

1. Erläuterungen zur Nachweisführung für eine lokalen erdstatische Gleitnachweise des Deckwerkes

1.1 Allgemeines

Kritisch für das Versagen von Bruch-/Naturstein-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 böschungsparellen 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 Gleiten des Deckwerkes 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 einer darüber befindlichen Bodenschicht kommen kann. Die Tiefe der kritischen Bruchfuge wird zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts benötigt.

Absenkzeit 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]

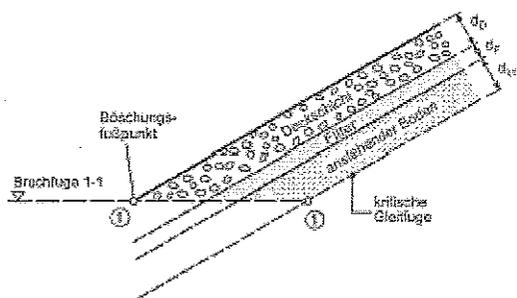
Reibungswinkel Untergund/Boden: $\varphi' := 32.5$ Grad [°]

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

Bemerkung := $\begin{cases} \text{"lokale Standsicherheit ohne Deckwerksgewicht gesichert"} & \text{if } d_{krit} < 0 \\ \text{"O.K."} \end{cases}$

Bemerkung = "O.K."

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 (Trockenrohdichte):	$\rho_S := 2.7$	[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]
	$\Delta u := \gamma_W \cdot z_a \cdot [1 - a \cdot \exp[-(b \cdot z)]]$	
	$\Delta u = 10.346$	[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):

$$\rho_{sF} := 2.65 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

für Wasserbausteine > 2.40 t/m³
 für Granitgesteine bis 3.05 t/m³
 für Metallhüttenschlacke 3.50 t/m³
 für Affmaterial ~ 3.70 t/m³

Schüttdichte:

$$\rho_{Sch.F} := 1.70 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

Wichte des Schüttmaterials

$$\gamma_s := \rho_s \cdot 9.81 \quad \gamma_s = 26.487 \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

Porenanteil des Filtermaterials:
 ca. 40 - 45 %

$$n_{0F} := 1 - \frac{\rho_{Sch.F}}{\rho_{sF}} \quad [1]$$

$$n_{0F} = 0.358$$

Schüttdichte Filtermaterial (Trockendichte):

$$\rho_{dF} := (1 - n_{0F}) \cdot \rho_{sF} \quad \rho_{dF} = 1.7 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

gesättigte Dichte :

$$\rho_{rF} := \rho_{dF} + n_{0F} \cdot \rho_w \quad \rho_{rF} = 2.058 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

Dichte des Filters unter Auftrieb:

$$\rho'_{rF} := \rho_{rF} - \rho_w \quad \rho'_{rF} = 1.058 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

Wichte des Filters unter Auftrieb:

$$\gamma'_{rF} := \rho'_{rF} \cdot 9.81 \quad \gamma'_{rF} = 10.38 \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

Bemerkung_2 := $\left\{ \begin{array}{l} \text{"Sicherheit ausreichend groß, wenn c' dauerhaft vorhanden ist!" if } c' \geq \Delta u \cdot \tan(\alpha) \\ \text{" " otherwise} \end{array} \right.$

Bemerkung_2 = ""

Erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' [kN/m²] gegen Abgleiten:

$$g'_{\text{erf.}} := \frac{\Delta u \cdot \tan(\varphi') - c'}{\cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi') - \sin(\alpha)} - (\gamma'_{rF} \cdot d_F + \gamma'_{\text{krit}} \cdot d_{\text{krit}}) \quad g'_{\text{erf.}} = 6.76 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$



Prüfung := $\left\{ \begin{array}{l} \text{"gültig" if } \varphi' > \alpha \\ \text{"ungültig" otherwise} \end{array} \right.$ Prüfung = "gültig"

Nachweis_Abgleiten := $\left\{ \begin{array}{l} \text{"Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung erbracht." if } g' \geq g'_{\text{erf.}} \\ \text{"Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung nicht erbracht." otherwise} \end{array} \right.$



Nachweis_Abgleiten = "Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung erbracht."

erforderliche äquivalente Schubspannung $\tau_{\text{erf.}}$

$$\tau_{\text{erf.}} := (d_D \cdot \gamma'_D + d_F \cdot \gamma'_{rF} + d_{\text{krit}} \cdot \gamma') \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi')) + (\Delta u \cdot \tan(\varphi') - c')$$

$$\tau_{\text{erf.}} = -0.072 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Sicherheitsniveau gegen Gleiten:

$$\eta := \frac{g'}{g'_{\text{erf.}}} \quad \eta = 1.04$$

Hinweis: Bei geschichteten Baugrund ist das Flächengewicht des Deckwerks für die Schicht zu bemessen, für die das größte Flächengewicht erforderlich ist.

2 Abgleiten des Deckwerks mit Fußstützung

Bei entsprechender Ausbildung des Deckwerkes am Böschungsfuß (z.B. Fußvorlage, Fußeinbindung oder Fußspundwand) kann bei der Ermittlung des Flächengewichts der Deckschicht eine Fußstützkraft berücksichtigt werden, deren Größe aus der Scherfestigkeit des Deckwerkes (Bruchmechanismus 1) oder aus der Standsicherheit des Deckwerkfußes (Bruchmechanismus 2) resultiert. Bei dem Ansatz zur Ermittlung der mobilisierbaren Fußstützkraft wurden auf der sicheren Seite liegende Vereinfachungen der Bruchgeometrie und der Scherwiderstände zu Grunde gelegt. Die Fußstützkraft wird als äquivalente Schubspannung in der Gleitfläche eingeführt. Grundsätzlich sind zwei Bruchmechanismen des gestützten Deckwerkes an einer Böschung möglich:

Bruchmechanismus 1: Abscheren des Deckwerkes in einer horizontalen Fuge durch den Böschungsfußpunkt

Bruchmechanismus 2: Versagen des Deckwerkfußes

Der Bruchmechanismus, der das größte Deckschichtgewicht ergibt, ist maßgebend.

2.1 Bruchmechanismus 1

Im Bruchmechanismus 1 läuft die Gleitfläche in Höhe der Oberkante des Deckwerkfußes (Böschungsfußpunkt) waagrecht durch das Deckwerk. Er ist von der Art der Fußausbildung unabhängig.

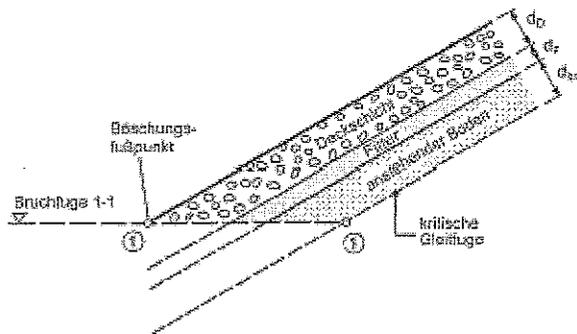


Bild: Bruchmechanismus 1

Die aus einer Fußstützkraft resultierende äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ unter der Böschungssicherung kann nicht größer werden, als für das Gleichgewicht in Böschungsfallrichtung erforderlich ist.

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht bzw. der erforderlichen Deckschichtdicke d_D ergibt sich für den Bruchmechanismus 1 zu:

Reibungswinkel Deckschichtmaterial: $\phi'_D := 55 \text{ Grad } [^\circ]$
 bei nicht vergossenen Deckschichten gilt $\phi'_D = 55^\circ$
 bei Teilverguss gemäß BAW Nr.87 S.111 $\phi'_D = 70^\circ$

$$C := \tan(\phi'_D) \cdot \cos(\alpha)$$

Wassertiefe gemäß Ausschreibung: $h_W := 3.0$

$$h_W = 3 \quad [\text{m}]$$

$$D := (\cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cdot \tan(\varphi'_D)) \cdot (h_W - z_a)$$

$$E := \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi')$$

$$F := \Delta u \cdot \tan(\varphi') - c'$$

$$G := 0.5 \cdot d_F^2 \cdot \gamma'_F$$

$$A := \frac{(C \cdot \gamma'_D \cdot d_F - D \cdot E \cdot \gamma'_D)}{C \cdot \gamma'_D}$$

$$B := D \cdot E \cdot (d_F \cdot \gamma'_F + d_{krit} \cdot \gamma') + D \cdot F - G$$

erforderliche Dicke der teilvergossenen Deckwerksschicht d_D :

$$d_{D,erf.} := \sqrt{A^2 + \frac{B}{0.5 \cdot C \cdot \gamma'_D}} - A \quad d_{D,erf.} = 0.128 \quad [m]$$

Nachweis_Bruchmechanismus_1 := $\begin{cases} \text{"Nachweis Bruchmechanismus 1 erbracht"} & \text{if } (d_D \geq d_{D,erf.}) \\ \text{"Nachweis für Bruchmechanismus 1 nicht erbracht"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Nachweis_Bruchmechanismus_1 = "Nachweis Bruchmechanismus 1 erbracht"

Die aus der Scherung durch das Deckwerk maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ in Böschungfallrichtung ergibt sich zu:

$$\tau_{\max.F1} := \frac{\left[\frac{1}{2} \cdot d_F^2 \cdot \gamma'_F + \left(d_D \cdot d_F + \frac{1}{2} \cdot d_D^2 \right) \cdot \gamma'_D \right] \cdot \tan(\varphi'_D) \cdot \cos(\alpha)}{(\cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cdot \tan(\varphi'_D)) \cdot (h_W - z_a)}$$

$$\tau_{\max.F1} = 9.77 \quad [kN/m^2]$$

Erforderliches Flächengewicht der vergossenen Deckschicht g' [kN/m²] gegen Abgleiten:

$$g'_{erf.} := \frac{\Delta u \cdot \tan(\varphi') - c' - \tau_{\max.F1}}{\cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi') - \sin(\alpha)} - (\gamma'_F \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{krit}) \quad g'_{erf.} = -27.16 \quad [kN/m^2]$$

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

Nachweis_Abgleiten := $\begin{cases} \text{"Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung erbracht."} & \text{if } g' \geq g'_{erf.} \\ \text{"Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung nicht erbracht."} & \text{otherwise} \end{cases}$

Nachweis_Abgleiten = "Nachweis gegen Abgleiten ohne Fußstützung erbracht."

erforderliche äquivalente Schubspannung $\tau_{erf.}$

$$\tau_{erf.} := (d_D \cdot \gamma'_D + d_F \cdot \gamma'_F + d_{krit} \cdot \gamma') \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi')) + (\Delta u \cdot \tan(\varphi') - c')$$

$$\tau_{erf.} = -0.072 \quad [N/m^2]$$

Hinweis: Bei geschichteten Baugrund ist das Flächengewicht des Deckwerks für die Schicht zu bemessen, für die das größte Flächengewicht erforderlich ist.

2.2 Nachweis Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage

Im Fall einer Fußvorlage verläuft im Bruchmechanismus 2 die kritische Gleitfläche unmittelbar unterhalb der Filterschicht entlang der Grenze zwischen Untergrund und Fußvorlage und keilt unter dem passiven Erddruckkörper vor der Fußvorlage in Höhe der Gewässersohle aus.

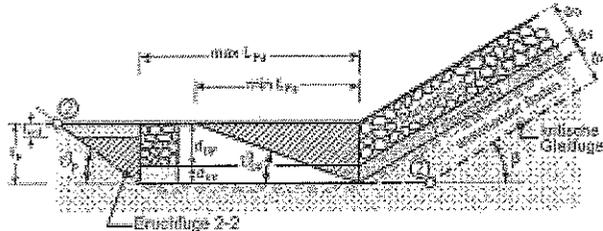


Bild Bruchmechanismus 2

Der durch den Absenk z_a erzeugte Porenwasserdruck in der Gewässersohle bewirkt eine aufwärts gerichtete instationäre Porenwasserströmung, die zur vorübergehenden Destabilisierung des Bodens an der Gewässersohle führt. Sie bewirkt unmittelbar nach Erreichen des maximal einwirkenden Absunks den Verlust der effektiven Spannung des Bodens an der Gewässersohle oberhalb der kritischen Tiefe t_{krit} wodurch die stützende Wirkung des vor der Fußvorlage mobilisierbaren passiven Erddrucks reduziert wird.

Die Differenz zwischen der Vertikalspannung aus dem potentiell aufschwimmenden Bodenkörper G' und dem zeitlich veränderlichen Porenwasserüberdrucke $\Delta u(z)$ an der Gewässersohle ergibt ein Minimum in der kritischen Tiefe t_{krit} . Die überschüssige Energie aus der instationären Porenwasserströmung wird durch die einsetzende vertikale Bodenbewegung dissipiert.

Diese kritische Tiefe t_{krit} an der Sohle berechnet sich zu:

Steindichte (Trockenrohdichte):	$\rho_s := 2.7 \quad [t/m^3]$	
	für Wasserbausteine	> 2.40 t/m³
	für Granitgesteine bis	3.05 t/m ³
	für Metallhüttenschlacke	3.50 t/m ³
	für Affimaterial	~ 3.70 t/m ³
Wichte des Schüttmaterials	$\gamma_s := \rho_s \cdot 9.81$	$\gamma_s = 26.487 \quad [kN/m^3]$
Schüttdichte:	$\rho_{Sch} := 1.70 \quad [t/m^3]$	
	$n_0 := 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_s}$	$n_0 = 0.37 \quad [1]$
Trockendichte:	$\rho_d := (1 - n_0) \cdot \rho_s$	$\rho_d = 1.7 \quad [t/m^3]$
gesättigte Dichte:	$\rho_r := \rho_d + n_0 \cdot \rho_w$	$\rho_r = 2.07 \quad [t/m^3]$
Dichte der Deckschicht unter Auftrieb:	$\rho' := \rho_r - \rho_w$	$\rho' = 1.07 \quad [t/m^3]$
Wichte der Deckschicht unter Auftrieb:	$\gamma'_D := \rho' \cdot 9.81$	$\gamma'_D = 10.5 \quad [kN/m^3]$
Wichte des Filters unter Auftrieb:	$\gamma'_F = 10.384$	$[kN/m^2]$

$$t_{\text{krit}} := \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{b \cdot \gamma_W \cdot z_a}{\gamma'} \right)$$

$$t_{\text{krit}} = 0.309 \quad [\text{m}]$$

Länge der Fußvorlage:

$$L_{\text{Fu}} := 10.0 \quad [\text{m}] \quad \text{iterativ lösen}$$

Wichte der Deckschicht
in der Fußvorlage unter Auftrieb:

$$\gamma'_{\text{DF}} := \gamma'_D \quad [\text{kN/m}^3]$$

Wichte des Filters
in der Fußvorlage unter Auftrieb:

$$\gamma'_{\text{FF}} := \gamma'_F \quad [\text{kN/m}^3]$$

Dicke der Deckschicht in der Fußvorlage:

$$d_{\text{DF}} := 0.5 \quad [\text{m}]$$

Dicke des Filters in der Fußvorlage:

$$d_{\text{FF}} := 0.25 \quad [\text{m}]$$

Dicke der gesamten Fußvorlage:

$$t_{\text{F}} := d_{\text{DF}} + d_{\text{FF}} \quad t_{\text{F}} = 0.75 \quad [\text{m}]$$

Gleitflächenwinkel des passiven
Erddruckes vor der Fußvorlage:

$$\vartheta_p := 45\text{Grad} - \frac{\varphi'}{2} \quad [^\circ]$$

Gleitflächenwinkel des passiven
Erddruckes innerhalb der Fußvorlage:
auf der Sicherer Seite liegend $\vartheta=35^\circ$

$$\vartheta_{\text{DF}} := 35\text{Grad} \quad [^\circ]$$

effektiver Reibungswinkel im Filter
in der Fußvorlage:

$$\varphi'_F := 35\text{Grad} \quad [^\circ]$$

effektiver Reibungswinkel in der
Deckschicht in der Fußvorlage:

$$\varphi'_{\text{DF}} := 35\text{Grad} \quad [^\circ]$$

Beim Nachweis der inneren maximal mobilisierbaren Schubspannung ist der Reibungswinkel auf 35° zu beschränken, weil beim Ansatz von größeren Reibungswinkeln unkorrekte Ergebnisse geliefert werden !

$$\text{Eingabe}_{\varphi'_{\text{DF}}} := \begin{cases} "35^\circ \text{ wählen}" & \text{if } ((\varphi'_{\text{DF}} > 35\text{Grad})) \\ "Eingabe O.K." & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Eingabe}_{\varphi'_{\text{DF}}} = "Eingabe O.K."$$

- (1) Für die gewählte Dicke t_{F} ist die Sicherheit gegen Verflüssigung des Bodens nachzuweisen, um eine ausreichende Mindestdicke der Fußvorlage zu gewährleisten. Unter Einbeziehung der kritischen Tiefe t_{krit} unter der Gewässersohle gilt es folgende Ungleichung zu erfüllen:

$$d_{\text{DF.Soll}} := \frac{\gamma_W \cdot z_a \cdot [1 - \exp[-(b \cdot t_{\text{krit}})]] - \gamma'_{\text{FF}} \cdot d_{\text{FF}} - \gamma' \cdot t_{\text{krit}}}{\gamma'_{\text{DF}}}$$

$$d_{\text{DF.Soll}} = -0.208 \quad [\text{m}]$$

$$d_{\text{DF.test}} := \begin{cases} "tf \text{ korrekt gewählt}" & \text{if } d_{\text{DF}} \geq d_{\text{DF.Soll}} \\ "tf \text{ neu wählen}" & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_{\text{DF.test}} = "tf \text{ korrekt gewählt}"$$

- (2) die festzulegende Länge L_{Fu} der Fußvorlage ist so zu bestimmen, dass sie die maximal zulässige Länge $\max L_{Fu}$ nicht überschreitet und die zum Nachweis der inneren Standfestigkeit erforderliche minimale Länge ($\min L_{Fu}$) gewährleistet.

$$\min L_{Fu} := \frac{t_F}{\tan(\vartheta_{DF})} \quad \min L_{Fu} = 1.071 \quad [m]$$

$$\max L_{Fu} := 4 \cdot t_F \quad \max L_{Fu} = 3 \quad [m]$$

$$L_{Fu.test} := \begin{cases} \text{"Länge Fußvorlage O.K."} & \text{if } \min L_{Fu} \leq L_{Fu} \leq \max L_{Fu} \\ \text{"Länge Fußvorlage neu wählen"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{Fu.test} = \text{"Länge Fußvorlage neu wählen"}$$

Hilfsfunktionen:

$$G' := \frac{(t_F - t_{krit})^2 \cdot \gamma'}{2 \cdot \tan(\vartheta_p)}$$

$$C' := \frac{c' \cdot (t_F - t_{krit})}{\sin(\vartheta_p)}$$

$$U_V := \frac{\gamma_w \cdot z_a}{\tan(\vartheta_p)} \left[\frac{\exp[-(b \cdot t_F)] - \exp[-(b \cdot t_{krit})]}{b} + \exp[-(b \cdot t_{krit})] \cdot (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$U_V := \begin{cases} \frac{\gamma_w \cdot z_a}{\tan(\vartheta_p)} \left[\frac{\exp[-(b \cdot t_F)] - \exp[-(b \cdot t_{krit})]}{b} + \exp[-(b \cdot t_{krit})] \cdot (t_F - t_{krit}) \right] & \text{if } U_V \geq 0 \\ 0 & \text{if } U_V < 0 \end{cases}$$

Passive Erddruck vor der Fußvorlage:

$$E'_{ph} := (G' - U_V + C' \cdot \sin(\vartheta_p)) \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C' \cdot \cos(\vartheta_p) \quad E'_{ph} = 0.35 \quad [kN/m]$$

Kolkbildung vor der Fußvorlage möglich?: Kolk := 1

ja := 1 nein := 0

$$\text{Antwort} := \begin{cases} \text{"Eingabe O.K."} & \text{if } \text{Kolk} = 1 \\ \text{"Eingabe O.K."} & \text{if } \text{Kolk} = 0 \\ \text{"ungültige Eingabe für "Kolk""} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Antwort = "Eingabe O.K."

$$E'_{ph} := \begin{cases} (G' - U_V + C' \cdot \sin(\vartheta_p)) \cdot \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C' \cdot \cos(\vartheta_p) & \text{if } \text{Kolk} = 0 \\ 0 & \text{if } \text{Kolk} = 1 \\ \text{"ungültige Eingabe für "Kolk""} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E'_{ph} = 0 \quad [kN/m]$$

maximal erreichbare äquivalente Schubspannung für den Bruchmechanismus 2:

(innerhalb)

$$\tau_{F2.i.max} := \frac{\left[(d_{DF})^2 \cdot \gamma'_{DF} + d_{FF}^2 \cdot \gamma'_{FF} + 2 \cdot d_{DF} \cdot d_{FF} \cdot \gamma'_{DF} \right] \cdot \sin(\alpha)}{\left(\cos(\alpha) \cdot \cot(\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) - \sin(\alpha) \right) \cdot 2 \cdot \tan(\vartheta_{DF}) \cdot (h_w - z_a)}$$

$$\tau_{F2.i.max} = 32.737 \quad [\text{kN/m}^2]$$

(außerhalb)

$$\sigma'_V := \gamma'_{DF} \cdot d_{DF} + \gamma'_{FF} \cdot d_{FF}$$

Der Ansatz des Erdwiderstandes E'_{ph} bei der Fußstützkraft ist nur zulässig, wenn nicht von einem Koik vor der Fußvorlage auszugehen ist. Andernfalls ist $E'_{ph}=0!$

$$\tau_{F2.a.max} := \frac{\left[(\sigma'_V \cdot \tan(\varphi') + c') \cdot L_{Fu} + E'_{ph} \right] \cdot \sin(\alpha)}{\left(\cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cdot \tan(\varphi') \right) \cdot (h_w - z_a)}$$

$$\tau_{F2.a.max} = 15.11 \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$\text{maßg}\tau_{F2.max} := \begin{cases} \tau_{F2.i.max} & \text{if } [0 > (\tau_{F2.i.max} < \tau_{F2.a.max})] \\ \tau_{F2.a.max} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{maßg}\tau_{F2.max} = 15.11 \quad [\text{kN/m}^2]$$

Die von der Fußvorlage maximal übertragbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ ergibt sich durch die Vergleichsberechnung aus dem äußeren und inneren Nachweis. Die jeweils kleinere Schubspannung ist maßgebend und wird in der nachfolgenden Berechnung des erforderlichen Flächengewichts g' der Deckschicht auf der Böschung berücksichtigt.

Erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei einer Fußvorlage:

$$g'_{\text{erf}} := \frac{\text{maßg}\tau_{F2.max} - \Delta u \cdot \tan(\varphi'_{DF}) + c'}{\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \tan(\varphi'_{DF})} - (\gamma'_F \cdot d_F + d_{\text{krit}} \cdot \gamma')$$

$$g'_{\text{erf}} = -38.717 \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$g' := \gamma'_{DF} \cdot d_{DF}$$

$$g' = 7.004$$

Nachweis:

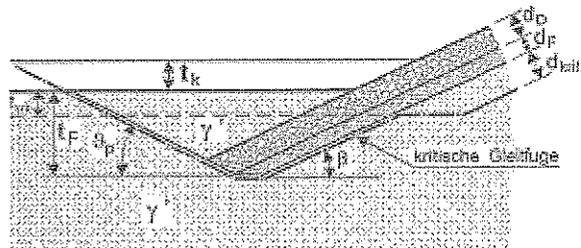
$$\text{Nachweis_Fußvorlage} := \begin{cases} \text{"Nachweis erbracht"} & \text{if } g' \geq g'_{\text{erf}} \\ \text{"Nachweis nicht erbracht"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Nachweis_Fußvorlage} = \text{"Nachweis erbracht"}$$

2.3 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung

Im Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung wird eine Bruchfläche gemäß der folgenden Abbildung untersucht. Der Porenwasserüberdruck wird auch auf das Deckwerk im Bereich der Fußeinbindung unterhalb der Gewässersohle angesetzt, da sich hier der Verfüllboden in den Porenraum setzen kann und sich somit im Deckwerk die Durchlässigkeit des Verfüllbodens einstellt.

Der schnelle Absenk erzeugt im Bereich der horizontalen Gewässersohle einen Porenwasserüberdruck im Boden und infolge dessen eine Porenwasserströmung. Oberflächennah bewirkt diese Porenwasserströmung einen Verlust der effektiven Spannungen bis in die kritische Tiefe t_{krit} . In der Tiefe t_{krit} ist die auftriebende Kraft aus der Differenz zwischen dem Porenwasserüberdruck und der Vertikalspannung aus Bodeneigengewicht maximal. Durch die Bodenbewegung dissipiert Energie aus der Porenwasserströmung. Die kritische tiefe t_{krit} an der Sohle berechnet sich analog zu:



BRUCHMECHANISMUS 2 MIT FUßEINBINDUNG

Kolkentiefe vor dem Deckwerksfuß: $t_k := 0.0$ [m]

Einbindung Deckwerk in den Untergrund: $t_F := 1.5$

Hilfsfunktionen :

$$\vartheta_p := \operatorname{atan} \left[\sqrt{\frac{[1 + (\tan(\varphi'))^2] \cdot \tan(\varphi')}{\tan(\varphi') + \tan(\alpha)}} - \tan(\varphi') \right] \quad \vartheta_p = 17.933 \text{ Grad}$$

$$A_1 := \sin(\vartheta_p) + \cos(\vartheta_p) \cdot \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$B_1 := \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$D_1 := \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \cot(\varphi' - \alpha)$$

$$U_{V1} := \frac{\gamma_w \cdot z_a}{\tan(\vartheta_p)} \cdot \left[\frac{\exp[-(b \cdot t_F)] - \exp[-(b \cdot t_{krit})]}{b} + \exp[-(b \cdot t_{krit})] \cdot (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$U_{V2} := \frac{\gamma_w \cdot z_a}{\tan(\alpha)} \cdot \left[\frac{\exp[-(b \cdot t_F)] - \exp[-(b \cdot t_{krit})]}{b} + \exp[-(b \cdot t_{krit})] \cdot (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$G'_1 := \frac{\gamma' \cdot (t_F - t_{krit})^2}{2 \cdot \tan(\vartheta_p)}$$

$$G'_2 := \frac{[\gamma' \cdot (t_F - t_{krit})^2]}{2 \cdot \tan(\alpha)}$$

$$C'_1 := \frac{c' \cdot (t_F - t_{krit})}{\sin(\vartheta_p)}$$

$$C'_2 := \frac{c' \cdot (t_F - t_{krit})}{\sin(\alpha)}$$

$$L_u := \frac{h_w - z_a + t_k + t_{krit}}{\sin(\alpha)} \quad L_u = 5.403 \quad [m]$$

$$F_{F2} := \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 \cdot A_1}{B_1} + \frac{U_{v2} - G'_2}{D_1} + C'_2 \quad F_{F2} = 13.492 \quad [kN/m]$$

Die max. Schubspannung für den Bruchmechanismus 2 mit Fußeinbindung errechnet sich aus der Gleichgewichtsbetrachtung gemäß des oben dargestellten Gleitkeiles.

$$\max \tau_{F,2} := \frac{F_{F2}}{L_u} \quad \max \tau_{F,2} = 2.497 \quad [kN/m^2]$$

Unter Berücksichtigung der max. erreichbaren äquivalenten Schubspannung ergibt sich das erforderliche Flächengewicht in diesem Fall wie folgt:

$$g'_{\text{erf.fußeinbindung}} := \frac{\Delta u \cdot \tan(\varphi') - c' - \max \tau_{F,2}}{\cos(\alpha) \tan(\varphi') - \sin(\alpha)} - (\gamma'_F \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{krit})$$

$$g'_{\text{erf.fußeinbindung}} = -1.91 \quad kN/m^2$$

$$\text{Nachweis_Fußeinbindung} := \begin{cases} \text{"Nachweis erbracht"} & \text{if } (g' \geq g'_{\text{erf.fußeinbindung}}) \\ \text{"Nachweis nicht erbracht"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Nachweis_Fußeinbindung} = \text{"Nachweis erbracht"}$$