhalten von bindigen Böden

Bodenmechanische Grundlagen

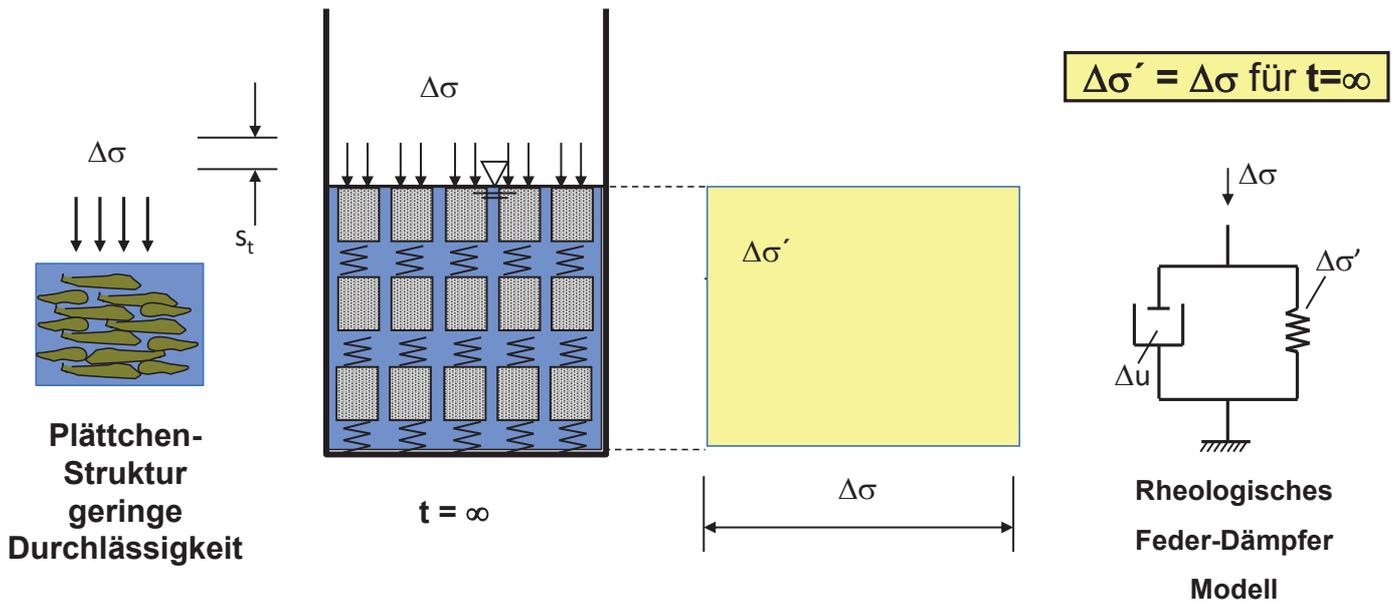
Kolbenmodell für die Konsolidationstheorie nach Terzaghi



Verzögertes Zeit-Setzungsverhalten von bindigen Böden

Bodenmechanische Grundlagen

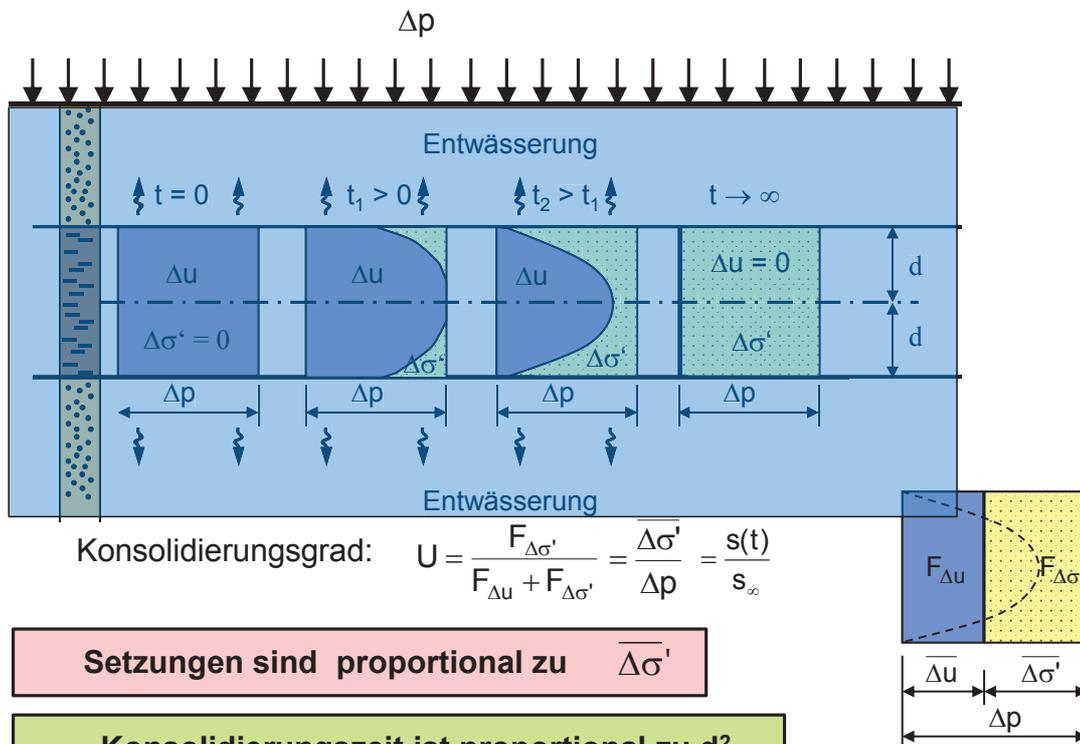
Kolbenmodell für die Konsolidationstheorie nach Terzaghi



Verzögertes Zeit-Setzungsverhalten von bindigen Böden



Bodenmechanische Grundlagen



Zeit-Setzungsverhalten von bindigen Böden (Konsolidierung)



Bodenmechanische Grundlagen

Grundlagen der eindimensionalen Konsolidierungstheorie nach Terzaghi

1. Linear elast. Stoffgesetz:

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon$$

2. Gesetz von Darcy:

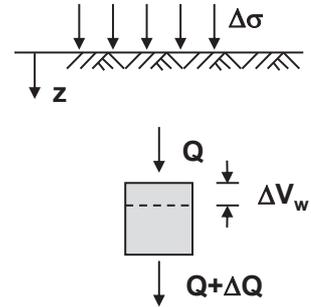
$$v = k \cdot i$$

3. Kontinuitätsgleichung:

$$\Delta Q = \Delta V_w / \Delta t$$

4. Gesetz der effekt. Spg.:

$$\Delta \sigma'(z, t) = \Delta \sigma - \Delta u(z, t)$$



$$\Rightarrow \text{DGL: } \frac{\partial \Delta u(z, t)}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u(z, t)}{\partial z^2}$$

$$c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w} \quad (\text{Konsolidierungsbeiwert [m}^2/\text{s)})$$

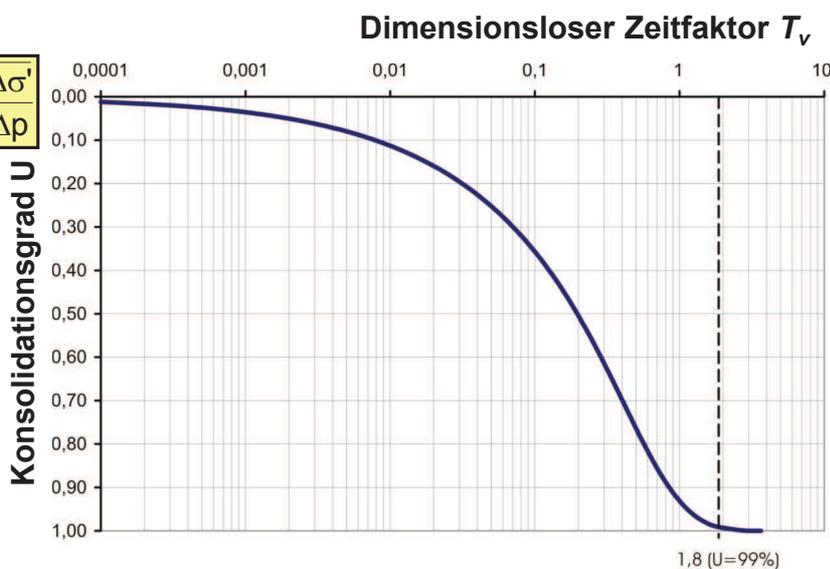
k = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

E_s = Steifemodul [kN/m²]

γ_w = Wichte des Wassers [kN/m³]

Bodenmechanische Grundlagen

$$U = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta p}$$



$$T_v = \frac{c_v}{d^2} \cdot t$$

Konsolidierungsbeiwert c_v

$$c_v = \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w}$$

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert

E_s = Steifemodul des Bodens

γ_w = Wichte des Wassers

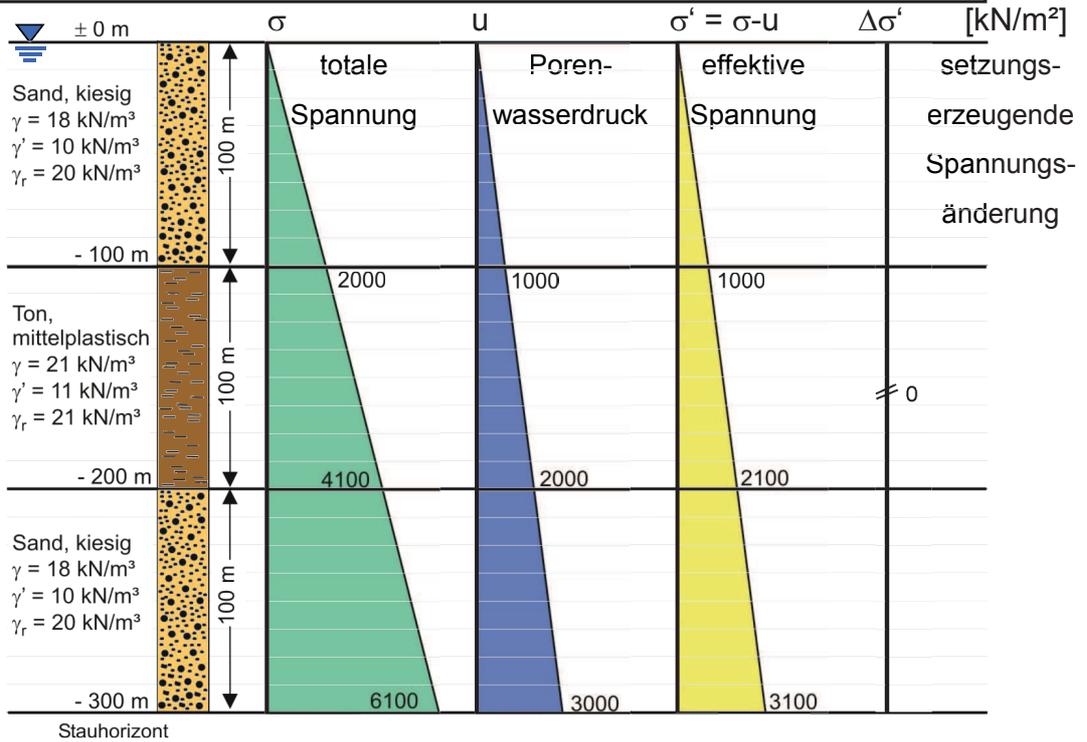
D = Schichtdicke (bei einseitiger
(Entwässerung))

Graphische Lösung für das Zeit-Setzungsverhalten von Böden

(Rechteckige Nullisochrone)

Bodenmechanische Grundlagen

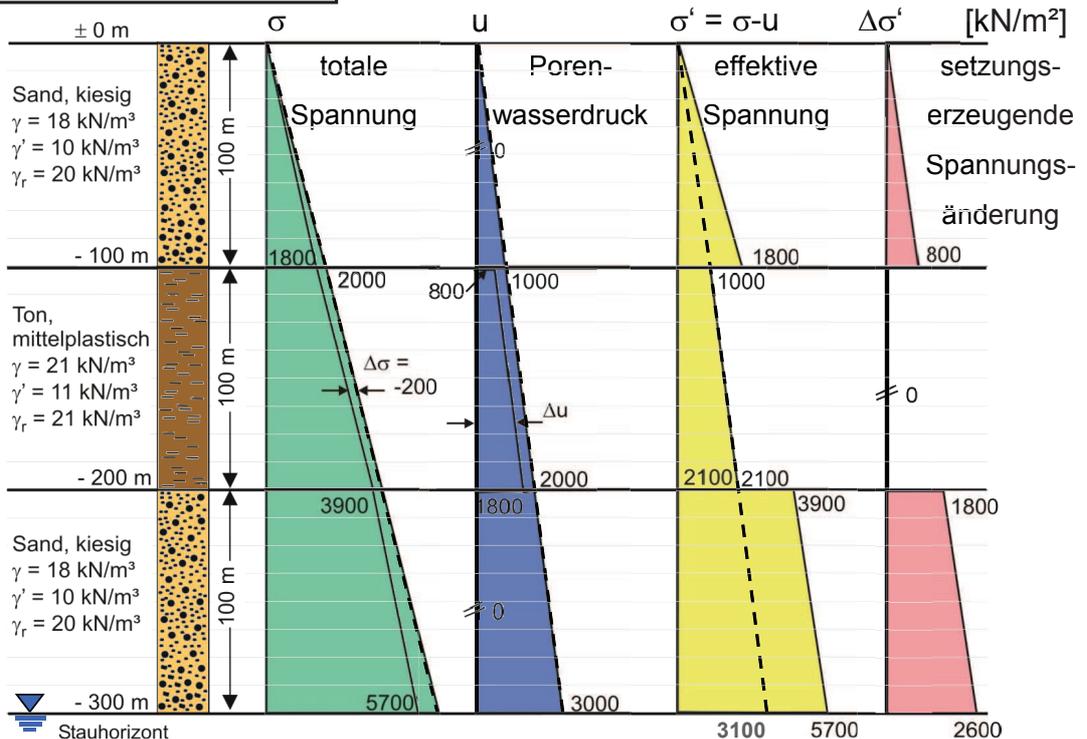
Schematisches Beispiel für Grundwasserabsenkung/-wideranstieg



Ausgangszustand vor GW-Absenkung

Bodenmechanische Grundlagen

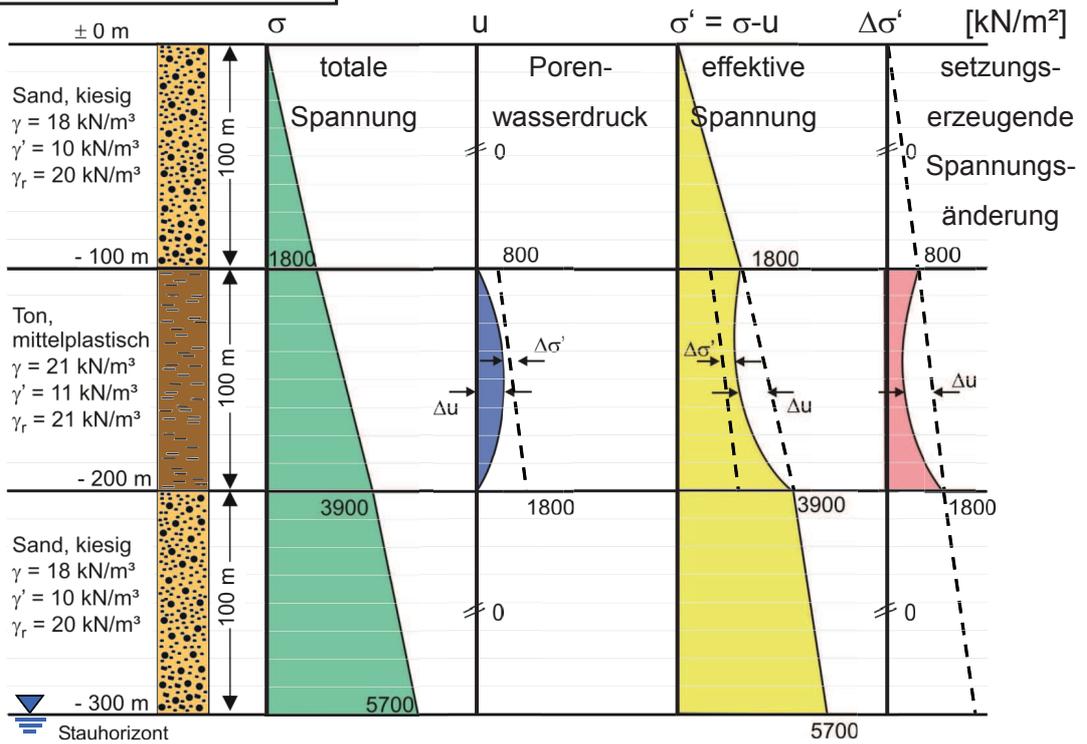
1. Beispiel: GW-Absenkung



Zustand nach „plötzlicher“ GW-Absenkung

Bodenmechanische Grundlagen

1. Beispiel: GW-Absenkung

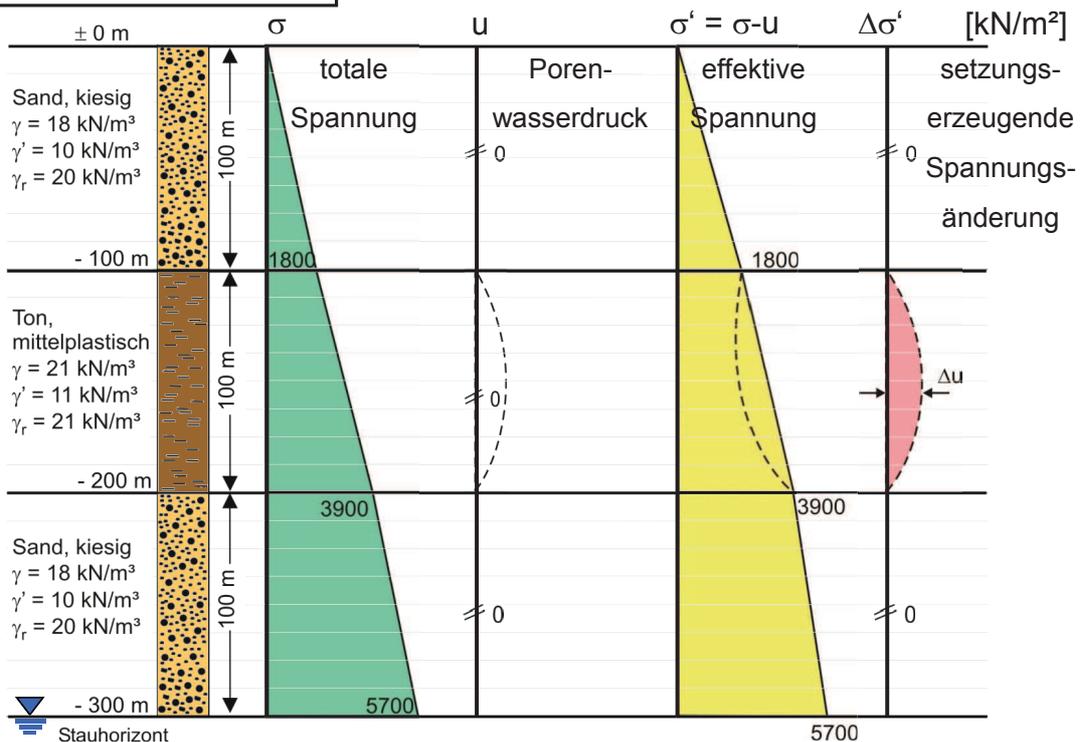


Konsolidierung der bindigen Schicht ($t_1 > t_0$)



Bodenmechanische Grundlagen

1. Beispiel: GW-Absenkung

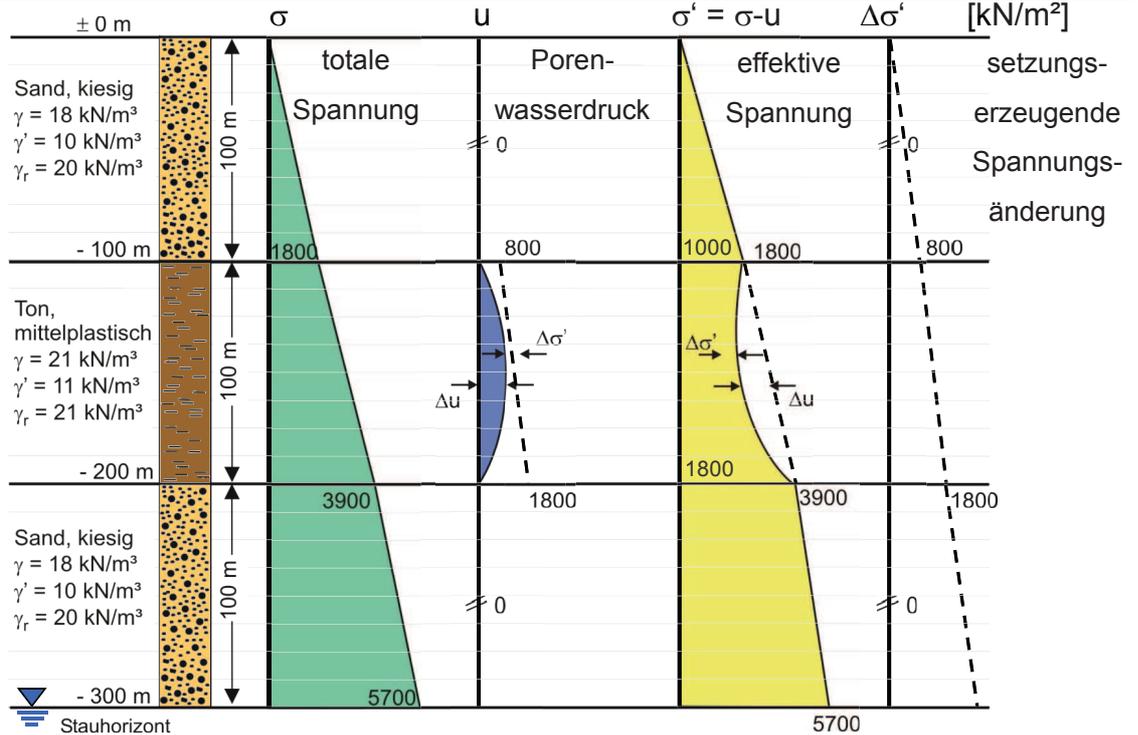


Endzustand nach Abschluss der Konsolidierung ($t \rightarrow \infty$)



Bodenmechanische Grundlagen

3. Beispiel: GW-Wiederanstieg nach noch nicht abgeschlossener Konsolidierung

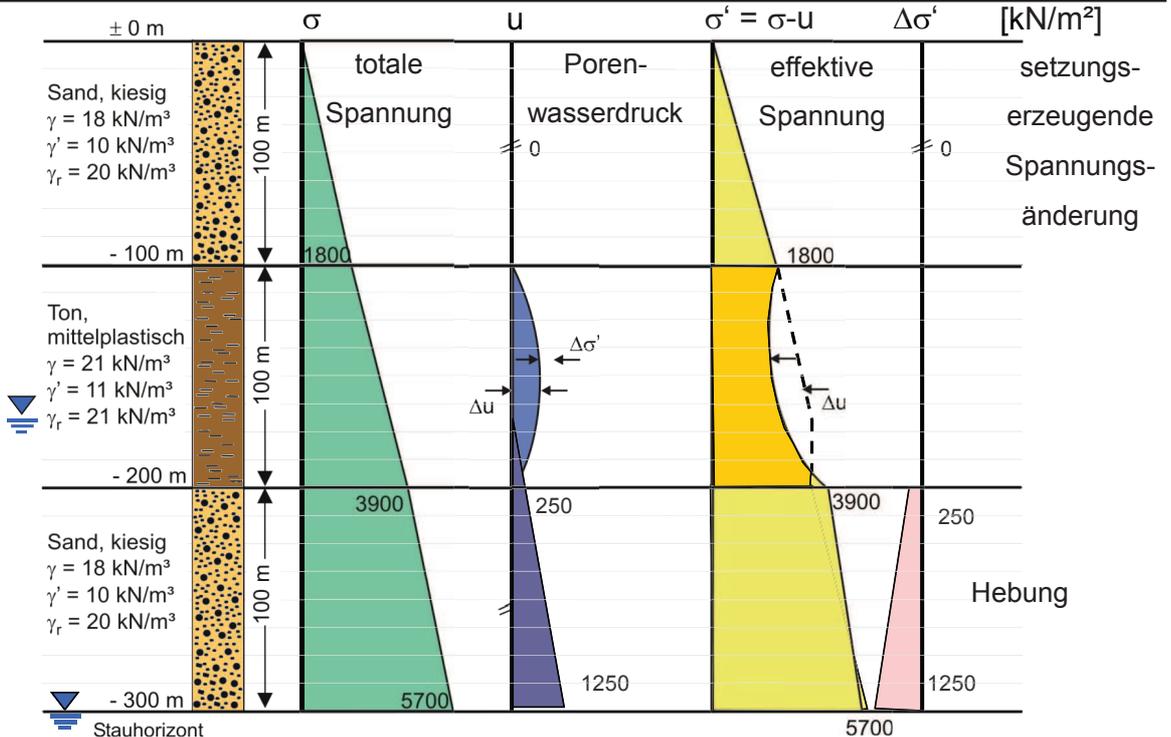


GW-Teilanstieg bei noch nicht auskonsolidierter Schicht



Bodenmechanische Grundlagen

3. Beispiel: GW-Wiederanstieg nach noch nicht abgeschlossener Konsolidierung

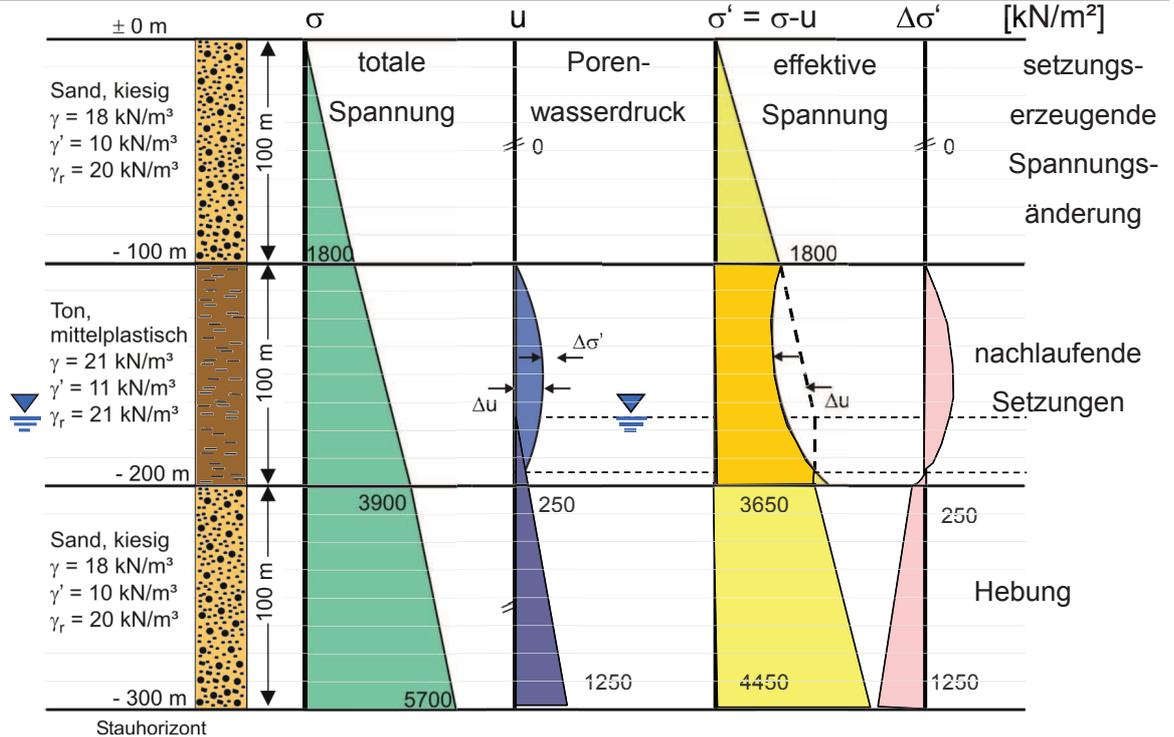


GW-Teilanstieg bei noch nicht auskonsolidierter Schicht



Bodenmechanische Grundlagen

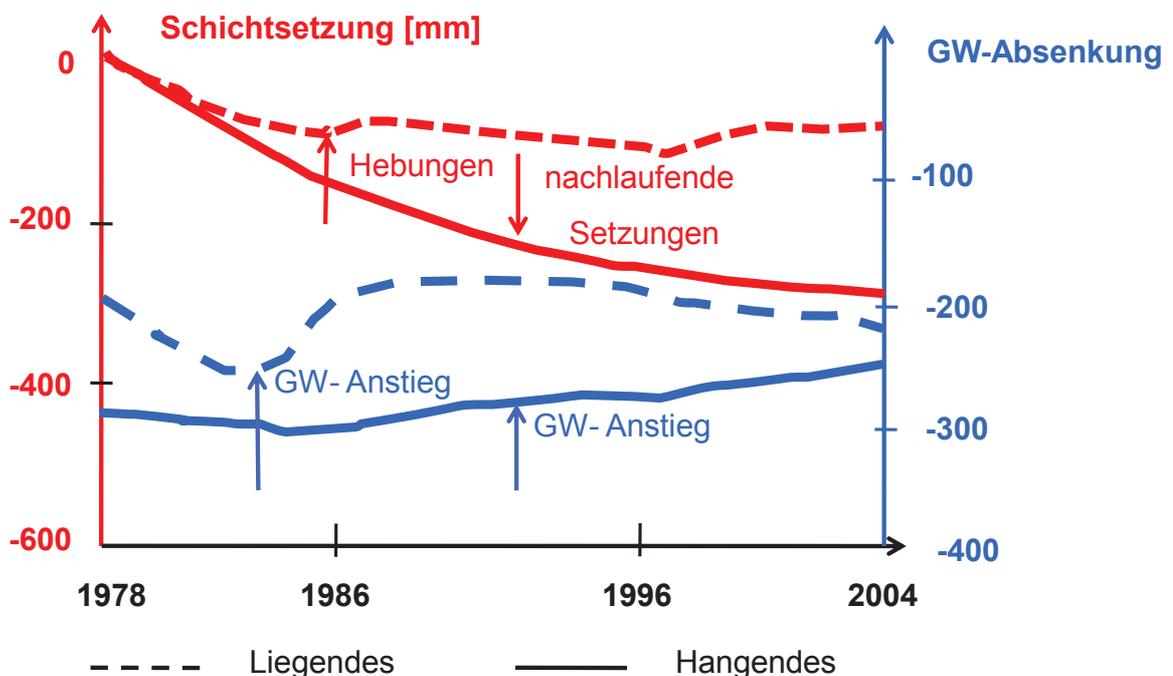
3. Beispiel: GW-Wiederanstieg nach noch nicht abgeschlossener Konsolidierung



GW-Teilanstieg bei noch nicht auskonsolidierter Schicht



Bodenmechanische Grundlagen

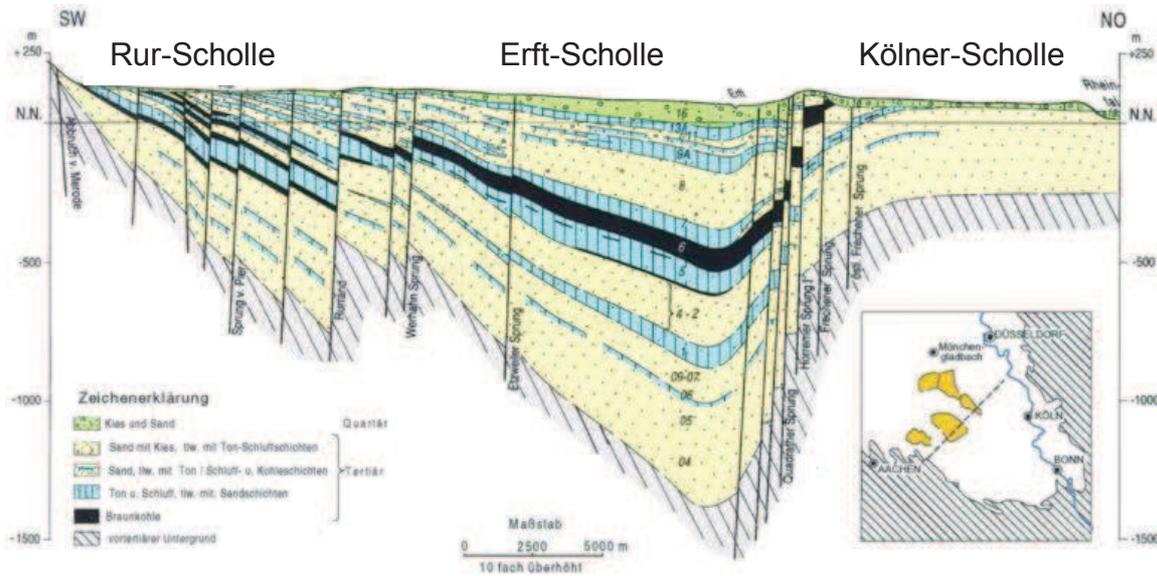


Nachlaufende Setzungen trotz GW-Wiederanstieg im Hangenden

(Schaefer 2006)



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004



- bis zu 1400 m tertiäre Lockersedimente
- Tektonik mit Verwurfshöhen bis zu 300 m

Schnitt durch die Niederrheinische Bucht



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

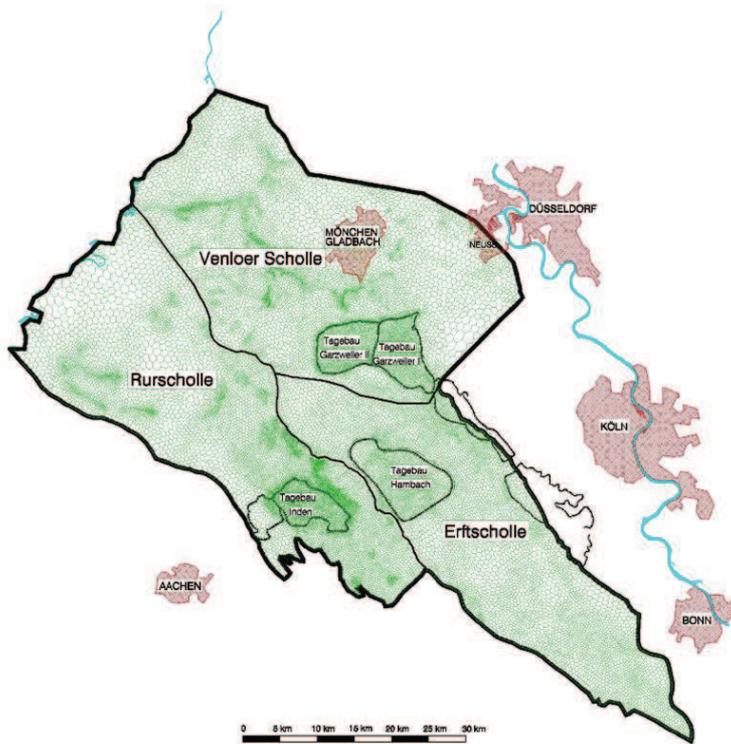
Stratigraph. Bezeichnung	Horizont	Rurscholle	Nordraum (Venloer Scholle)	Erftscholle
Hauptter.	14-19			GWL 1
Tegelen	13			Stauer 1
	12	GWL 1	GWL 1	
Reuverton	11			GWL 2
	10			
Ob. Rotton	9C	Stauer 1		Stauer 2
	9B	GWL 2		GWL 3
Unt. Rotton	9A	Stauer 2		Stauer 3
	8	GWL 3		GWL 4
Oberflöz-gruppe	7F			Stauer 4
	7E			GWL 5
	7D	Stauer 3	GWL 2	
	7C			Stauer 5
	7B			GWL 6
7A	GWL 4			
Flöz Garzweiler	6E	Stauer 4		
	6D	GWL 5		GWL 7
Flöz Frimmersd.	6C	Stauer 5	Stauer 2	Stauer 7
Flöz Morken	6B	GWL 6	GWL 3	GWL 8
	6A	Stauer 6	Stauer 3	Stauer 8
	2-5	GWL 7		GWL 9
	1	Stauer 7	GWL 4	Stauer 9
	01-09	GWL 8		GWL 10
Prätertiär		Leakage	Leakage	Leakage



Zuordnung der Horizonte nach Schneider/Thiele zum GW-Modell der RWE-Power



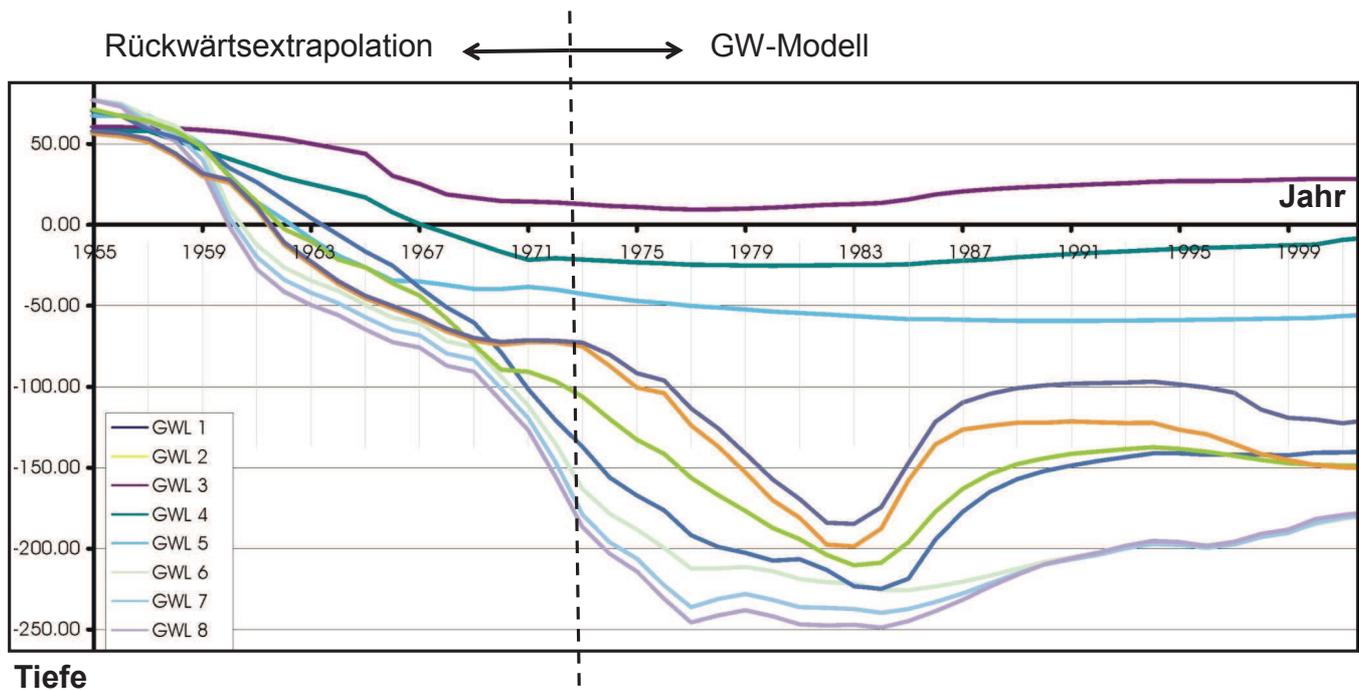
Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004



Grundwasser-Modell der RWE Power AG



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

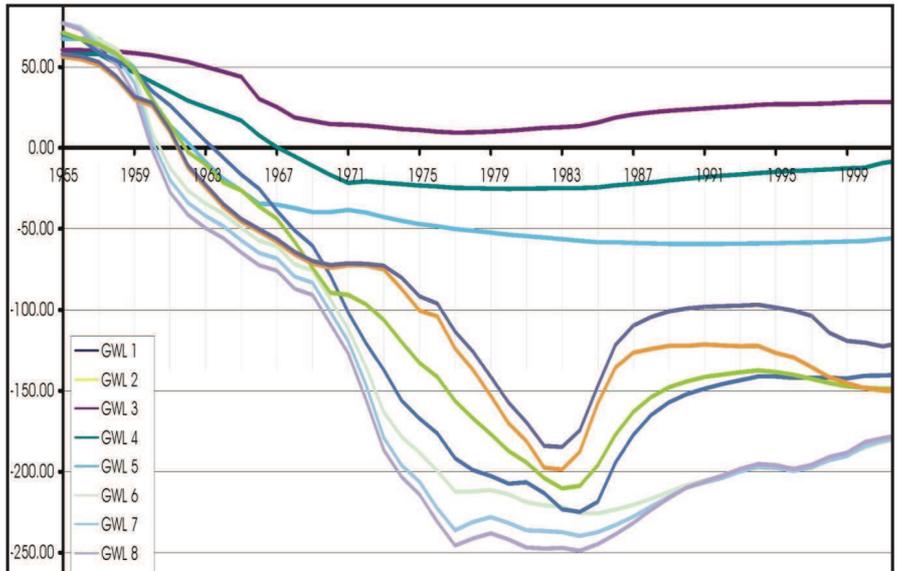


GW-Ganglinien der verschiedenen GW-Leiter nach GW-Modell



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Stratigraph. Bezeichnung	Horizont	Rurscholle	Nordraum (Venloer Scholle)	Erftscholle
Hauptter.	14-19			GWL 1
Tegelen	13			Stauer 1
	12	GWL 1	GWL 1	
Reuverton	11			GWL 2
	10			
Ob. Rotton	9C	Stauer 1		Stauer 2
	9B	GWL 2		GWL 3
Unt. Rotton	9A	Stauer 2		Stauer 3
	8	GWL 3		GWL 4
Oberflöz-gruppe	7F	Stauer 3	GWL 2	Stauer 4
	7E			GWL 5
	7D			Stauer 5
	7C			GWL 6
	7A			GWL 7
Flöz Garzweiler	6E	Stauer 4	Stauer 2	Stauer 7
	6D	GWL 5		Stauer 8
Flöz Frimmersd.	6C	Stauer 5	Stauer 3	Stauer 9
	6B	GWL 6	GWL 3	GWL 8
Flöz Morken	6A	Stauer 6	Stauer 4	Stauer 10
	2-5	GWL 7		Leakage
	1	Stauer 7		Leakage
Prätertiär	01-09	GWL 8		Leakage
		Leakage	Leakage	Leakage



Schichtweise GW-Ganglinien stellen die Einwirkungen für die Berechnung der Senkungen dar

Prinzipielles Problem: Ort der Messung der Geländebewegung meist nicht identisch mit
 - Lage des verwendeten Bohrprofils
 - Lage der GW-Messstelle



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Datengrundlage – Materialparameter

Proben-Nr.	Horizont	Bodenart	Entnahmetiefe	
Tagebau Hambach				
7618	S	16	mS und gS, g	30m
7619	S	16	mS und gS, g	30m
7620	S	16	fG und mG, s	30m
7621	S	8	fS und mS	192m
7622	S	8	fS und mS	192m
7623	S	8	fS und mS	192m
7624.1	S	7	T, u	263m
7624.2	S	7	T, fu	263m
7625	S	7	T, ü	263m
7626	S	7	T, u	263m
7677.1	B	5	U und T	458m
7677.2	B	5	U und T	458m
7722.1	B	6B	U und T	431m
7722.2	B	6B	U und T	431m
7733.1	S	9A	T, ü, fs	129m
7733.2	S	9A	T, ü, fs	129m
7738.1	S	11	U, f	36m
7738.2	S	11	U, f	36m
Tagebau Inden				
7727.2	S	9A	U, f, fs	70m
7727.3	S	9A	T, ü	70m
7728.1	S	9C	fS, ü, t	47m
7728.2	S	9C	U, f, fs	47m

) Art der Probenahme: B – Bohrung, S – Schurf



GiB, Aachen



IBF, Karlsruhe

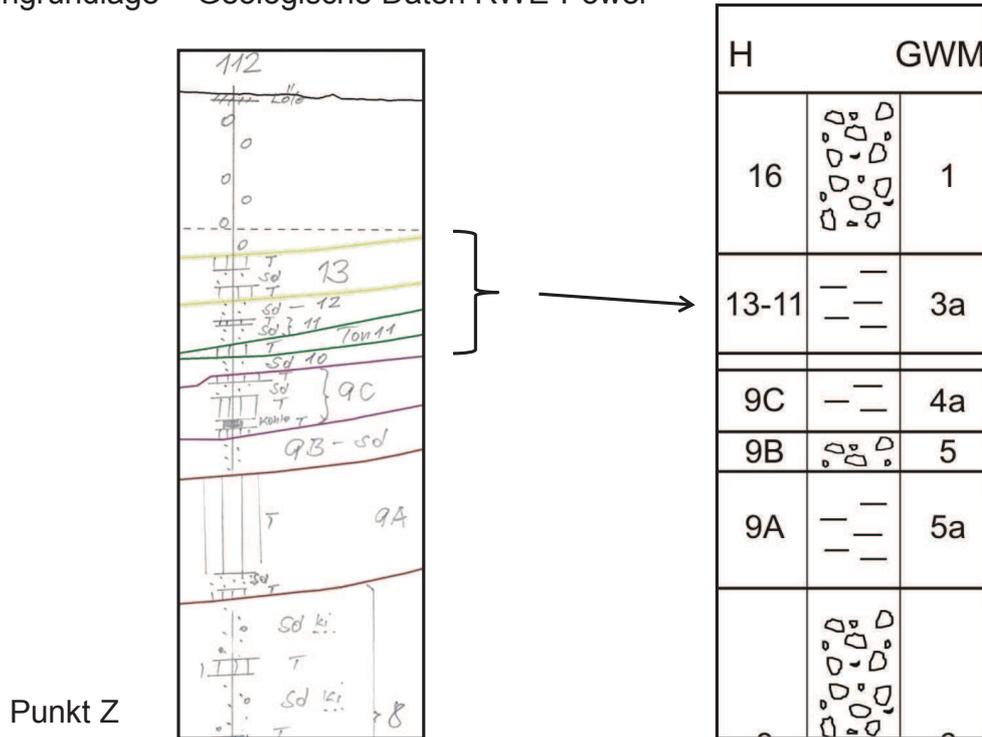
Anlage Nr.	Probe Nr.	H [mm]	D [mm]	M [g]	Feuchtwichte [kN/m ³]	Probenausrichtung bezogen auf Schichtung	Tagebau
1	1	41,09	68,64	177,7	11,47	Parallel	Hambach (1. Lieferung)
2	2	41,05	68,70	177,7	11,46	Parallel	
3	5	41,16	68,80	181,3	11,62	Senkrecht	
4	6	41,16	68,83	181,7	11,64	Senkrecht	
5	7	41,11	68,78	180,4	11,59	Senkrecht	
Mittelwert					11,56 ± 0,09		
6	12	40,20	68,80	173,5	11,39	Senkrecht	Inden
7	13	40,25	68,80	173,9	11,40	Senkrecht	
8	14	40,20	68,80	173,4	11,38	Senkrecht	
9	15	40,08	68,80	172,7	11,37	Senkrecht	
10	17	40,22	68,82	174,9	11,47	Senkrecht	
Mittelwert					11,40 ± 0,04		

Bodenkennwerte aus Laborversuchen an Boden- und Kohleproben



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Datengrundlage – Geologische Daten RWE-Power

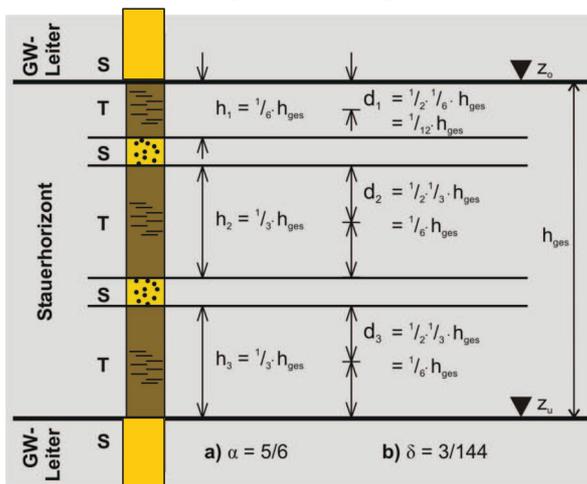


Geologische Profile – Vereinfachung der Schichtung



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Datengrundlage – Geologische Daten



Hauptsetzungsschicht: T

Nebensetzungsschicht: S

Setzung: $s = \alpha \cdot s_T + (1-\alpha) \cdot s_S$

Bänderungsfaktor Schichtung

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{h_{iT}}{h_{ges}}$$

Konsolidationsdauer

$$t = T_v \cdot \frac{d^2}{c_v}$$

Bänderungsfaktor Konsolidierung

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2} \cdot \frac{1}{h_{ges}}$$

fiktive Schichtdicke

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)} \cdot \frac{1}{h_{ges}} = 0,144$$

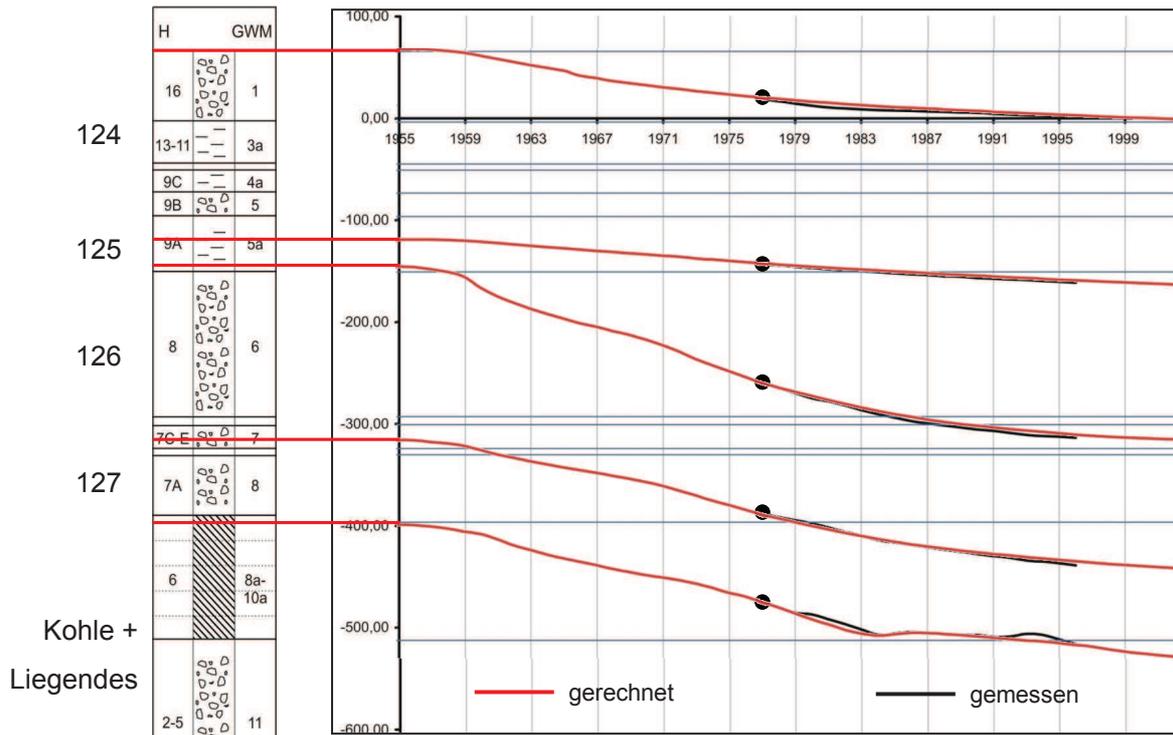
$$d = \delta \cdot h_{ges}$$

Bodenmechanisch äquivalente Vereinfachung der Schichten zur Setzungs- und Konsolidationsberechnung durch Bänderungsfaktoren



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Kalibrierung – Erft-Scholle

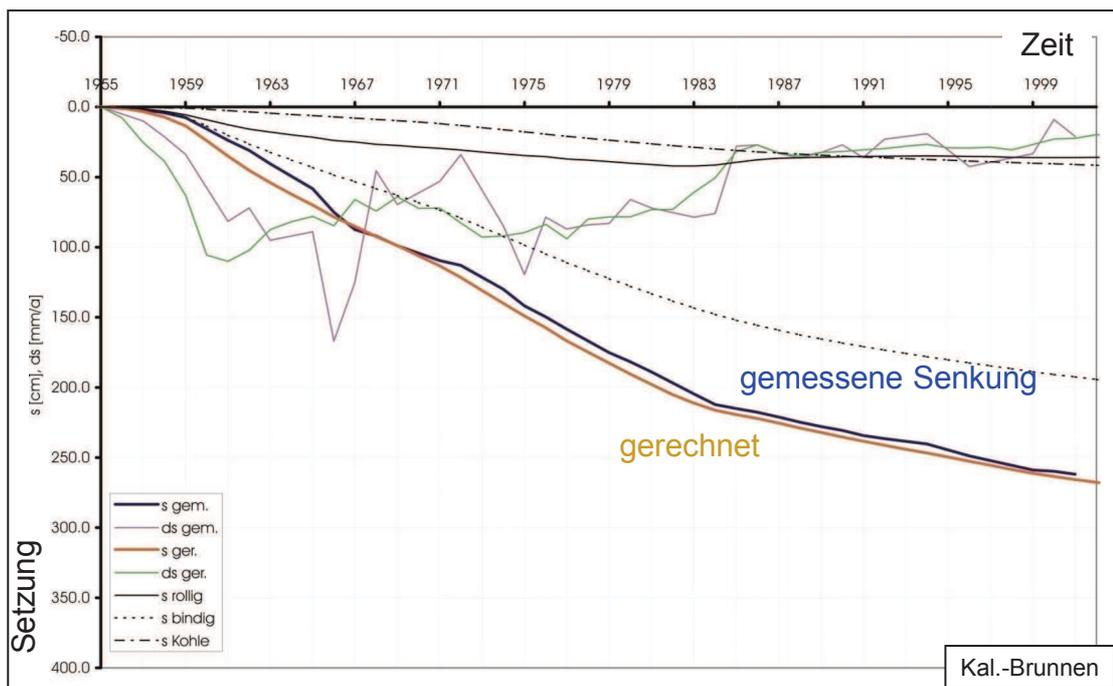


Extensometer-Messungen am Kalibrierungs-Brunnen



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Kalibrierung – Erft-Scholle



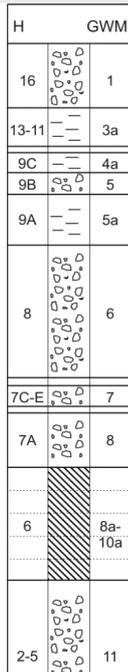
Zeit-Senkungslinie für den Kalibrierungs-Brunnen



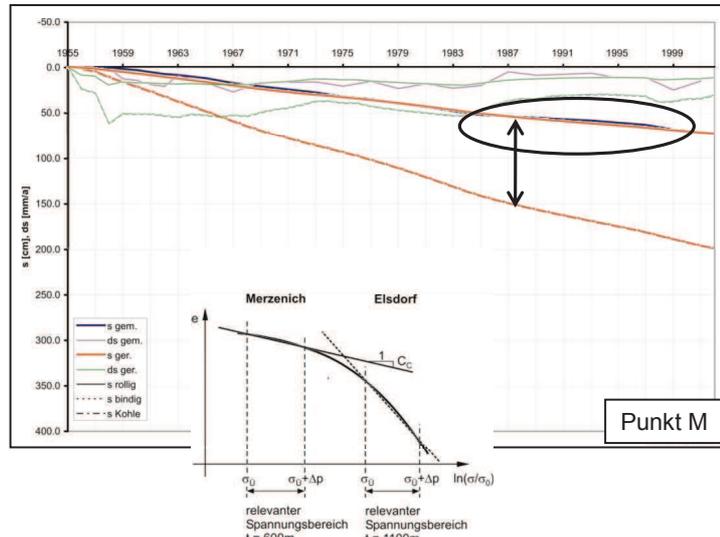
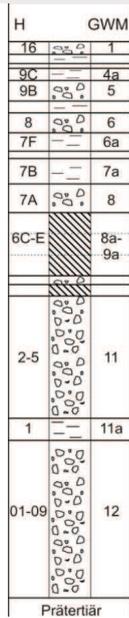
Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Kalibrierung – Erft-Scholle

Kal.-Brunnen



Punkt M



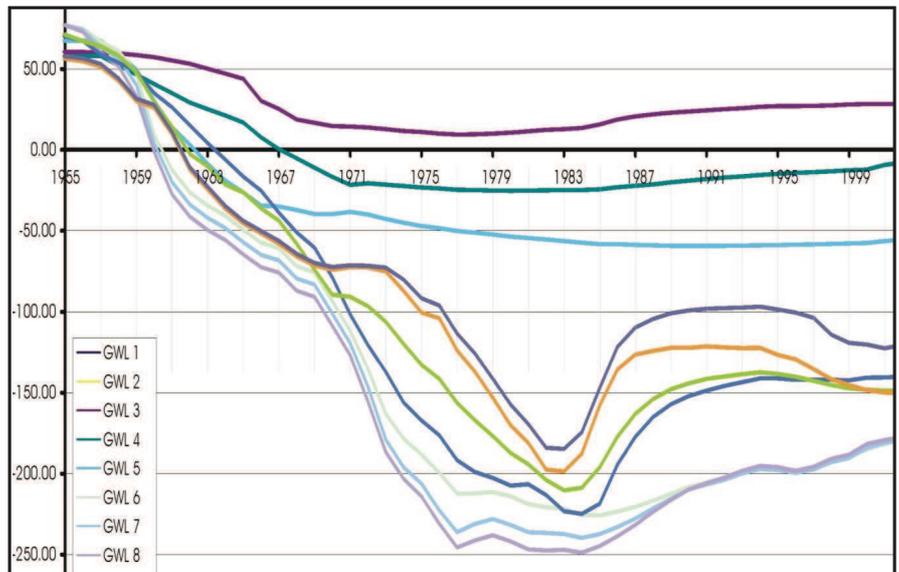
Ergebnisverbesserung mit spannungsabhängigem Kompressionsbeiwert



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Geländebewegungen an anderen Punkten: lediglich Messwert für Bewegung der Oberfläche

Stratigraph. Bezeichnung	Horizont	Rurscholle	Nordraum (Venloer Scholle)	Erftscholle
Hauptter.	14-19			GWL 1
Tegelen	13			Stauer 1
	12	GWL 1	GWL 1	
Reuverton	11			GWL 2
	10			
Ob. Rotton	9C	Stauer 1		Stauer 2
	9B	GWL 2		GWL 3
Unt. Rotton	9A	Stauer 2		Stauer 3
	8	GWL 3		GWL 4
Oberflöz-gruppe	7F			Stauer 4
	7E			GWL 5
	7D	Stauer 3		
	7C			Stauer 5
	7B			
Flöz Garzweiler	7A	GWL 4		GWL 6
Flöz Frimmersd.	6E	Stauer 4		Stauer 6
	6D	GWL 5		GWL 7
Flöz Morken	6C	Stauer 5	Stauer 2	Stauer 7
	6B	GWL 6	GWL 3	GWL 8
Prätertiär	6A	Stauer 6	Stauer 3	Stauer 8
	2-5	GWL 7		GWL 9
	1	Stauer 7	GWL 4	Stauer 9
	01-09	GWL 8		GWL 10
		Leakage	Leakage	Leakage



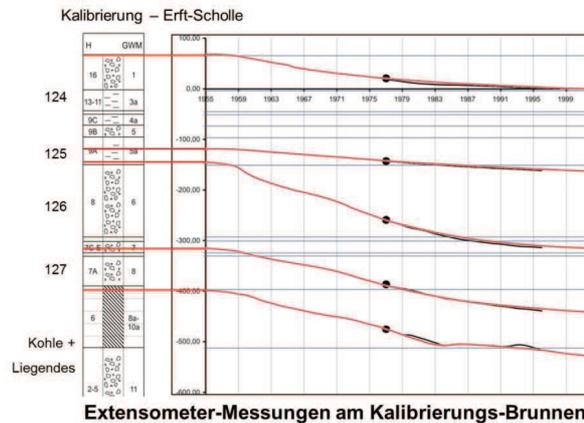
Bewegung der Geländeoberfläche: Summation unterschiedlicher (zeitverzögerter) Senkungen/Hebungen in den einzelnen Schichten



Grundlagen Modell Ziegler/Giese 2004

Grenzen des Modells Ziegler/Giese (2004) für flächenhafte Anwendung

- Sehr aufwendige Erfassung der einzelnen Bodenschichten (Bänderungsfaktoren)
- Ein einziger Satz an Bodenparameter ist nicht repräsentativ für eine ganze Scholle → z.B. tiefenabhängige Bodenparameter
- keine schichtweise Kalibrierungsdaten in der Fläche verfügbar
- Bis dato nur wenige Hebungsdaten für Hebungsprognose



→ Entwicklung eines vereinfachten Modells Ziegler/Aulbach 2016

Grundlagen Modell Ziegler/Aulbach 2016

Model GiB (Ziegler/Giese - 2004)

- Basierend auf bodenmechanischen Grundsätzen (Konsolidierungstheorie v. Terzaghi)
- Einbeziehung des tatsächlichen Schichtprofils (Bänderungsfaktoren) und der GW-Ganglinien
- Verwendung gemessener oder nachvollziehbar sinnvoll abgeleiteter Bodenparameter
- Möglichst nur ein Satz Bodenparameter für eine Scholle. Möglichst schichtgenaue Kalibrierung anhand Daten von Versuchsbrunnen
- Kalibrierung der Eingangsparameter nur in physikalisch sinnvollen Grenzen

Model ZAI (Ziegler/Aulbach - 2016)

- Basierend auf bodenmechanischen Grundsätzen (Konsolidierungstheorie v. Terzaghi)
- Einbeziehung des tatsächlichen Schichtprofils (vereinfacht) und der GW-Ganglinien
- Verwendung geschätzter, aber sinnvoller Referenz-Bodenparameter (summarisch)
- Referenzbodenparameter werden für Kalibrierung schichtweise prozentual pro Messpunkt verändert
- Kalibrierung entsprechend dem erwarteten bodenmechanischen Verhalten und Abgleich allein mit den gemessenen Senkungen an der Geländeoberfläche
- Ggf. Korrektur des Schichtmodells bei zu starken Abweichungen
- Durch einfachere Kalibrierung leichter in der Fläche anwendbar
- Erste Berechnungen belegen Tauglichkeit des Modells