

1. Erläuterungen zur Nachweisführung für einen lokalen erdstatische Nachweis des Deckwerkes gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen

1.1 Allgemeines

Kritisch für das Versagen von Bruchstein-Deckwerken unter Sturmflutbedingungen ist der Bewegungsbeginn der einzelnen Steinblöcke und die Verformung der Deckschicht. Dem entgegen wirken als Widerstand das Gewicht der Steinblöcke, ihre Reibung untereinander und die Durchlässigkeit der Unterschicht (Filterschicht) und des Untergrundes.

Bei einem nach MAR und MAV hergestellten Teilverguss kann das Flächengewicht erhöht werden. Der schnelle Wasserspiegelabsenk z_a ist immer mit Porenwasserüberdrücken im oberflächennahen Bodenbereich des Gewässerbettes verbunden.

Je nach Absenkgröße und Absenkgeschwindigkeit kann es dadurch bei einem durchlässigen Deckwerk zum:

- 1.) Abgleiten in einer böschungsp parallelen Bruchfuge in der kritischen Tiefe d_{krit} unterhalb des Deckwerkes,
- 2.) zu hydrodynamischen Bodenverlagerungen unmittelbar unter dem Deckwerk kommen,

wenn das Flächengewicht des Deckwerkes nicht ausreichend groß ist. Für die Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts eines durchlässigen Deckwerkes auf einer Uferböschung müssen grundsätzlich die geotechnischen Nachweise der beiden oben genannten Versagensmechanismen geführt werden. Diese Nachweise können in gleicher Weise auch zur Überprüfung der lokalen Standsicherheit natürlicher Uferböschungen herangezogen werden.

Nachfolgend wird exemplarisch und stellvertretend für alle weiteren lokalen Nachweise gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen innerhalb dieser Sensitivitätsbetrachtung eine Nachweisführung ausführlich behandelt. Die übrigen Nachweise entsprechen dieser Vorgehensweise.

1.2 Bestimmung der Tiefenlage der kritischen Fuge

Der Scherwiderstand des Bodens erreicht infolge des Porenwasserüberdruckes in der kritischen Tiefe d_{krit} seinen kleinsten Wert, sodass es an einer Böschung zum Abgleiten eines darüber befindlichen Bodenschicht kommen kann. Die Tiefe der kritischen Bruchfuge wird zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts benötigt.

Absinkzeit Schiffs- und Windwelle: $t_A := 150$ [sec]

Gemäß EAU 2004 E115-5 /S.76 ergibt sich der folgende Porenwasserdruckparameter b bei einer angenommenen Durchlässigkeit des Sandes unterhalb der Deckwerkes von $k=2,0 \cdot 10^{-4}$ [m/s]:

Porenwasserdruckparameter: $b := 0.8$ [1/m]

max. Wasserspiegelabsenk: $z_a := 1.6$ [m]

Böschungsneigung: $n := 3.0$

Böschungswinkel: $\alpha := \text{atan}\left(\frac{1}{n}\right)$ $\alpha = 18.435$ Grad [°]

Wichte des Bodens unter Auftrieb: $\gamma' := 10$ [kN/m³]

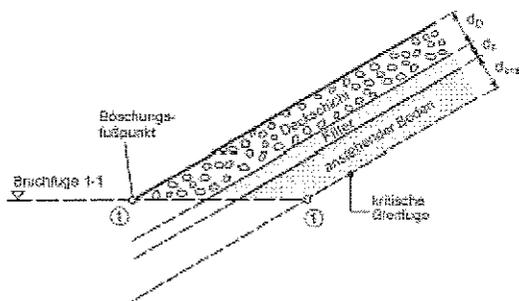
Wichte des Wassers: $\gamma_w := 10$ [kN/m³]

Reibungswinkel Untergund/Boden: $\varphi' := 32.5$ Grad [°]

Prüfung := $\begin{cases} \text{"gültig"} & \text{if } \varphi' > \alpha \\ \text{"ungültig"} & \text{otherwise} \end{cases}$ Prüfung = "gültig"

kritische Bruchfuge:
$$d_{krit} := \frac{1}{b} \cdot \ln \left[\frac{\tan(\varphi') \cdot \gamma_w \cdot z_a \cdot b}{\cos(\alpha) \cdot \gamma' \cdot (\tan(\varphi') - \tan(\alpha))} \right]$$

$d_{krit} = 1.3$ [m]



Prinzipische Skizze zur kritischen Gleitfuge

1.3 Nachweis Abgleiten des Deckwerks (ohne Fußstützung) Bereich ggf. mit Teilverguss

effektive dauerhafte Kohäsion des Bodens:	$c' := 0$	[kN/m ²]
Dicke der Deckschicht:	$d_D := 0.7$	[m]
Dicke des Filters:	$d_F := 0.30$	[m]
Dichte Wasser:	$\rho_W := 1.000$	[t/m ³]
Steindichte (Trockenrohddichte):	$\rho_S := 2.7$	[t/m ³]
	für Wasserbausteine	> 2.40 t/m ³
	für Granitgesteine bis	3.05 t/m ³
	für Metallhüttenschlacke	3.50 t/m ³
	für Affmaterial	~ 3.70 t/m ³
Schüttdichte:	$\rho_{Sch} := 1.62$	[t/m ³]
Wichte des Schüttmaterials	$\gamma_S := \rho_S \cdot 9.81$	$\gamma_S = 26.487$ [kN/m ³]
Porenanteil des Deckwerks:	$n_0 := 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_S}$	[1]
ca. 50 - 55 % bei Verklappung unter Wasser		
ca. 45 % bei Schüttung im Trockenen	$n_0 = 0.4$	
ca. 30 - 40 % bei Nacharbeiten von Hand		
Vergussmenge :	$m_V := 0$	[liter/m ²]
Wichte des Vergussstoffes:	$\gamma_V := 0$	[kN/m ³]
Der Porenwasserüberdruck Δu als Folge eines schnellen Wasserspiegelabsinks läßt sich in Abhängigkeit von der Tiefe z unter der Böschung bzw Gewässersohle als Eingangsgröße für die geotechnische Bemessung eines durchlässigen Deckwerks wie folgt bestimmen:		
Porenwasserüberdruck in der Tiefe $z=d_{krit}$:	$z := d_{krit}$	
	$a := 1$	[1]
	$\Delta u := \gamma_W \cdot z_a \cdot [1 - a \cdot \exp[-(b \cdot z)]]$	
	$\Delta u = 10.35$	[kN/m ²]
Schüttdichte (Trockendichte):	$\rho_D := (1 - n_0) \cdot \rho_S$	$\rho_D = 1.62$ [t/m ³]
gesättigte Dichte:	$\rho_r := \rho_D + n_0 \cdot \rho_W$	$\rho_r = 2.02$ [t/m ³]
Dichte der Deckschicht unter Auftrieb:	$\rho' := \rho_r - \rho_W$	$\rho' = 1.02$ [t/m ³]
Wichte der Deckschicht unter Auftrieb:	$\gamma'_D := \rho' \cdot 9.81$	$\gamma'_D = 10.01$ [kN/m ³]
Flächengewicht des teilvergossenen Deckwerks unter Auftrieb:	$g' := \gamma'_D \cdot d_D + \frac{m_V}{1000} \cdot (\gamma_V - \gamma_W)$	
	$g = 7.00$	[kN/m ²]

Steindichte Filter (Trockendichte):	$\rho_{sF} := 2.65 [t/m^3]$	
	für Wasserbausteine	> 2.40 t/m ³
	für Granitgesteine bis	3.05 t/m ³
	für Metallhüttenschlacke	3.50 t/m ³
	für Affimaterial	~ 3.70 t/m ³
Schüttdichte:	$\rho_{Sch.F} := 1.70 [t/m^3]$	
Wichte des Schüttmaterials	$\gamma_s := \rho_s \cdot 9.81$	$\gamma_s = 26.487 [kN/m^3]$
Porenanteil des Filtermaterials: ca. 40 - 45 %	$n_{0F} := 1 - \frac{\rho_{Sch.F}}{\rho_{sF}} [1]$	
	$n_{0F} = 0.358$	
Schüttdichte Filtermaterial (Trockendichte):	$\rho_{dF} := (1 - n_{0F}) \cdot \rho_{sF}$	$\rho_{dF} = 1.7 [t/m^3]$
gesättigte Dichte :	$\rho_{rF} := \rho_{dF} + n_{0F} \cdot \rho_w$	$\rho_{rF} = 2.058 [t/m^3]$
Dichte des Filters unter Auftrieb:	$\rho'_F := \rho_{rF} - \rho_w$	$\rho'_F = 1.058 [t/m^3]$
Wichte des Filters unter Auftrieb:	$\gamma'_F := \rho'_F \cdot 9.81$	$\gamma'_F = 10.38 [kN/m^3]$

1.3 Nachweis gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen

Bei sehr flacher Böschungsneigung oder bei großer Fußstützkraft oder bei einer Deckwerksaufhängung kann das gegen Abgleiten erforderliche Flächengewicht des Deckwerks so gering werden, dass infolge des Porenwasserüberdruckes eine Hebung der Bodenoberfläche und damit eine Auflockerung des Untergrundes eintreten kann.

bei kohäsionslosen Böden ($c'=0$) können dadurch hydrodynamische Bodenverlagerungen möglich werden. In einem solchen Fall ist das Flächengewicht so hoch anzusetzen, dass der Porenwasserüberdruck in der kritischen Tiefe durch eine entsprechen hohe Auflast überdrückt wird.

Für kohäsionslose Böden gilt im Regelfall $b \leq 8$. Bei $b > 8$ sind die Böden im Allgemeinen kohäsiv. Bei kohäsiven Böden ($c' > 0$) treten Bodenverlagerungen nicht auf, und dieser Nachweis ist deshalb nicht erforderlich.

Prüfung_Boden := $\begin{cases} \text{"kohäsionsloser Boden. Nachweis gegen Bodenverlagerung erforderlich"} & \text{if } b \leq 8 \\ \text{"kohäsiver Boden. Nachweis gegen Bodenverlagerung nicht erforderlich"} & \text{otherw} \end{cases}$

Prüfung_Boden = "kohäsionsloser Boden. Nachweis gegen Bodenverlagerung erforderlich"

kritische Tiefe der Bruchfuge für hydrodynamische Bodenverlagerungen:

$$d_{\text{krit.hB}} := \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{\gamma_w \cdot z_a \cdot b}{\gamma' \cdot \cos(\alpha)} \right) \quad d_{\text{krit.hB}} = 0.374 \quad [\text{m}]$$

Der Porenwasserüberdruck Δu als Folge eines schnellen Wasserspiegelabsinks lässt sich in Abhängigkeit von der Tiefe z unter der Böschung bzw Gewässersohle als Eingangsgröße für die geotechnische Bemessung eines durchlässigen Deckwerks wie folgt bestimmen:

Porenwasserüberdruck in der Tiefe $z=d_{\text{krit}}$:

$$z_{\text{hB}} := d_{\text{krit}}$$

$$a := 1 \quad [1]$$

$$\Delta u_{\text{hB}} := \gamma_w \cdot z_a \cdot [1 - a \cdot \exp[-(b \cdot z_{\text{hB}})]]$$

$$\Delta u_{\text{hB}} = 10.35 \quad [\text{kN/m}^2]$$

erf. Flächengewicht des durchlässigen Deckwerks g' unter Auftrieb gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen ergibt sich zu:

$$g' = 7.004 \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$g'_{\text{erf.hB}} := \frac{\Delta u_{\text{hB}}}{\cos(\alpha)} - (\gamma'_F \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{\text{krit.hB}}) \quad g'_{\text{erf.hB}} = 4.05 \quad [\text{kN/m}^2]$$

Nachweis_2 := $\begin{cases} \text{"Nachweis gegen Bodenverlagerung erbracht."} & \text{if } g' \geq g'_{\text{erf.hB}} \\ \text{"Nachweis gegen Bodenverlagerung nicht erbracht"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Nachweis_2 = "Nachweis gegen Bodenverlagerung erbracht."

$$d_{\text{Derf}} := \frac{\left[\frac{\Delta u_{\text{hB}}}{\cos(\alpha)} - (\gamma'_F \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{\text{krit.hB}}) \right]}{\gamma'_D} \quad d_{\text{Derf}} = 0.404$$

Sicherheitsniveau gegen hydrodynamische Bodenverlagerung:

$$\eta := \frac{d_D}{d_{\text{Derf}}} \quad \eta = 1.73$$