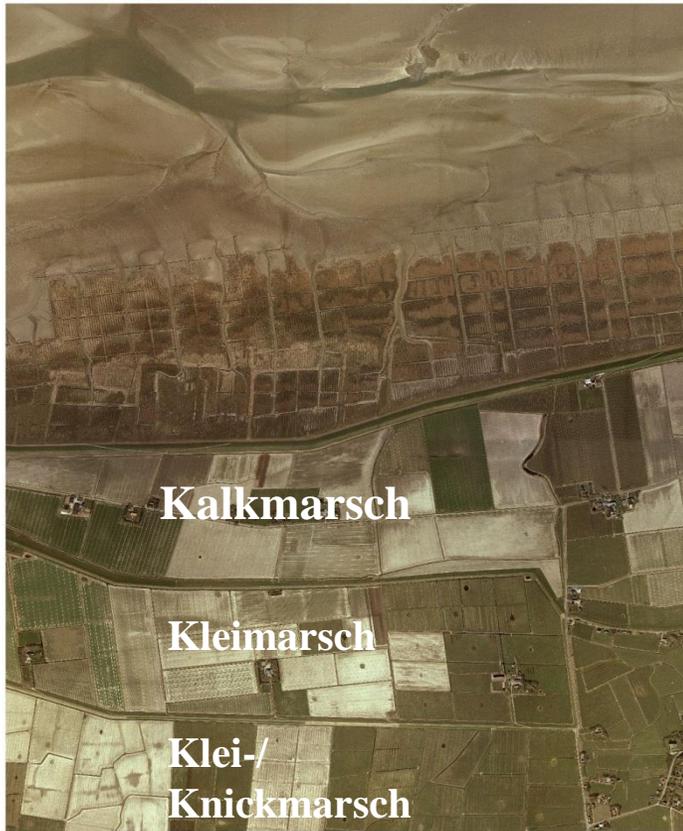


0 275 550 1.100 1.650 2.200  
Meters



# Bodenkundliche Aspekte im Zusammenhang mit dem Bau von Photovoltaikanlagen in Osterhever



Prof.Dr. R.Horn  
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel



# Produzieren wir genug Nahrung für die wachsende Weltbevölkerung?

- **Bereits heute:**
- **1 Milliarde Menschen hungernd, und**
- **2 Milliarden Menschen mit Mangel- und Fehlernährung, und bis 2050**
- **Nahrungsbedarf / -produktion: + 70 % bis 2050**
- **Aber täglich gehen ca. 60 ha fruchtbarer Boden in Deutschland irreversibel verloren; weltweit die Fläche von München d.h.300km<sup>2</sup>/d**
  - Ziel bis 2020 war eigentlich: 30 ha/Tag**
  - Bodenneubildungsrate: ca 500 kg/ha a**

# Watt und Marschen - Bodentypen

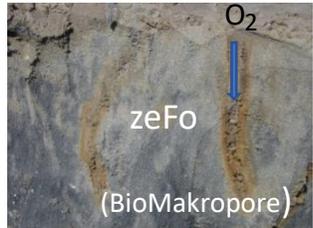
## Chronosequenz

Watt → Rohmarsch → **Kalkmarsch** → Kleimarsch → Knickmarsch

Entsalzung  
~10 cm / 1 Jahr

Entkalkung  
~10 cm / 100 Jahre

Schichtung, II...  
Tonverlagerung,  
Stauäссе



Fe-Oxide (extrovertiert)

Wattsedimente



(T, U, S, steinfrei)

Org. Substanz

Salze (=z)

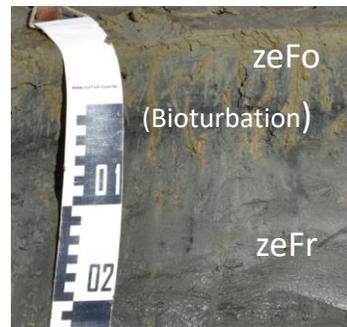
Carbonate (=e)

Sulfate

Bioturbation

Redoxprozesse

(Quellung/Schrumpfung)



(Sand)Watt



(Schlick)Watt



Rohmarsch  
(=Salzmarsch)



Kalkmarsch



Kleimarsch

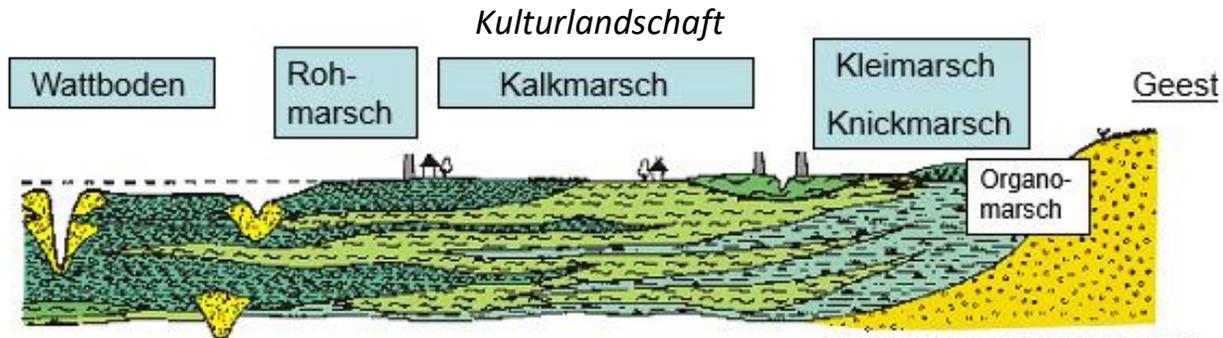


Knickmarsch



Organomarsch  
(sulfatreich)

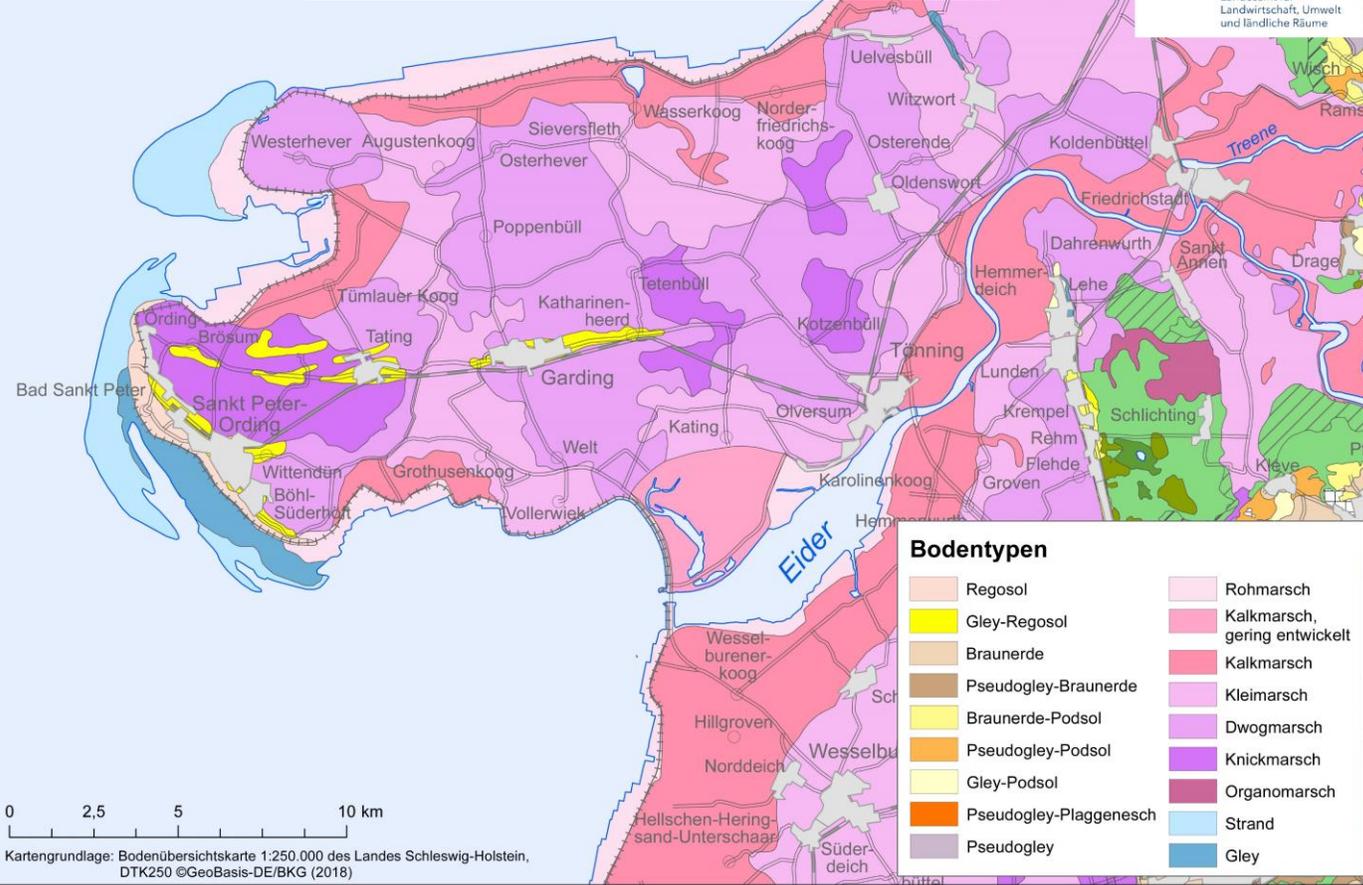
o > 8% org S



(Quelle: Böden in Niedersachsen 1997, verändert)

# Böden und Bodenverbreitung in Eiderstedt

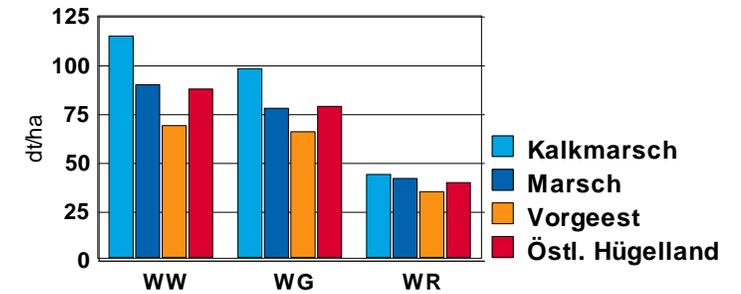
## Bodenübersichtskarte - Bodentypen



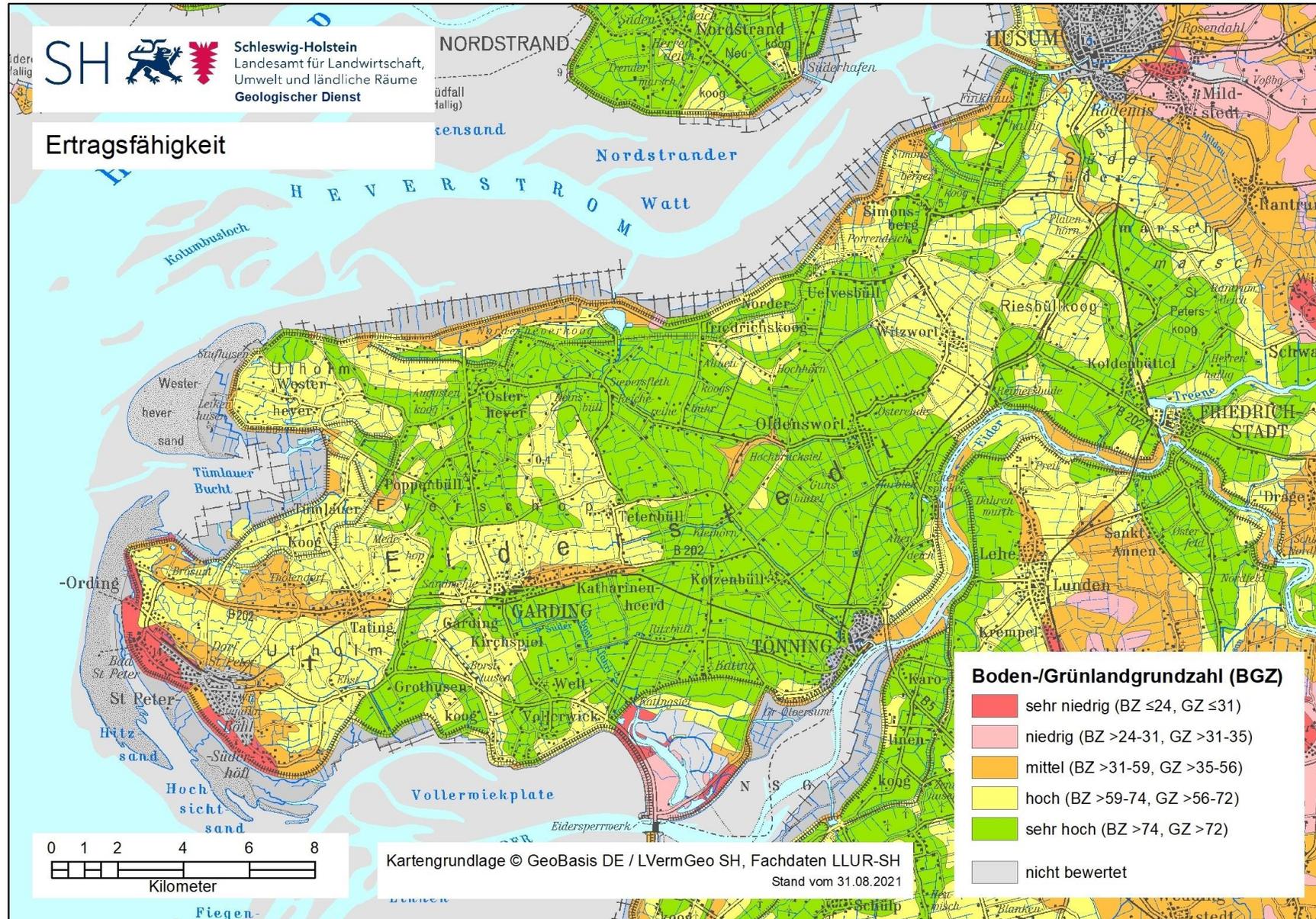
Anteil der Marschen (%) in Schleswig-Holstein in Abhängigkeit vom Naturraum (alle Angaben beziehen sich auf die im Maßstab 1.25.000 kartierte Fläche. Sände, Strandwälle, Aufspülungen, Deiche, Moore innerhalb des Marschgebietes sind nicht berücksichtigt, Datenquelle LLUR SH)

	Nordfriesland und Inseln	Eiderstedt	Eider-Treene-Sorge	Dithmarschen	Elbmarschen
Rohmarsch	7	3	0	4	1
Kalkmarsch	28	23	19	44	6
Kleimarsch	33	30	28	39	47
Dwogmarsch	16	33	23	10	43
Knickmarsch	7	10	7	1	0
Organomarsch	9	1	23	2	3
Anteil SH	22	19	5	33	21

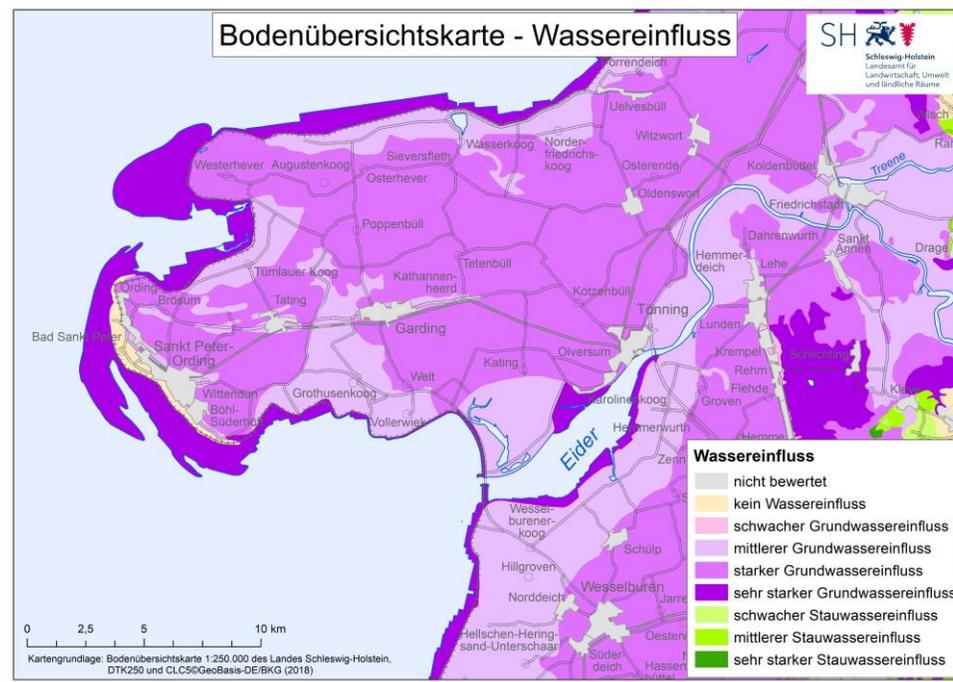
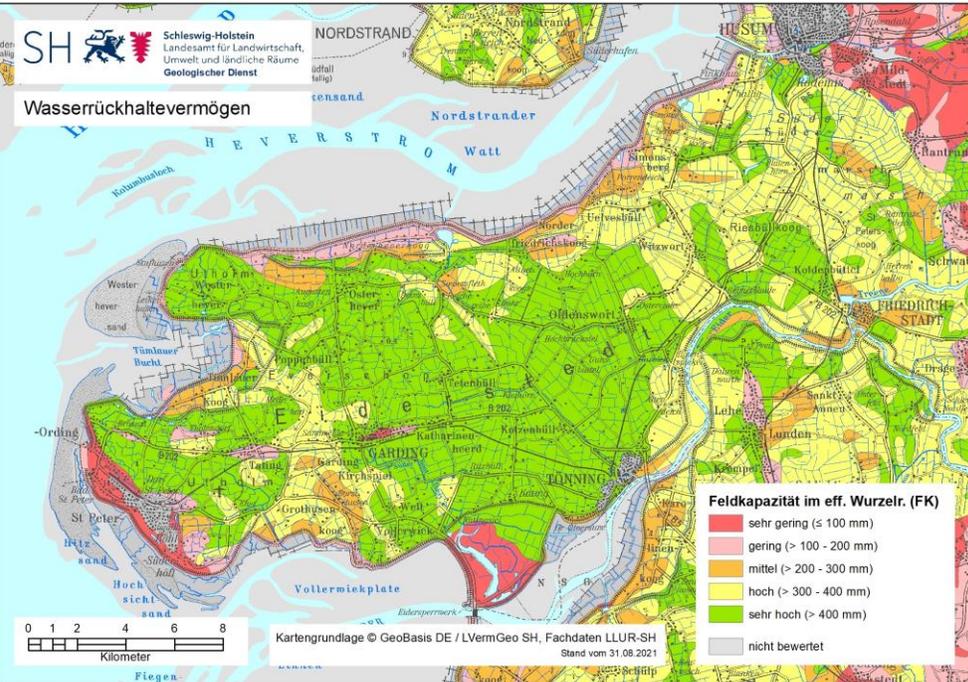
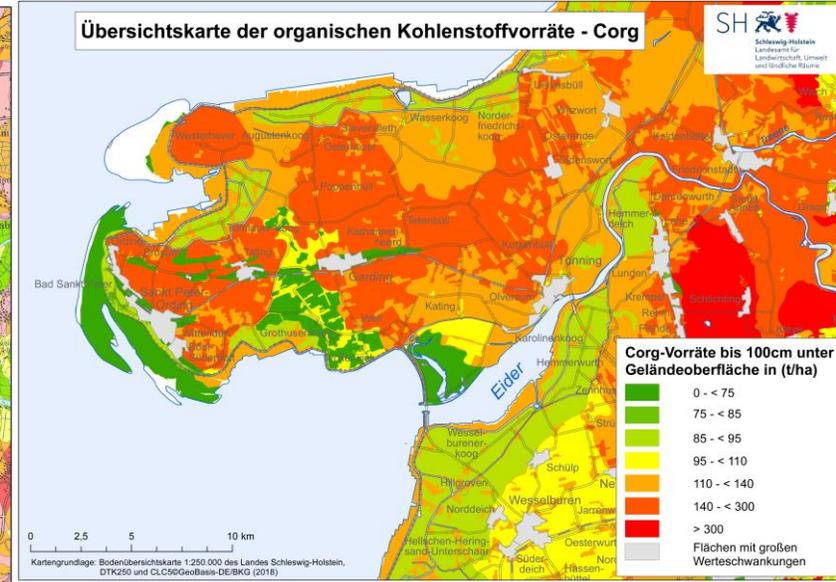
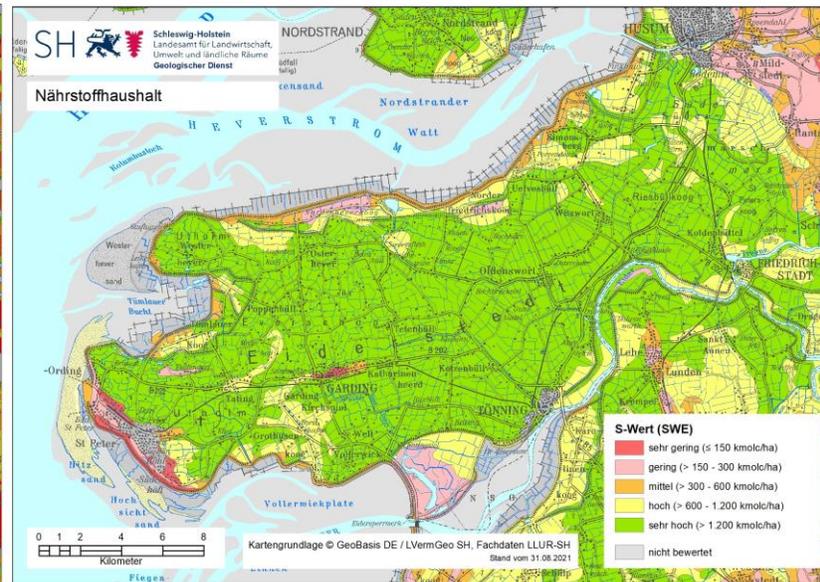
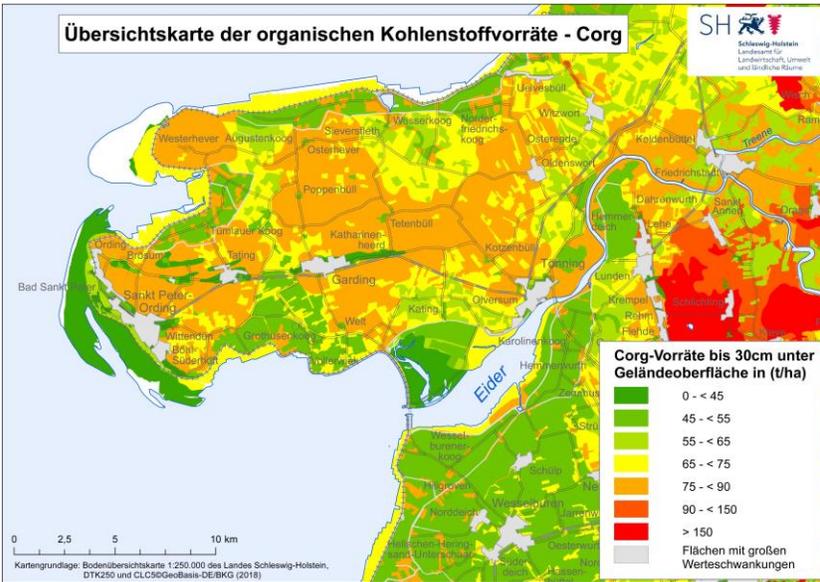
## Daten aus der Erntestatistik 2006



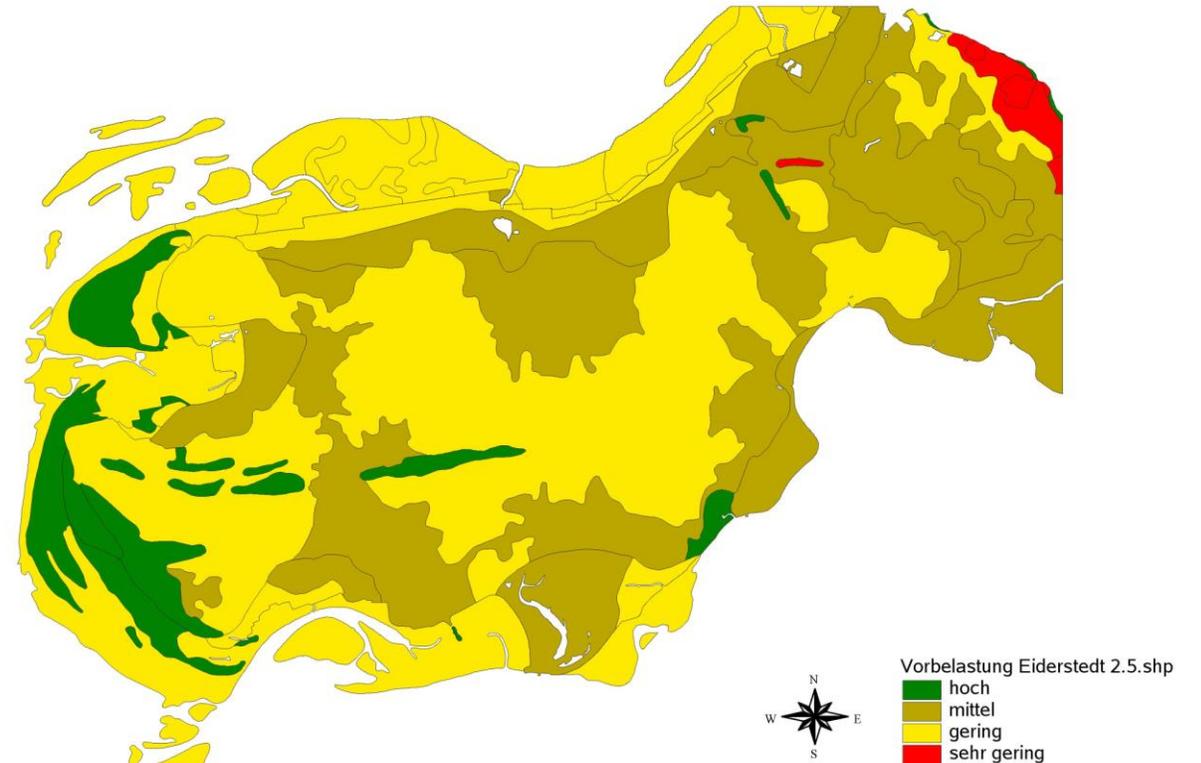
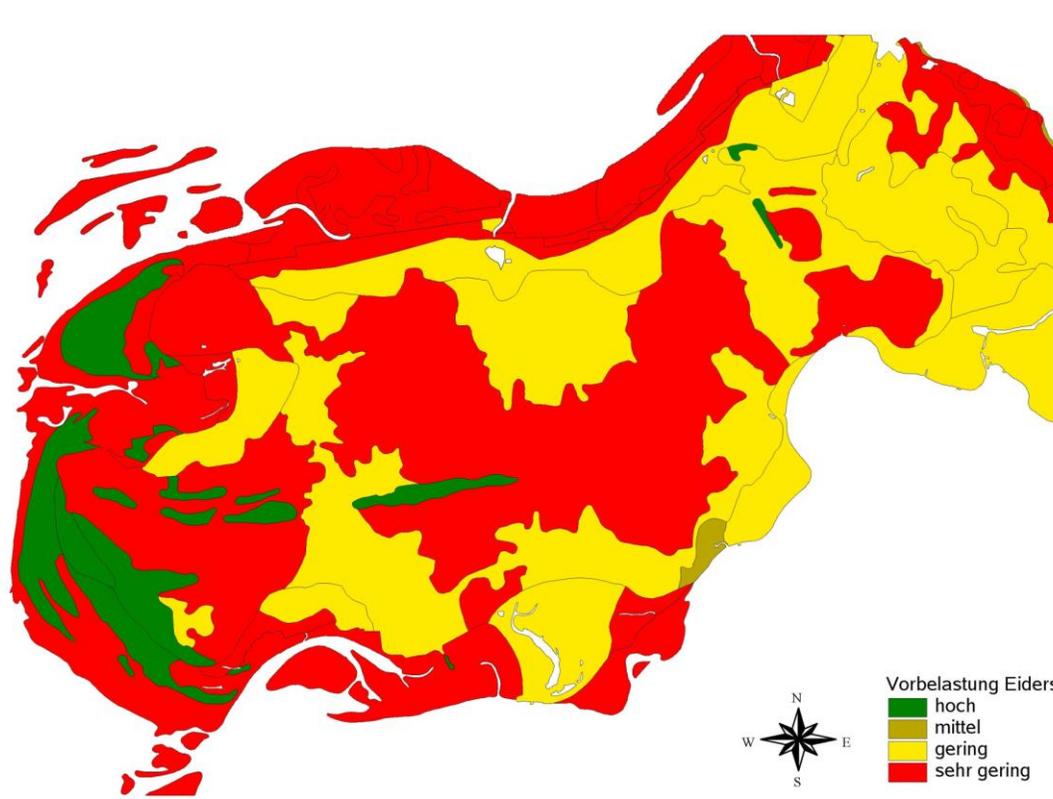
# Bodenbewertung mittels Acker- oder Grünlandschätzungsrahmen



# Charakterisierung der Böden anhand chemischer und physikalischer Eigenschaften



# Natürliche Bodenfestigkeit im Bereich von Eiderstedt



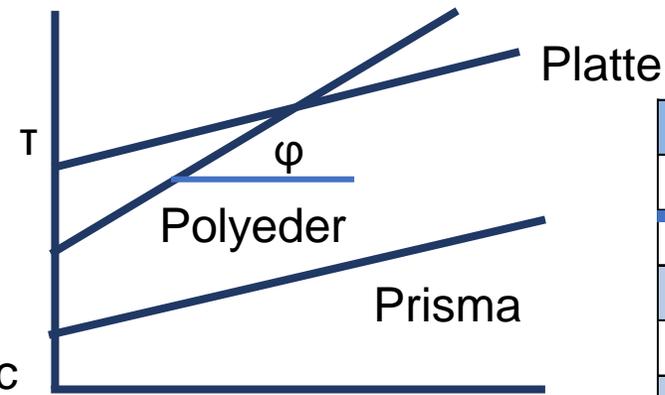
**Vorbelastung (kPa) (links: feucht (Frühjahr) –rechts trockener (Sommer))**

**Fazit für Osterhever: vorrangig sehr gering bis gering (0-60 kPa) im Frühjahr, im Sommer bis max 90 kPa belastbar aktuell**

**durch Einbau der Anlagen : Bodenprofile ge- (zer-)stört, Schichtungen sowie Bodenstruktur verschlechtert, chemische Zusammensetzung geändert**

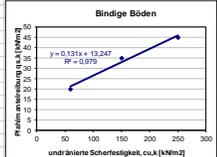
# Mögliche Folgen für die Bodeneigenschaften durch den Einbau von Photovoltaikanlagen

# Einfluss der Bodenstruktur für die mechanische Bodenstabilität



Ermittlung der Einbindetiefe der Stahlpfähle bei PV-Freilandphotovoltaikanlagen

Grundlage:			
Zusammenhang zwischen charakteristischer Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ und Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ bei nichtbindigen Böden			
Quelle: EA-Pfähle (2012), Abschnitt 5.4.4.2, Tab. 5.2			
Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]	0	7,5	15
Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0	40	95
im Grenzzustand			
Gleichung:			
im Grenzzustand: $q_{s,k} = 5,3517 \cdot q_c$			
Zusammenhang zwischen undrännierter Scherfestigkeit und Pfahlmantelreibung bei bindigen Böden			
Quelle: EA-Pfähle, S. 91, Tab. 5.4			
$c_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
60	20		
150	35		
250	45		
Gleichungen:			
$q_{s,k} = 0,131 \cdot c_u + 13,247$			



Vorentwässerung		-60 hPa	-60 hPa	-300 hPa	-300 hPa
Bodentextur	-struktur	c (kPa)	$\varphi^\circ$	c (kPa)	$\varphi^\circ$
Ss, Su 2-4	sin	8	26	12	28
	kru	13	33	16	39
	pol	15	39	18	41
	<b>pla</b>	<b>48</b>	<b>30</b>	<b>65</b>	<b>33</b>
Uls	coh	12	35	15	39
	kru	40	43	43	45
	sub	44	40	50	42
	pla	75	37	82	38
Lt 2-3	sin	1	19	2	23
	kru	46	39	66	43
	pla	82	37	86	38
Tu	sin	32	28	45	30
	kru	45	38	40	42
	pla	89	35	96	38

Wie gehen diese Kenngrößen in die Berechnung der Pfahlmantelreibung ein:

Berechnungsgrundlagen: negative Mantelreibung: n. DIN 1054:2005-01,

Mit effektiven Spannungen für nichtbindige und bindige Böden:  $\tau = K_0 \cdot \tan \varphi'_k \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sigma'_v$ .

Dabei ist:  $\sigma'_v$  die effektive Vertikalspannung,  $K_0$  der Erdrückbeiwert,  $\varphi'_k$  der charakteristische Wert des Reibungswinkels,  $\beta$  ein Faktor zur Festlegung der Größe der charakteristischen negativen Mantelreibung für nichtbindige und bindige Böden.

# Änderung physikalischer Bodenkenngrößen in Abhängigkeit von der Bodenart und der Lagerungsdichte

Texture	Luftkapazität Pore $\phi > 50 \mu\text{m}$ (pF < 1.8)			Nutzbare Wasserkapazität Pore $\phi 0.2 - 50 \mu\text{m}$ (pF 4.2-1.8)		
	< 1.4	1.4-1.6	> 1.6	< 1.4	1.4-1.6	> 1.6
Lagerungsdichte $\text{g cm}^{-3}$	< 1.4	1.4-1.6	> 1.6	< 1.4	1.4-1.6	> 1.6
Ss	36	32	27	9	7	7
Sl2	23	18	13	20	18	17
Sl3	18	15	10	22	18	17
Sl4		12	8	22	18	15
Slu			7	23	21	19
St2				18	16	13
St3				18	15	12
Su2	24				18	17
Su3	17	14				20
Su4	14	11				
Ls2	13	9	6			
Ls3	15	9	6	21		
Ls4	15	11	7	20	16	
Lt2	11	7	5	18	14	11
Lt3	8	5	3	17	12	10
Lts	10	6	5	17	14	11
Lu	12	7	4	21	17	15
Uu	10	7	3	30	26	23
Uls	13	8	5	24	22	21
Us	11	9	4	28	25	22
Ut2	10	6	3	28	26	23
Ut3	11	6	3	26	25	23
Ut4	12	7	3	23	21	19
Tt	4	3	2	15	13	12
Tl	5	4	3	15	13	11
Tu2	5	4	3	16	12	10
Tu3	8	6	3	17	13	10
Tu4	10	6	3	19	17	16
Ts2	5	4	3	16	13	12
Ts3	7	6	5	16	13	11
Ts4	13	10	6	17	14	11
Sand						
fS, fSms, fSgs	34	31	23	10	9	8
mS, mSfs, mSgs	36	32	26	9	6	5
gS	38	33	29	8	5	4

Saturated hydraulic conductivity ( $\text{cm d}^{-1}$ )			
Bulk density $\text{g cm}^{-3}$	<1.4	1.4-1.6	>1.6
Ss	375	340	230
Sl2	161	98	52
Sl3	98	65	29
Sl4	106	42	21
Slu	60	28	13
St2	179	118	68
St3	114	42	24
Su2	174	127	66
Su3	88	59	31
Su4	58	38	17
Ls2	53	23	10
Ls3	74	23	11
Ls4	68	36	11
	33	13	6
	20	7	3
		10	7
		16	6
		13	2
Uu	32		7
Uls	49		5
Us	37		
Ut2	32	12	
Ut3	41	12	
Ut4	45	13	3
Tt	4	3	2
Tl	8	6	2
Tu2	8	3	2
Tu3	18	9	3
Tu4	33	12	3
Ts2	8	5	3
Ts3	15	11	8
Ts4	51	38	8
Sand			
fS, fSms, fSgs	410	300	200
mS, mSfs, mSgs	675	490	250
gS	2100	835	335

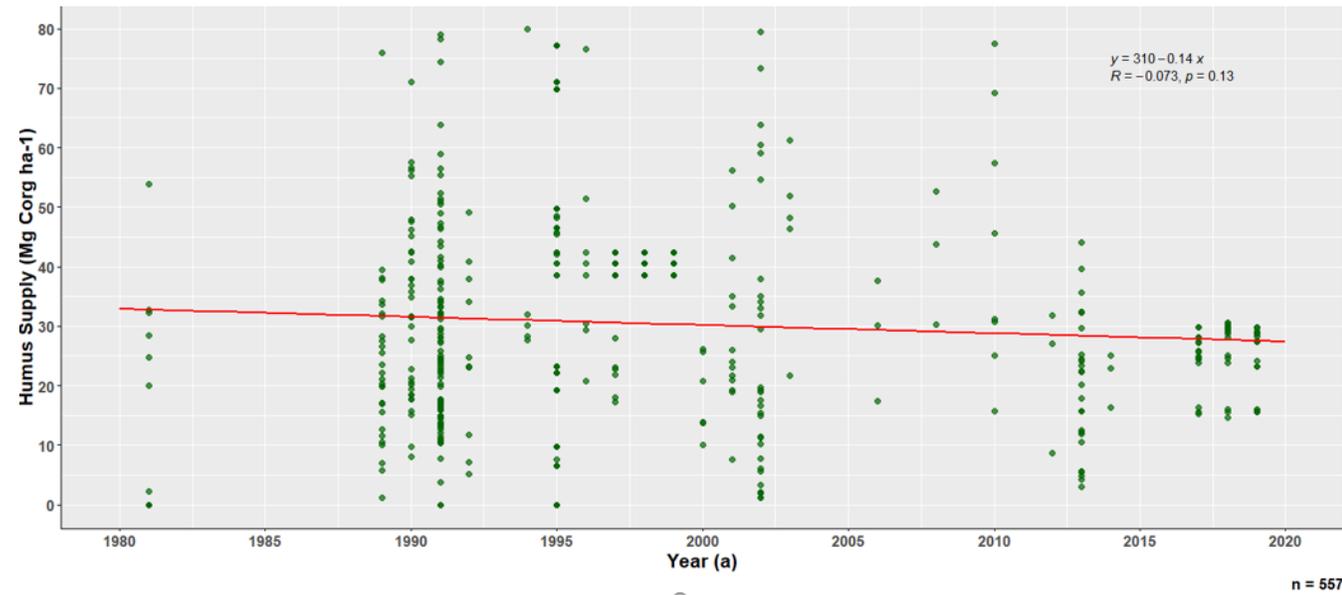
**Fazit: je stärker belastet, desto intensiver verschlechtert sich der Wasservorrat (speicherung) sowie die Luftkapazität ebenso wie der Wasserfluss massiv verzögert wird.**

# Zuschläge (und Abschläge) zur Luftkapazität, nutzbaren Feldkapazität und Feldkapazität in Volumen-% in Abhängigkeit von Bodenart und organischer Substanz

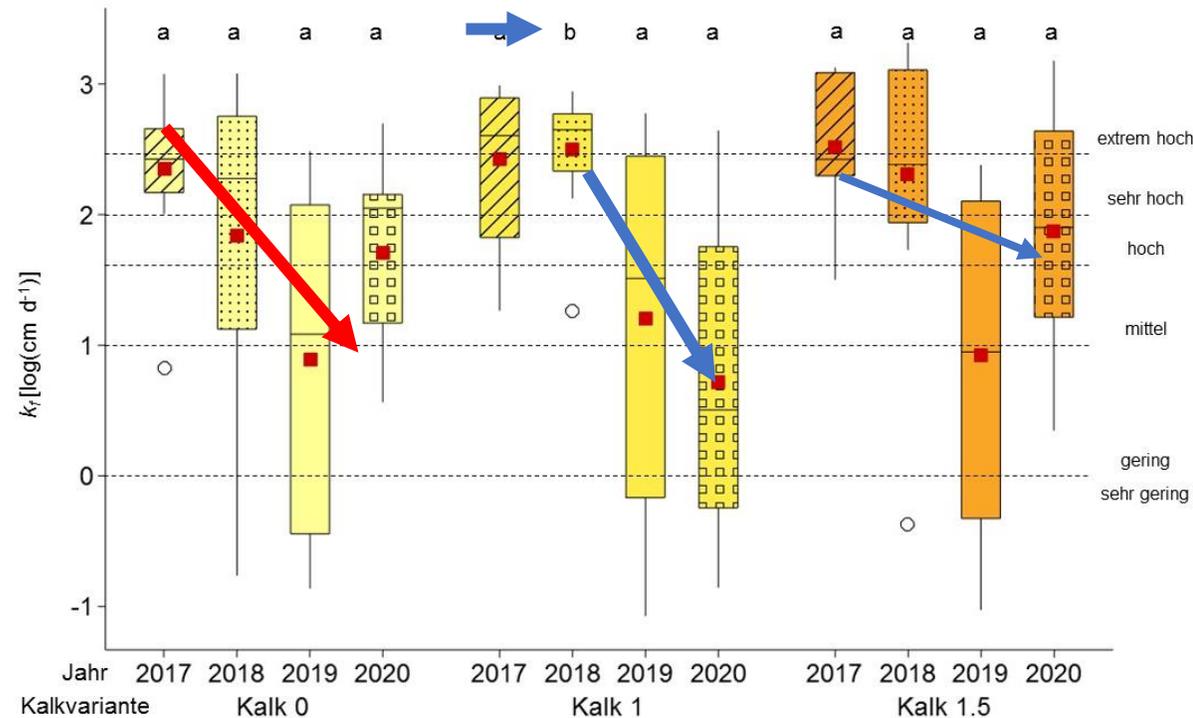
Bodenart Kurz- zeichen	Luftkapazität				Nutzbare Feldkapazität				Feldkapazität			
	Organische Substanz in Stufen											
	h2	h3	h4	h5	h2	h3	h4	h5	h2	h3	h4	h5
Ss	0	-1	-2	-3	1	3	4	8	3	6	9	12
Sl2	0	1	2	3	2	3	4	6	3	6	9	13
Sl13	1	2	3	4	1	3	4	6		5	9	12
Sl4	2	2	3	4	2	4	5	6	3	7	11	14
Slu	2	3	4	6	1	2	4	6	2	5	8	11
St2	0	0	1	1	3	4	5	7	5	7	11	15
St3	1	2	3	4	2	4	6	9	2	5	8	11
Su2	0	0	-1	-2	2	3	4	6	3	6	9	12
Su3	1	1	2	2	1	2	3	4	2	3	4	5
Su4	2	2	3	3	1	2	3	4	2	3	4	5
LS4	1	2	3	3	2	4	6	8	4	6	12	15
Lt2	2	3	5	6	3	5	8	10	5	8	13	15
Lt3	1	2	4	7	2	4	8	11	5	6	12	15
Lts	1	2	5	6	3	5	7	9	3	7	13	15
Lu	2	3	6	7	3	5	7	8	6	7	13	14
Uu	2	3	5	9	1	2	3	4	2	4	8	11
Uls	2	3	4	8	3	4	4	7	4	7	10	15
Us	2	3	5	8	1	2	3	4	2	4	7	10
Ut2	2	4	6	8	1	1	2	4	2	4	7	12
Ut3	2	4	6	8	1	1	2	4	2	3	8	12
Ut4	2	4	6	7	2	3	4	6	4	6	9	13
Tt	1	2	4	8	2	4	5	7	5	6	9	11
Tl	1	2	3	7	2	4	6	8	5	6	11	13
Tu2	1	2	3	7	1	3	5	8	5	6	10	13
Tu3	2	2	3	6	2	4	7	9	6	8	12	14
Ts2	1	2	3	7	2	4	6	8	6	7	12	14
Ts3	2	3	4	5	2	5	7	9	5	6	12	14
Ts4	2	3	4	5	2	4	7	9	4	6	11	14

**Fazit: langfristig wird sich nichts an dem Humusgehalt und –vorrat im Boden positiv ändern!**

Änderung des Humusvorrates mit der Zeit in terrestrischen Böden (0-30 cm Tiefe =A Horizont)



# Kalkungseffekte als Ursache für die Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in Kleimarschen (Barlt)



Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) [ $\text{cm d}^{-1}$ ] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ( $n = 12$ ). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ( $p < 0,05$ ).

## 6. Bodenbewertung

Böden werden für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Grünland, Sonderkulturen, Grundwasserneubildung, Freizeitnutzung, Baugrund, Rohstoff genutzt. Die Bewertung erfolgt daher stets Fragestellungsorientiert.

# Bodenbewertung und Folge von Eingriffen in den Bodenaufbau

## 6.1. Bewertung für landwirtschaftliche Nutzung (Ackernutzung)

Aufgrund des Gesetzes über die Bewertung des Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz vom 16.10.1934) werden die Bodeneigenschaften eines Ackerstandortes durch die Bodenzahl bewertet. Eine zusätzliche Berücksichtigung von Klima und Relief ergibt die Ackerzahl.

Ackerschätzungsrahmen mit Bodentypen als Zustandsstufen (n. ROTHKEGEL1952, ergänzt)

Tschernosem Parabraunerde Fahlerde Pseudogley Stagnogley  
Braunerde Regosol Ranker Podsol  
Pararendzina Terra fusca Rendzina  
Vega Mullglej Pelosol Modergley

entwässerte Böden

Tschernitza Borowina Paternia Hochmoor  
Niedermoor  
Mullglej Modergley  
Kalkmarsch Kleimarsch Knickmarsch

Bodenart <sup>1)</sup>	Entstehung (mit Beispiel) <sup>2)</sup>	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S	D (Sandersand)	41-34	33-27	26-21	20-16	15-12	11-7	
	Al (Dünensand)	44-37	36-30	29-24	23-19	18-14	13-9	
	V (Quarzit)	41-34	33-27	26-21	20-16	15-12	11-7	
Sl	D (Geschiebesand)	51-43	42-35	34-28	27-22	21-17	16-11	
	Al (Schotter)	53-46	45-38	37-31	30-24	23-19	18-13	
	V (Fe-Sandstein)	49-43	42-36	35-29	28-23	22-18	17-12	
IS	D (tert. Sandmergel)	68-60	59-51	50-44	43-37	36-30	29-23	22-16
	Lö (Flotssand)	71-63	62-54	53-46	45-39	38-32	31-25	24-18
	Al (fluv. Sand)	71-63	62-54	53-46	45-39	38-32	31-25	24-18
	V (Granit)	57-51	50-44	43-37	36-30	29-24	23-17	
	Vg (Granit)		47-41	40-34	33-27	26-20	19-12	
SL	D (Geschiebemergel)	75-68	67-60	59-52	51-45	44-38	37-31	30-23
	Lö (Löß)	81-73	72-64	63-55	54-47	46-40	39-33	32-25
	Al (Auenlehm)	80-72	71-63	62-55	54-47	46-40	39-33	32-25
	V (Tonsandstein)	75-68	67-60	59-52	51-44	43-37	36-30	29-22
	Vg (Dolomit)		55-48	47-40	39-32	31-24	23-16	
sL	D (Geschiebemergel)	84-76	75-68	67-60	59-53	52-46	45-39	38-30
	Lö (Löß)	92-83	82-74	73-65	64-56	55-48	47-41	40-32
	Al (Auenlehm)	90-81	80-72	71-64	63-56	55-48	47-41	40-32
	V (Mergelgestein)	85-77	76-68	67-59	58-51	50-44	43-36	35-27
	Vg (Gneis)		64-55	54-45	44-36	35-27	26-18	
L	D (Geschiebemergel)	90-82	81-74	73-66	65-58	57-50	49-43	42-34
	Lö (Staublehm)	100-92	91-83	82-74	73-65	64-56	55-46	45-36
	Al (Schlick)	100-90	89-80	79-71	70-62	61-54	53-45	44-35
	V (Gabbro)	91-83	82-74	73-65	64-56	55-47	46-39	38-30
	Vg (Basalt)		70-61	60-51	50-41	40-30	29-19	
LT	D (Beckenton)	87-79	78-70	69-62	61-54	53-46	45-38	37-28
	Al (Schlick)	91-83	82-74	73-65	64-57	56-49	48-40	39-29
	V (Kalkstein)	87-79	78-70	69-61	60-52	51-43	42-34	33-24
	Vg (Kalkstein)		67-58	57-48	47-38	37-28	27-17	
T	D (Beckenton)	71-64	63-56	55-48	47-40	39-30	29-18	
	Al (Beckenton)	74-66	65-58	57-50	49-41	40-31	30-18	
	V (Schiefertone)	71-63	62-54	53-45	44-36	35-26	25-14	
	Vg (Tonschiefer)		59-51	50-42	41-33	32-24	23-14	
Moor		54-46	45-37	36-29	28-22	21-16	15-10	

<sup>1)</sup> Durchschnittswert des Wurzelraumes, d. h. maximal bis 1 m Tiefe nach Tabelle 3.5.8

<sup>2)</sup> Al: holozäne Lockersedimente, Lö: Löß, D: sonstige Lockersedimente, V: verfestigte Gesteine, Vg: hoch anstehende, verfestigte Gesteine und/oder steinreich.

## Görtz'scher Halbkreis



# Problem: Gründungstiefen für die Anlagen in den Marschen

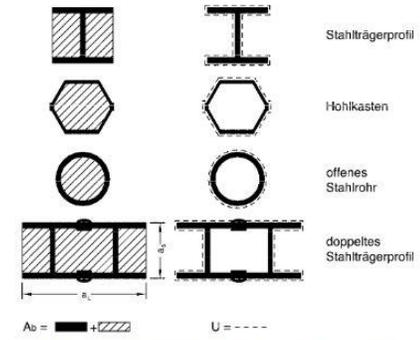


Bild 5.5 Nennwerte der Pfahlfußflächen und der Pfahlmantelflächen von Stahlprofilpfählen

- Meist **Stahlpfosten** bis in etwa 1,5 m und 3,0 m Tiefe  
**Boden**

**Folgen für vorhandene Dränagen im**

- Bei **gering tragfähigen Untergrundverhältnissen**: z.B. weiche bindige oder organische Böden:  
Problem der partiellen **Versiegelung durch Betonfundamente**

- Einbindetiefe der Stahlpfosten bei organischen Ablagerungen (Klei und Torf mit Sande durchgezogen) bis etwa 7 und 9 m.

- Sofern **Betonfundamente** zum Einsatz kommen, werden sie üblicherweise zwischen 1 m bis 2 m tief im Boden eingebunden. Erforderliche Fläche pro Fundament: Variation zwischen 1 x 2 m und 3 x 6 m.

- Einfluß **hoher Windbelastung**: bei schluffig lehmigen Böden (Osterhever) höherer Pfahlmantelwiderstand mit einhergehender Mehr-Einbindetiefe nötig. Die Mehr-Einbindetiefe bei den betroffenen Pfosten variiert etwa **zwischen 0,2 m und 1,0 m**

**Grundlage zur Dimensionierung  
der Einbindetiefen Stahlpfähle (Mikropfähle)**

EA-Pfähle (2012), DIN EN 14199 (07/2015)

# Einige theoretische Hintergrundinformationen

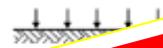
Nicht vollständig

- (1) Bei Pfahlgründungen sind Einwirkungen zu unterscheiden in
- Gründungslasten, z. B. aus dem Bauwerk, siehe 4.2;
  - grundbauspezifische Einwirkungen, hier besonders Einwirkungen aus dem Baugrund, z. B. negative Mantelreibung nach 4.4, Seitendruck nach 4.5 und Setzungsbiegung nach 4.6;
  - nichtruhende Einwirkungen aus dynamischen, zyklischen und stoßartigen Belastungen.

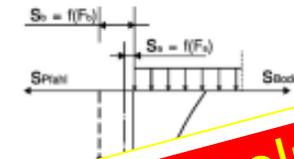
(2) Die Gründungslasten, z. B. aus dem aufgehenden Bauwerk, können zu folgenden Einwirkungen auf die Pfähle führen:

- $F_{G,k}$  als ständige Einwirkung in axialer Richtung,
- $F_{Q,k}$  als veränderliche Einwirkung in axialer Richtung,
- $H_{G,k}$  als ständige Einwirkung quer zur Pfahlachse,
- $H_{Q,k}$  als veränderliche Einwirkung quer zur Pfahlachse,
- $M_{G,k}$  als Moment infolge ständiger Einwirkungen,
- $M_{Q,k}$  als Moment infolge veränderlicher Einwirkungen.

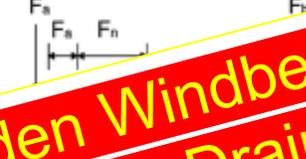
a) starrer Pfahl



Pfahl- und Bodensetzung



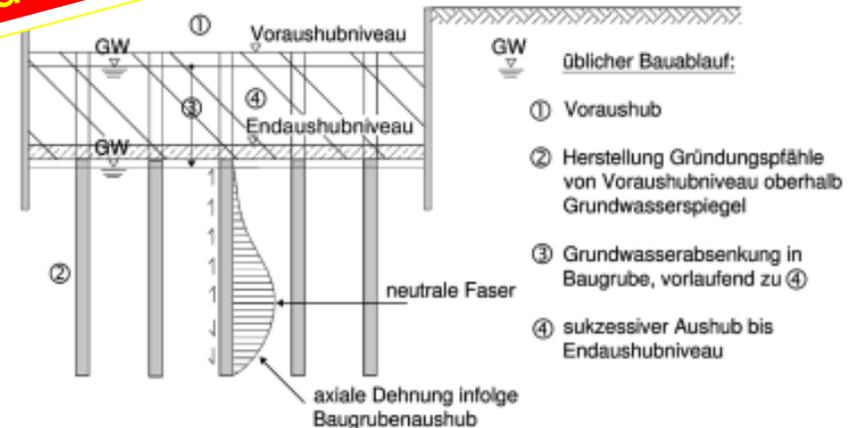
Pfahllängskraftbeanspruchung



Die Schichtung, der wechselnde Wassergehalt, die wechselnden Windbelastungen und die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen sowie die Folgen der Drainage für die Festigkeitsparameter müssen berücksichtigt werden - je stärker der Boden aber bereits bei der Baumaßnahme beansprucht wurde, desto intensiver muss mit entsprechenden Änderungen sämtlicher ökologischer und mechanischer Parameter und Bodenfunktionen auch langfristig gerechnet werden.



**Bild 4.2** Modellvorstellung zur negativen Mantelreibung und Aktivierung der Pfahlschaftrreibung in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\psi$  der Setzungskurven bei einem (a) starren Pfahl bzw. (b) elastischen Pfahl (nach [28], aus [43])



**Bild 4.3** Beispiel zur Beanspruchung von Pfählen durch Hebungen des Bodens in der Pfahlumgebung, hier: infolge nachfolgendem Baugrubenaushub

## Problemkreis Folgearbeiten

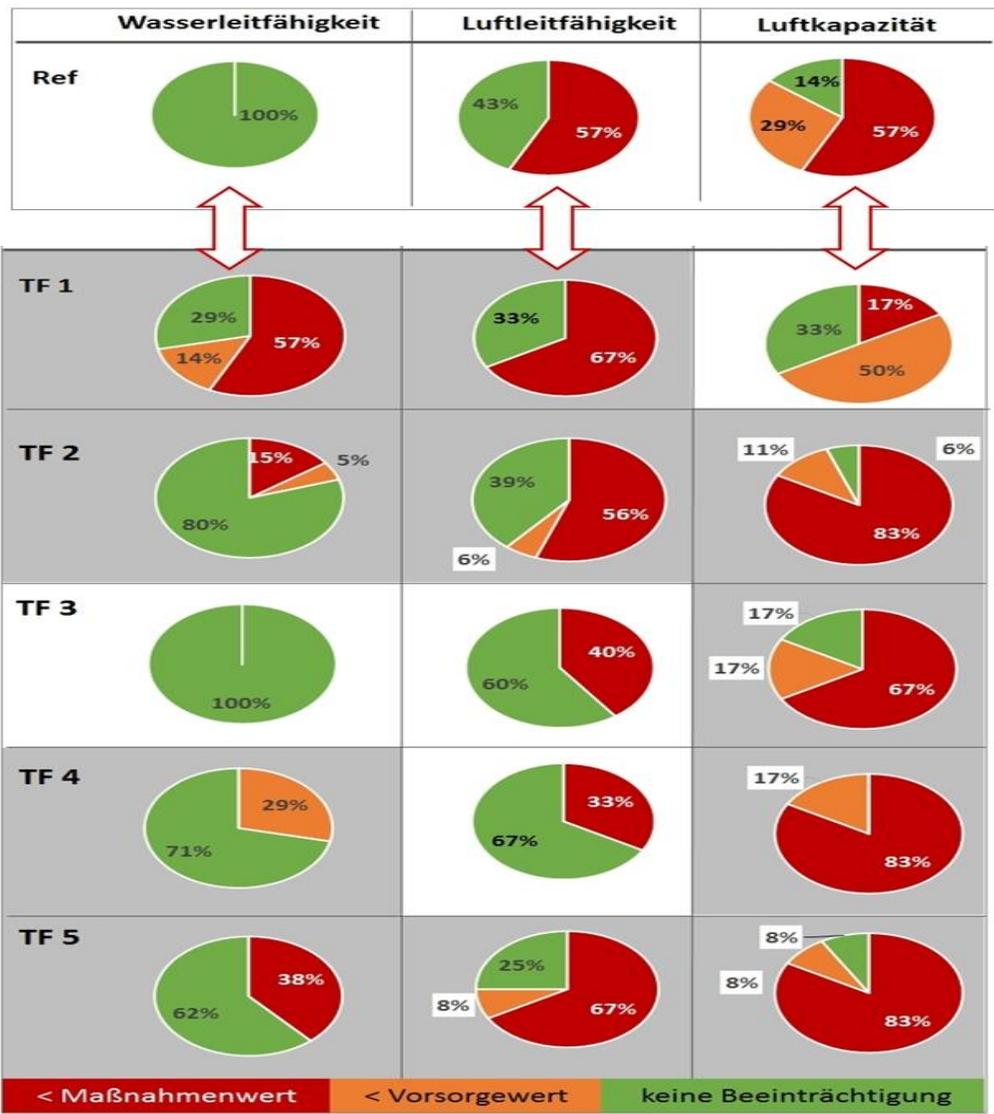
- Schafe zum Kurzhalten der Bodenbedeckung
- Bei höheren PV Anlagen: Mähroboter- aber je höher die PV- Anlage desto größerer Windsog
- Geovlies
- Bodendeckerpflanzen
- Schotter
- Photovoltaik Reiniger: Tenside, organische Säuren, dest. Wasser  
**pH-Wert (Konzentrat) ca. 1; Dichte ca. 1,02 g/ml**



### Folgen für die ökologischen Bodenfunktionen :

Zu erwartende Auswirkungen

- 1) auf den Chemismus des Bodens durch **Versauerung**, fehlende Düngerapplikation während der PV Nutzung, Ausserdem Redoxänderungen durch
- 2) **Strukturdestabilisierung aufgrund der Dispergierung** - Dichtlagerung, Grundwasserbelastung, Auswaschung von Stoffen, sowie Änderungen der physikalischen Bodenfunktionen: Wasserspeicherung, Lufthaushalt, Wasserleitfähigkeit und Bodenstabilität
- 3) Folgen für die natürlichen **Bodenmikroorganismen** und deren Zusammensetzung, chemische und physikalische Aspekte



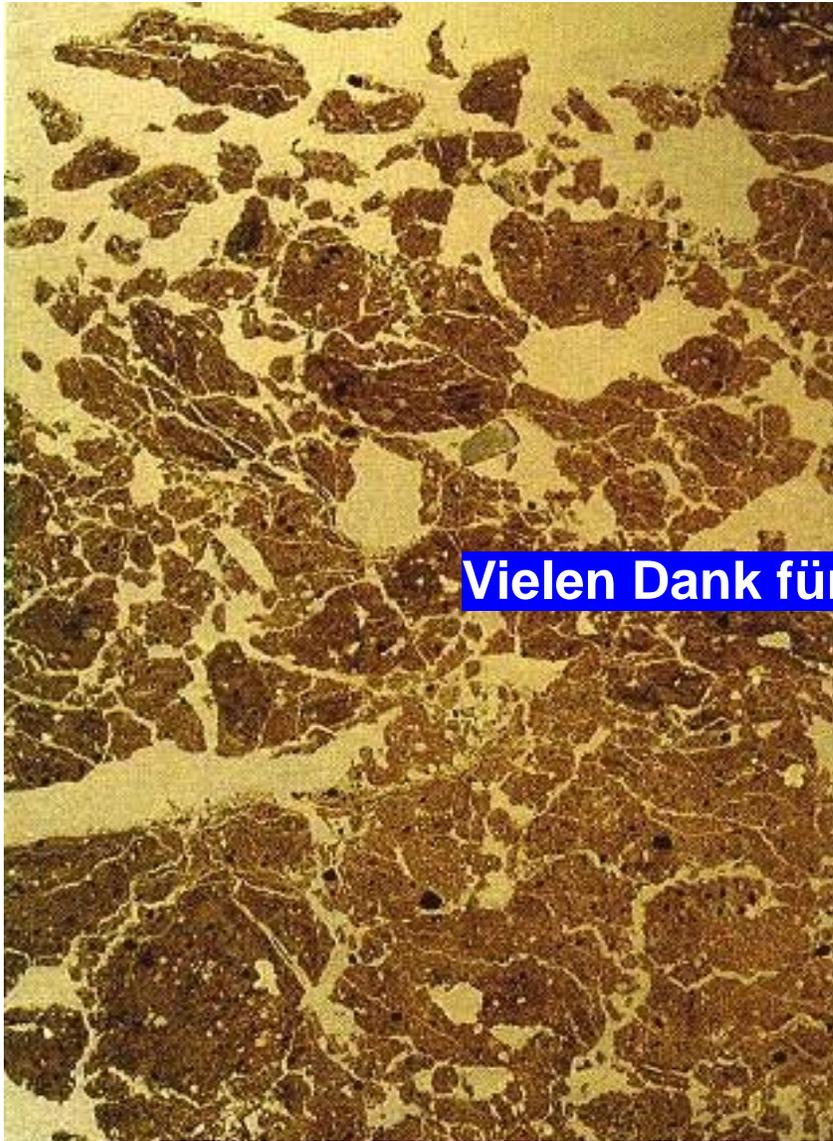
Indikation einer schädlichen Bodenveränderung in Bezug auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit, der Luftleitfähigkeit bei pF 1,8 und der Luftkapazität in den untersuchten Oberbodenhorizonten der einzelnen Teilfläche (TF1-TF5) des Solarparks und der Referenz (Ref). Dargestellt sind relative Häufigkeiten der Messwerte, die die jeweiligen Prüfwerte überschreiten (d.h. Messwert < Maßnahmenwert bzw. < Vorsorgewert) oder nicht überschreiten (keine Beeinträchtigung). Grau hinterlegte Felder weisen auf eine Verschlechterung der Bodeneigenschaften im Vergleich zur Referenz hin

# Fazit



- 1) Böden der Marsch sind von Natur aus sehr ertragsreich, aber gleichzeitig auch sehr empfindlich und erfordern kontinuierliche bodenschonende und standortangepasste Bewirtschaftung
- 2) Kontinuierliche Zufuhr von Kalkung zur Aufrechterhaltung der aktuellen Bodenfunktionen auch während der Überdeckung durch Photovoltaikanlagen erfordern um massive Entkalkung und Versauerung zu verhindern.
- 3) Einbau von Photovoltaikanlagen geht mit einer massiven Zerstörung der natürlichen Bodenstruktur und damit mit der Verschlechterung der physikalischen (Luft, Wasser), chemischen (KAK, Humus, Redoxverhältnisse) sowie biologischen Kenngrößen der Böden einher.
- 4) Langfristige Stationierung der Anlagen verschlechtert das Ertragspotential nach Abschluss und zerstört die für die spätere Pflanzenproduktion besonders notwendige Bodenstruktur und deren Lagerung dieser empfindlichen Böden irreversibel.
- 5) Aufstellung von Photovoltaikanlagen sollte auf Standorten mit geringem Ertragspotential außerhalb der Nutzflächen für die Landwirtschaft erfolgen (Geestrücken o.ä.)





**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Dünnschliffaufnahme (Oberboden 0-5cm) einer lehmigen Braunerde  
Links: Ausgangszustand, rechts verdichtet

### Ermittlung der Einbindetiefe der Stahlpfähle bei PV-Freilandphotovoltaikanlagen

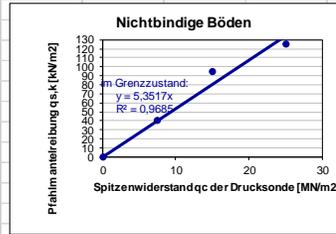
#### Grundlage:

Zusammenhang zwischen charakteristischer Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  und Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  bei **nichtbindigen Böden**

Quelle: EA-Pfähle (2012), Abschnitt 5.4.4.2, Tab. 5.2

Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]	0	7,5	15	25
Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] im Grenzzustand	0	40	95	125

Gleichung:  
im Grenzzustand:  $q_{s,k} = 5,3517 \cdot q_c$



Zusammenhang zwischen undränierter Scherfestigkeit und Pfahlmantelreibung bei **bindigen Böden**

Quelle: EA-Pfähle, S. 91, Tab. 5.4

$c_u, k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
60	20
150	35
250	45

Gleichungen:  
 $q_{s,k} = 0,131 \cdot c_u + 13,247$

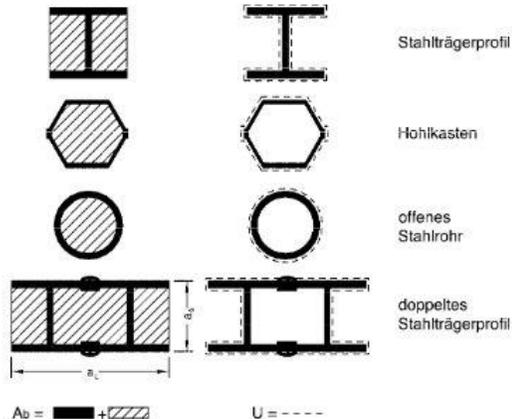
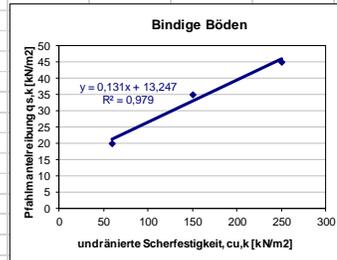


Bild 5.5 Nennwerte der Pfahlfußflächen und der Pfahlmantelflächen von Stahlprofilpfählen

**Tabelle 5.1** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzenendruck  $q_{b,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung $s/D_{eq}$	Pfahlspitzenendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
0,035	2.200–5.000	4.000–6.500	4.500–7.500
0,100	4.200–6.000	7.600–10.200	8.750–11.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.2** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde in [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
$s_{sq}$	30–40	65–90	85–120
$s_{sq} = s_q = 0,1D_{eq}$	40–60	95–125	125–160

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.3** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzenendruck  $q_{b,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung $s/D_{eq}$	Pfahlspitzenendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undränierten Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]		
	100	150	250
0,035	350–450	550–700	800–950
0,100	600–750	850–1.100	1.150–1.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.4** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undränierten Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]		
	60	150	250
$s_{sq}$	20–30	35–50	45–65
$s_{sq} = s_q = 0,1D_{eq}$	20–35	40–60	55–80

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

# Grundlage zur Dimensionierung der Einbindetiefen Stahlpfähle (Mikropfähle)

EA-Pfähle (2012), DIN EN 14199 (07/2015)

**Einwirkungen**  $\leq$  **Widerstände**

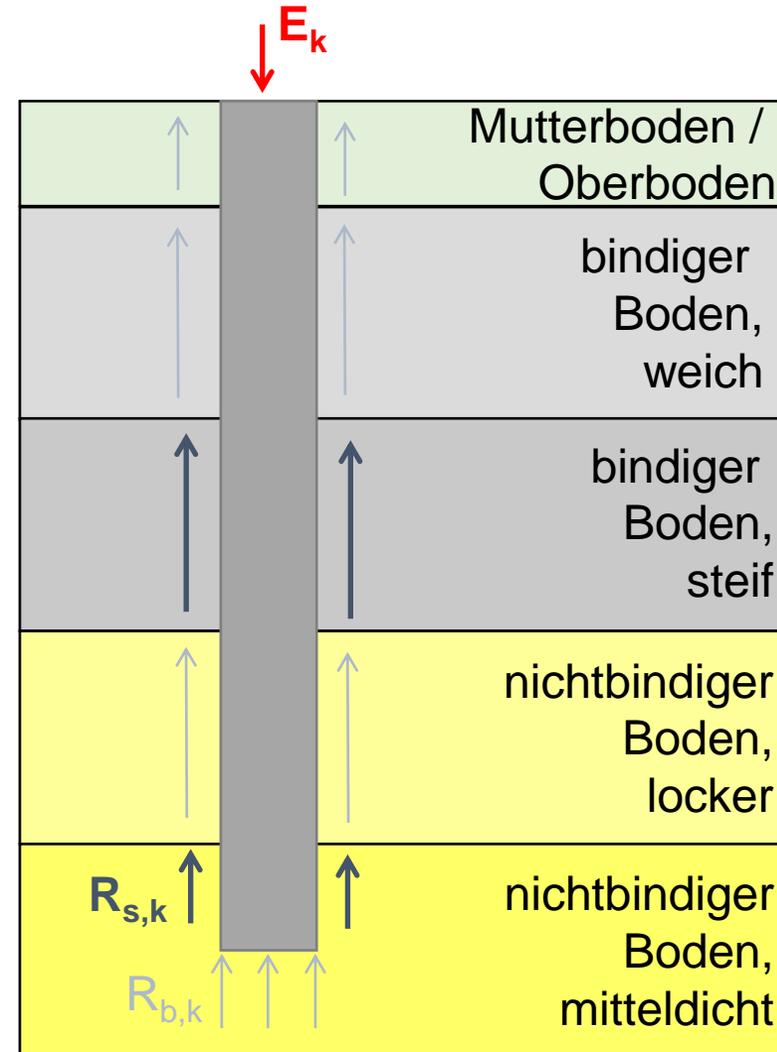
$$E_d \leq R_d$$

$$E_k \times \gamma_F \leq R_k / \gamma_R$$

$$R_k = R_{b,k} + R_{s,k}$$

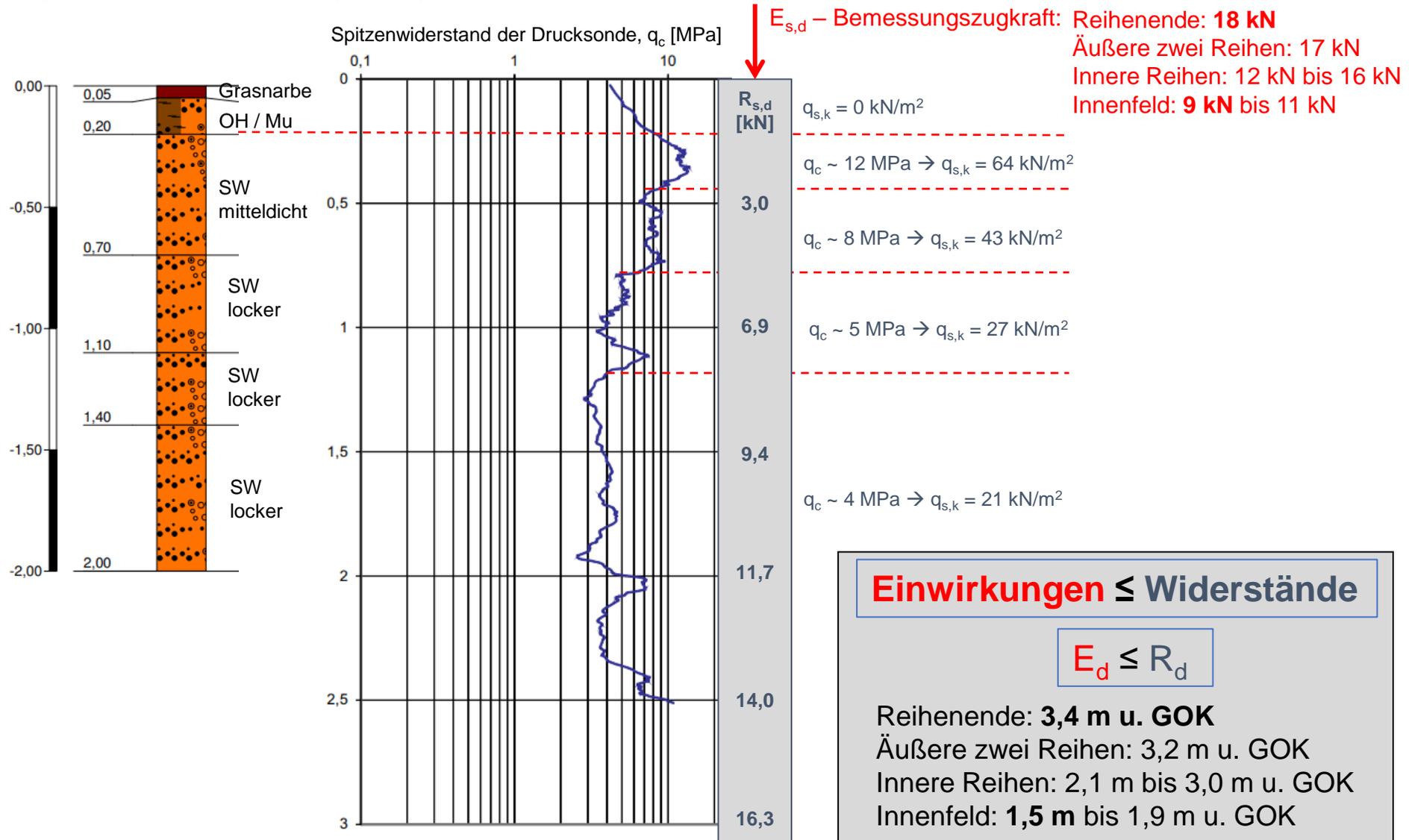
$$R_{b,k} = q_{b,k} \times A_b$$

$$R_{s,k} = \sum q_{s,k,i} \times A_{s,i}$$



# Beispielberechnung der Einbindetiefen Stahlpfähle (Mikropfähle)

gemäß EA-Pfähle (2012)



# DIE PROZEßSPIRALE DER BODENDEGRADATION

- **Nicht standortangepasste Landwirtschaft**

Zerstörung der Struktur,  
Abnahme der Gehalte an org. Subst. und Nährstoffe  
Zunahme der Erosion und Gasemission

- **Verlust an Soil Resilience**
- **Verringerung der Ökosystemfunktionen**

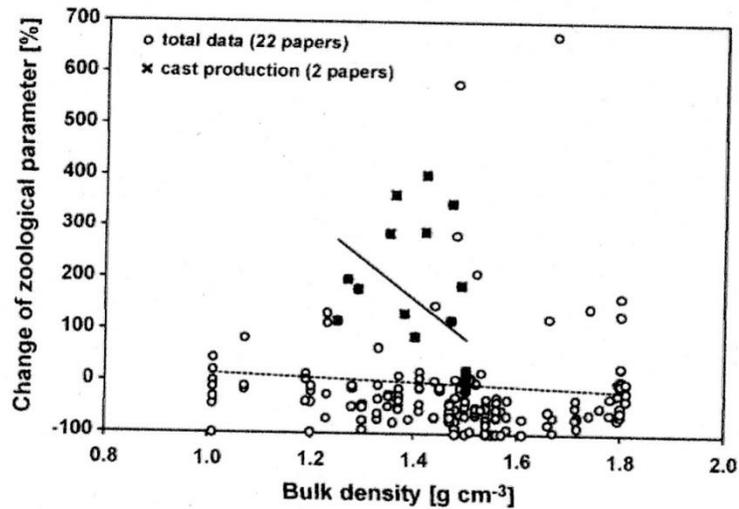
- **Verlust an Bodenbiodiversität**
- **Entkopplung von Bodenprozessen**

- **Hunger**
- **Fehlernährung**
- **politische Unruhen**
- **Krieg und Unsicherheiten**
- **Migrationskrise**

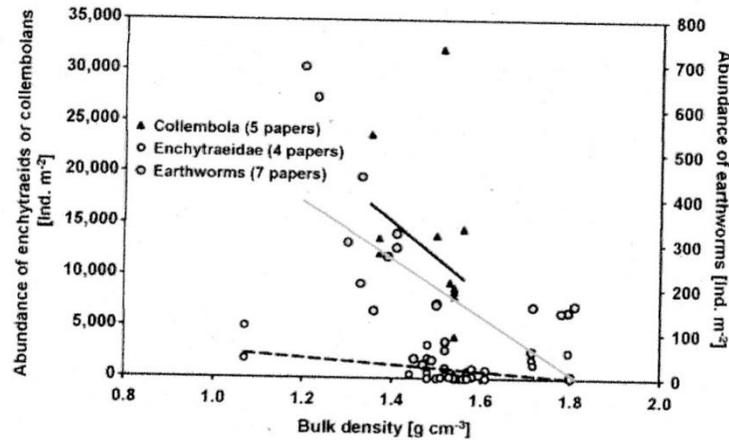
**Intensive Degradation**

# Welchen Einfluß haben Bodenverdichtungen auf die biologische Aktivität und Zusammensetzung?

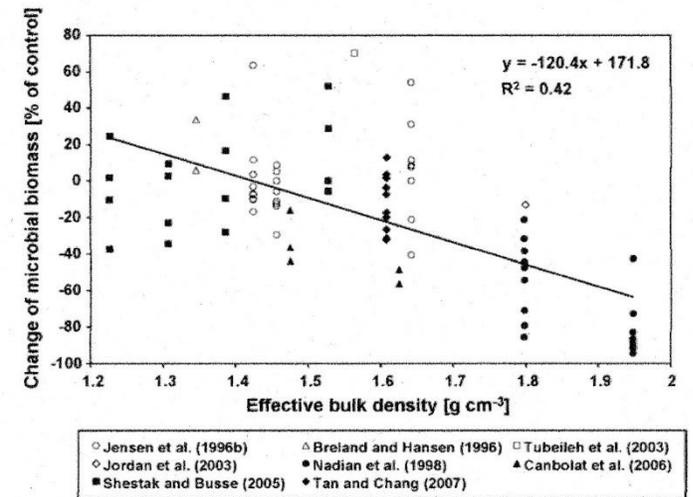
A. Beylich et al./Soil & Tillage Research 109 (2010) 133–143



**Fig. 1.** Change of soil zoological parameter (% of uncompacted control) in relation to bulk density. Studies on cast production highlighted because of high number of positive effects.  $r^2 = 0.005$ , n.s. (all data, dotted line;  $y = -40.45x + 56.489$ ) and  $r^2 = 0.222$ ,  $p < 0.05$  (cast production, black line;  $y = -763.67x + 1229.3$ ).



**Fig. 2.** Abundance of three soil fauna groups in relation to bulk density. No controls, treatment data only.  $r^2 = 0.484$ ,  $p < 0.001$  (earthworms, grey line;  $y = -640.09x + 1161.1$ ),  $r^2 = 0.124$ , n.s. (Collembola, black line;  $y = -34823x + 63984$ ),  $r^2 = 0.161$ , n.s. (Enchytraeidae, dotted line;  $y = -3173.2x + 5748.2$ ).



**Fig. 6.** Change of microbial biomass (% of starting point before compaction) relative to effective bulk density after compaction in laboratory experiments.  $r^2 = 0.417$ ,  $p < 0.001$ .