

Gefahr der Sedimentmobilisierung bei Speicherabsenkungen bzw. Speicherentleerungen



Speicher Gepatsch 22.12.2015



Speicher Gepatsch 24.12.2015









TW-Einlauf Speicher Gepatsch am 24.12.2015



TW-Einlauf Mai 1977

Gefahr der Sedimentmobilisierung bei
Speicherabsenkungen bzw. -entleerungen

TIWAG-
Tiroler Wasserkraft AG
Eduard-Wallnöfer-Platz 2
6020 Innsbruck





Speicher Längental im November 2017

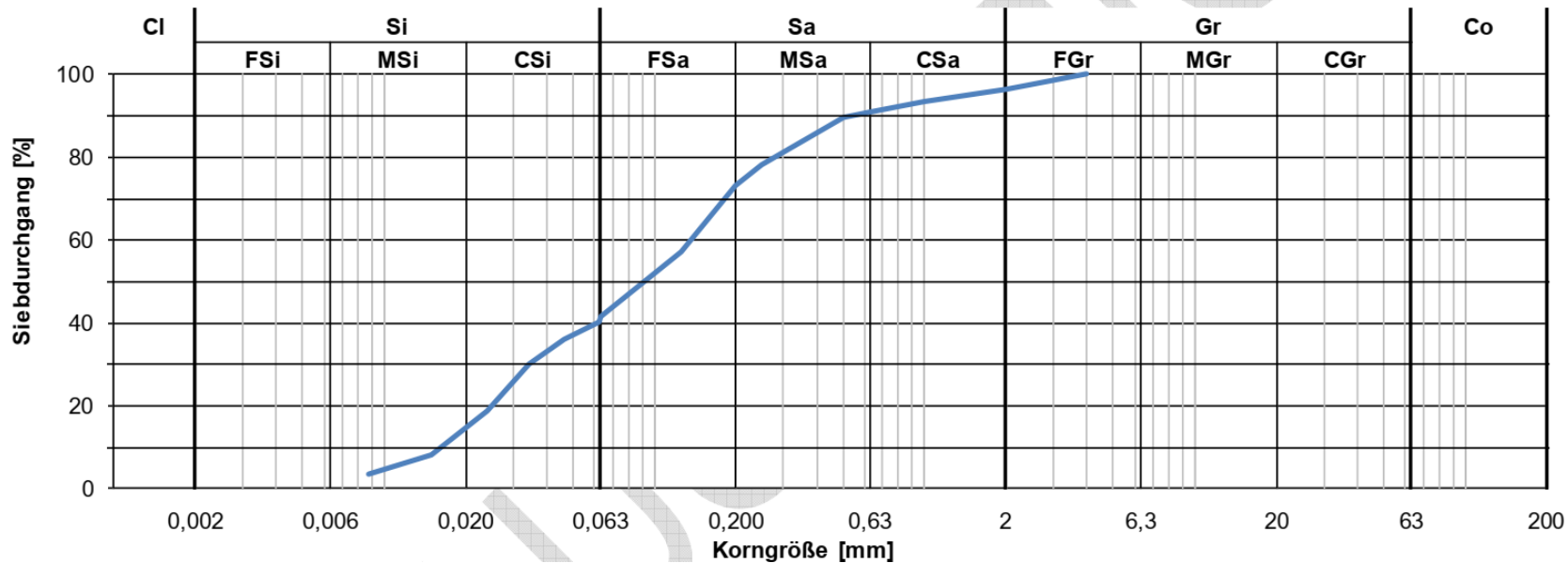
„Sedimentversuche“ Speicher Längental Mitte Oktober 2019

Links Fotos vom 14.10.2019 und rechts ein Foto
genau 3 Tage später vom 17.10.2019



Sedimentversuche Speicher Längental Mitte Oktober 2019

Korngrößenverteilung



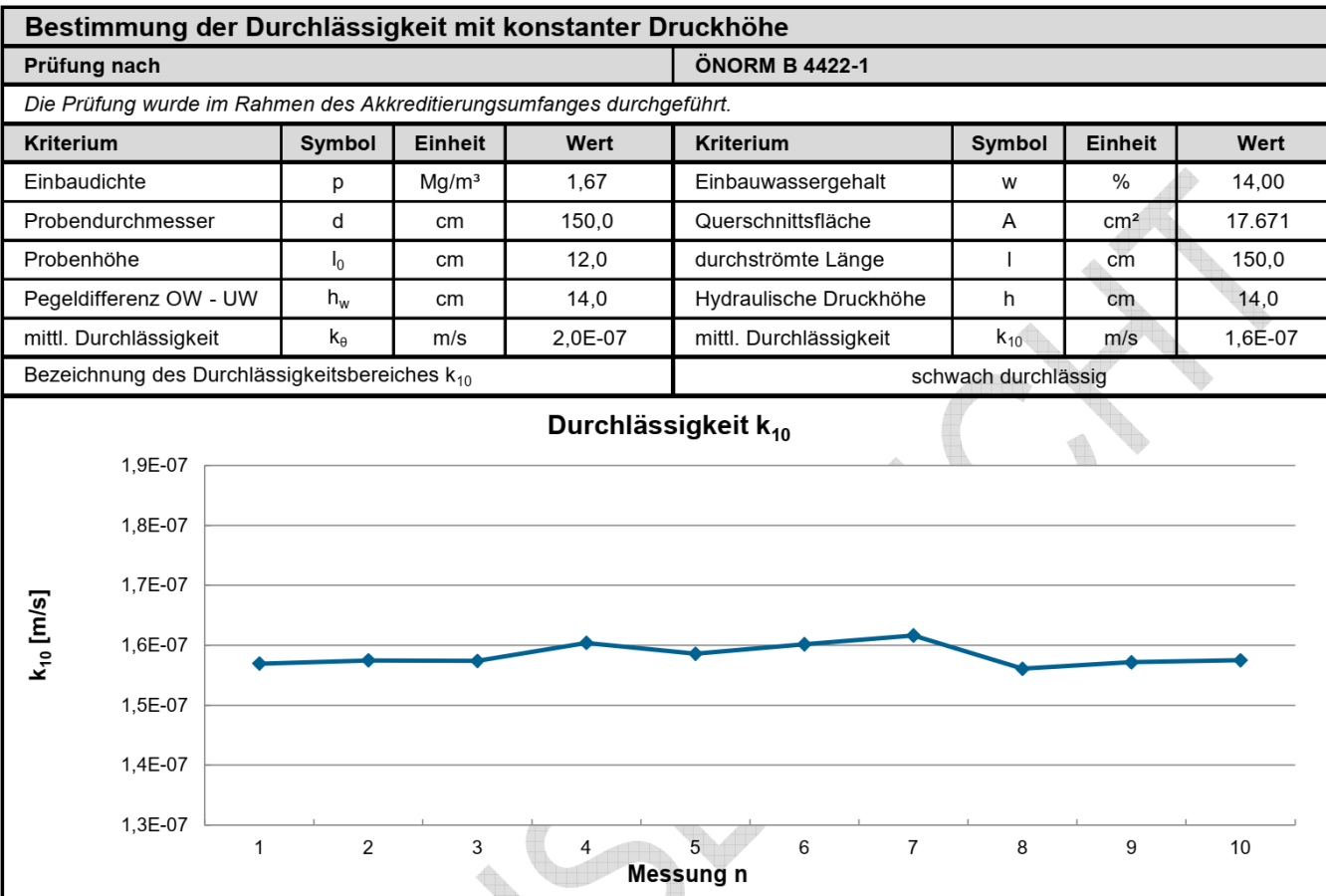
Eigenschaften	Prüfnorm	Symbol	Einheit	Ergebnis
Scheinbare Rohdichte	EN 1097-6	ρ_a	Mg/m ³	2,72
Rohdichte auf ofentrockener Basis		ρ_{rd}	Mg/m ³	2,69
Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächengetrockneter Basis		ρ_{ssd}	Mg/m ³	2,70
Wasseraufnahme		WA_{24}	%	0,3
Wassergehalt	EN 1097-5	w	%	28,1





Sedimentversuche Speicher Längental Mitte Oktober 2019

Durchlässigkeitsbeiwert k_f



Sedimententnahme aus Speicher Längental am 14.10.2019, 11:00 Uhr



Sedimententnahme aus Speicher Längental am 14.10.2019, 11:00 Uhr

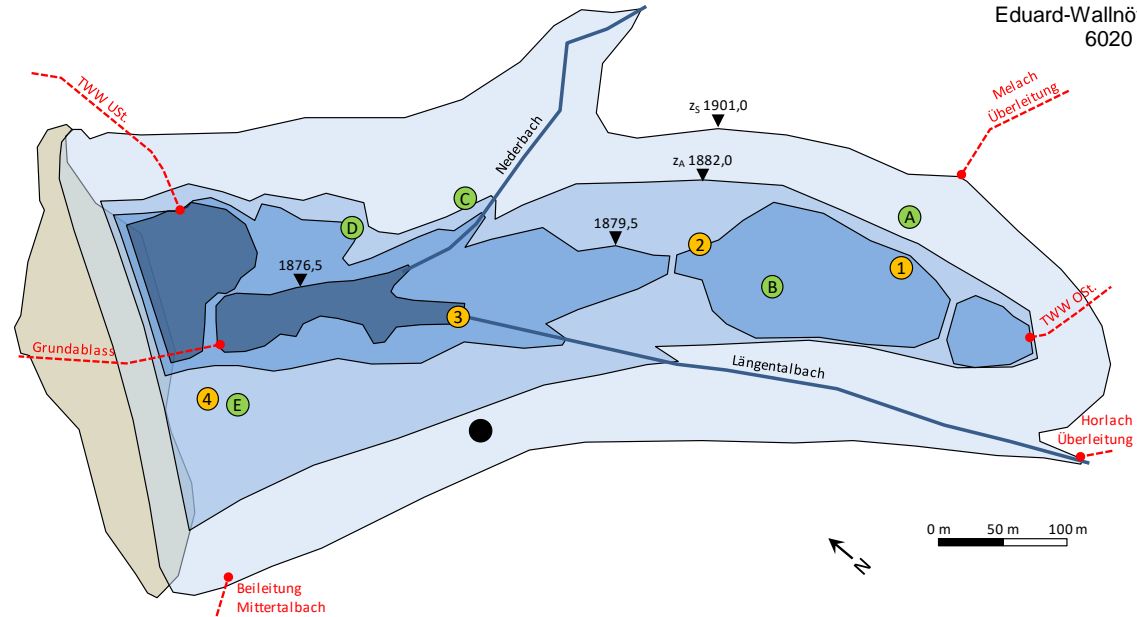


Sediment am 17.10.2019, 11:00 Uhr (also genau 3 Tage später)

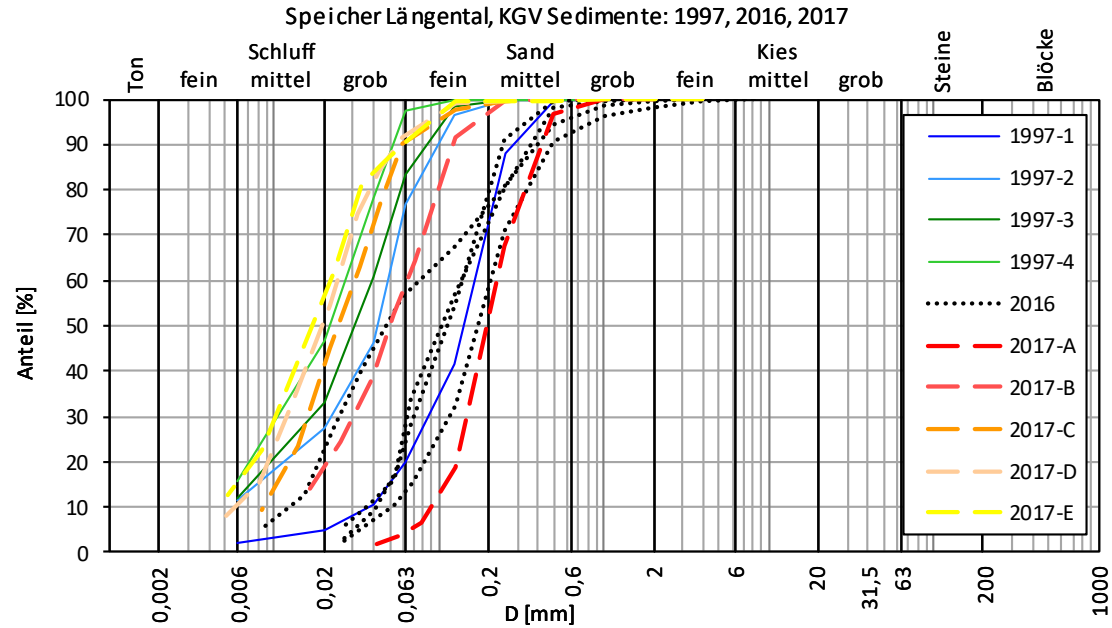


Sediment am 17.10.2019, 11:00 Uhr (also genau 3 Tage später)





Sedimentuntersuchungen Speicher Längental in den Jahren 1997, 2016 und 2017



Beschreibung des Konsolidierungsvorganges

Durch die zugeführten Zuflüsse werden in den Speichern Bodenfeststoffe in die Speicher transportiert.

Die größeren Bodenfeststoffe (Geschiebe) lagern sich bereits unmittelbar nach der Einleitung in den Speicher ab. Die feineren Bodenfeststoffe (Sedimente) setzen sich erst im Laufe der Zeit ab.

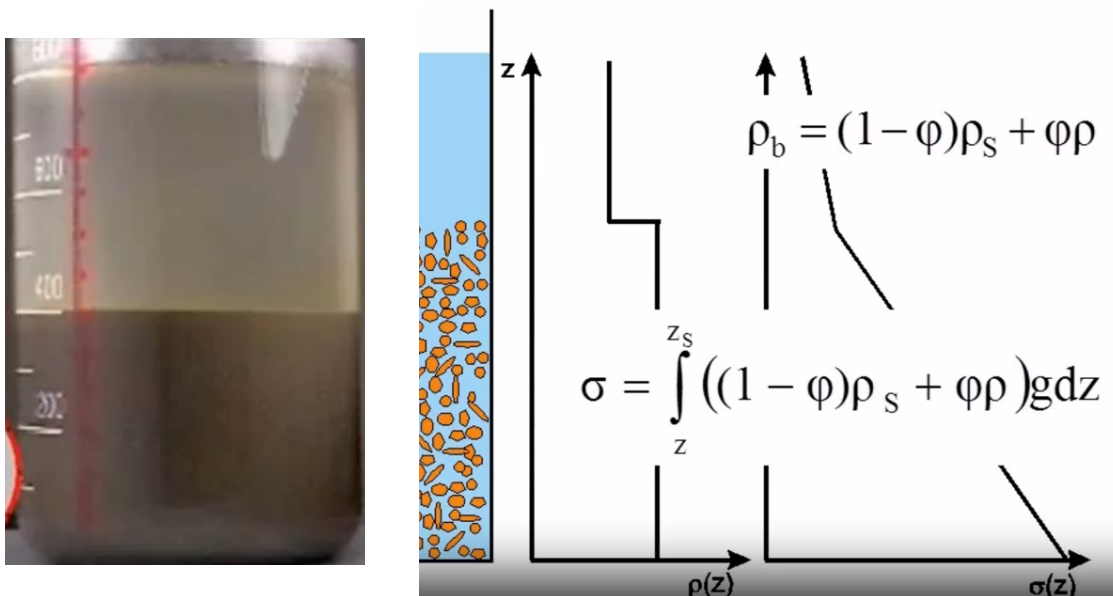
Je feiner die Sedimente sind, desto länger sind sie in Schwebelag. Demzufolge nimmt der Korndurchmesser der abgesetzten Sedimente ab, je näher sie am Absperrbauwerk liegen.

Im nachfolgenden Bild ist ein Gefäß in dem sich Sedimente bereits ziemlich abgesetzt haben. Rechts ist die Dichte aufgetragen. Oberhalb der Sedimentoberkante ist nur die Wasserdichte vorhanden, darunter setzt sich die Dichte ρ aus Wasser und Sediment zusammen.

Der Druck $\sigma(z)$ ergibt sich aus $\rho * g * z = [\text{kg}/\text{m}^3 * \text{m}/\text{s}^2 * \text{m} = \text{kg}/(\text{m} * \text{s}^2)]$ mit $1 \text{ N} = \text{kg} * \text{m}/\text{s}^2$ ergibt sich N/m^2 also eine Spannung.

Somit nimmt die Druckspannung mit der Tiefe zu. Diese Druckspannung setzt sich aus dem Korndruck und aus dem Wasserdruck zwischen den Körnern zusammen.

Als Konsolidierungsvorgang wird bezeichnet, wenn mit dem Absinken der Körner das Porenwasser herausgepresst wird, so dass der Korn-zu-Korn-Druck (effektive Spannung) zunimmt und der Wasserdruck (Porenwasserdruck) abnimmt. Die vollständige Konsolidierung ist erreicht, wenn sich die Körner und das Wasser (dann als hydrostatischer Druck) selbst tragen.



Somit kann die Lastverteilung im Sediment folgendermaßen geschrieben werden:

$$\int_z^{z_s} ((1 - \phi)\rho_s + \phi\rho)gdz = \sigma'_e + \rho g(z_s - z) + p_e$$

Tragfähigkeit
des
Korngerüsts
=effektive
Spannung

Hydro-
Statischer
Poren-
Wasser-
druck

Poren-
wasser-
überdruck

Je feiner die Sedimente sind, desto kleiner ist ihr Durchlässigkeitsbeiwert k und desto länger dauert der Konsolidierungsvorgang bzw. bis das Wasser

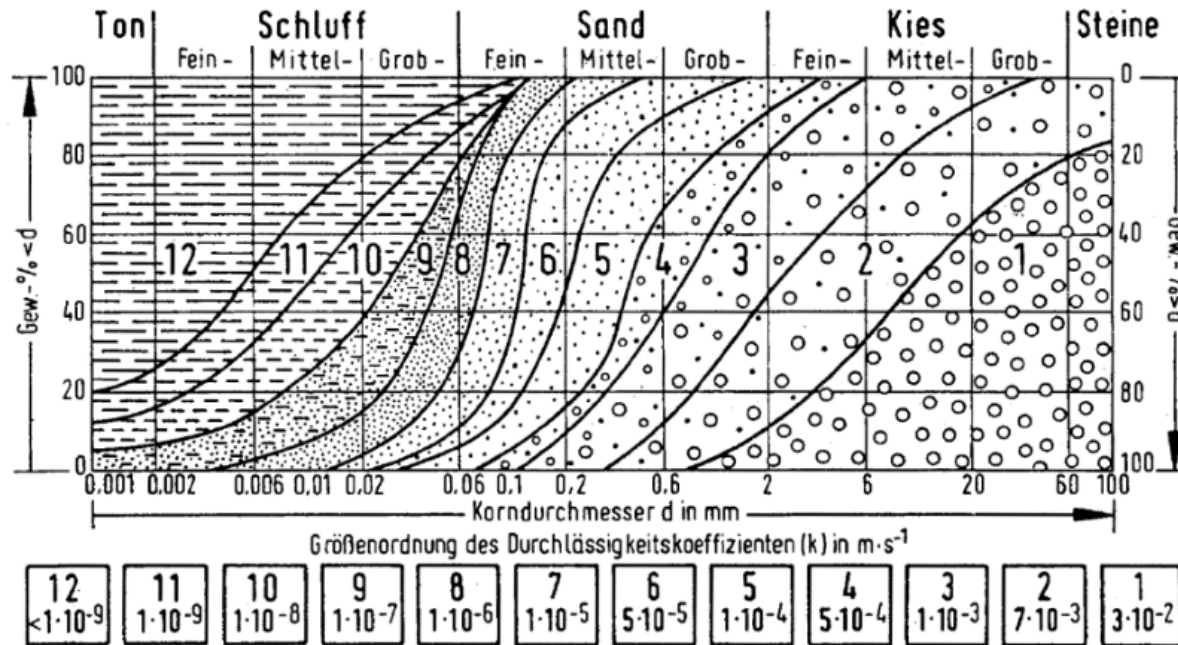


Abbildung 8: Erfahrungswerte für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Körnungslinie

Da in einem Speichersee mit seinen Wasserspiegelbewegungen sich ständig der Wasserdruck auf das Sediment ändert, werden sich die Sedimente dort immer wieder unterschiedlich konsolidieren. Insbesondere trifft dies beim sog. Ausgleichsbecken Lägental, deren Wasserspiegel wöchentlich relativ weit abgesenkt wird, zu.

Der Wasserdruck in diesen Poren wird in etwa dem mittleren Speicherstand entsprechen. D. h. aus Gleichgewichtsgründen wird der innere Wasserdruck in den Poren (Porenwasserdruck) ähnlich hoch sein, als der äußere Wasserdruck aus dem Speicherwasser.

Wenn der Speicher abgesenkt wird, wird der äußere Wasserdruck auf das Sediment reduziert. Bei einem durchlässigen Material wie Kies, wird sich der innere Porenwasserdruck schnell angleichen. Jedoch bei dem relativ undurchlässigen Sedimentmaterial kann es Wochen und Monate dauern, bis sich der innere Porenwasserdruck der äußeren Druckänderung angleicht – ein Ungleichgewicht ist vorhanden

Differenzialgleichung des Konsolidierungsvorganges einer horizontalen Tonschicht in vertikaler Richtung nach Terzaghi (1923)

$$\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} = \frac{\partial u}{\partial T_v}} \quad \text{mit:} \quad c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w} \quad T_v = \frac{c_v}{H^2} \cdot t \quad \zeta = \frac{z}{H} \quad \zeta \text{ (zeta) ist die dimensionslose Tiefe.}$$

Analytische Lösung:

$$\boxed{u(\zeta, T_v) = p \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4}{\pi(2m+1)} \cdot \sin\left(\frac{2m+1}{2}\pi\zeta\right) \cdot e^{-\left(\frac{2m+1}{2}\pi\right)^2 T_v}}$$

Numerische Lösung der Differenzialgleichung nach Terzaghi:

Die Differenzialgleichung kann durch den Differenzenquotienten ersetzt werden:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \Delta u / \Delta t = c_v / \Delta z^2 [u_{(z=i-1)} - 2u_{(z=i)} + u_{(z=i+1)}]$$

Die Größe Δu kann man Auffassen als die Differenz des Porenwasserüberdruckes in einem bestimmten Punkt und es ergibt sich der Porenwasserdruck mit der Differenzenmethode zu:

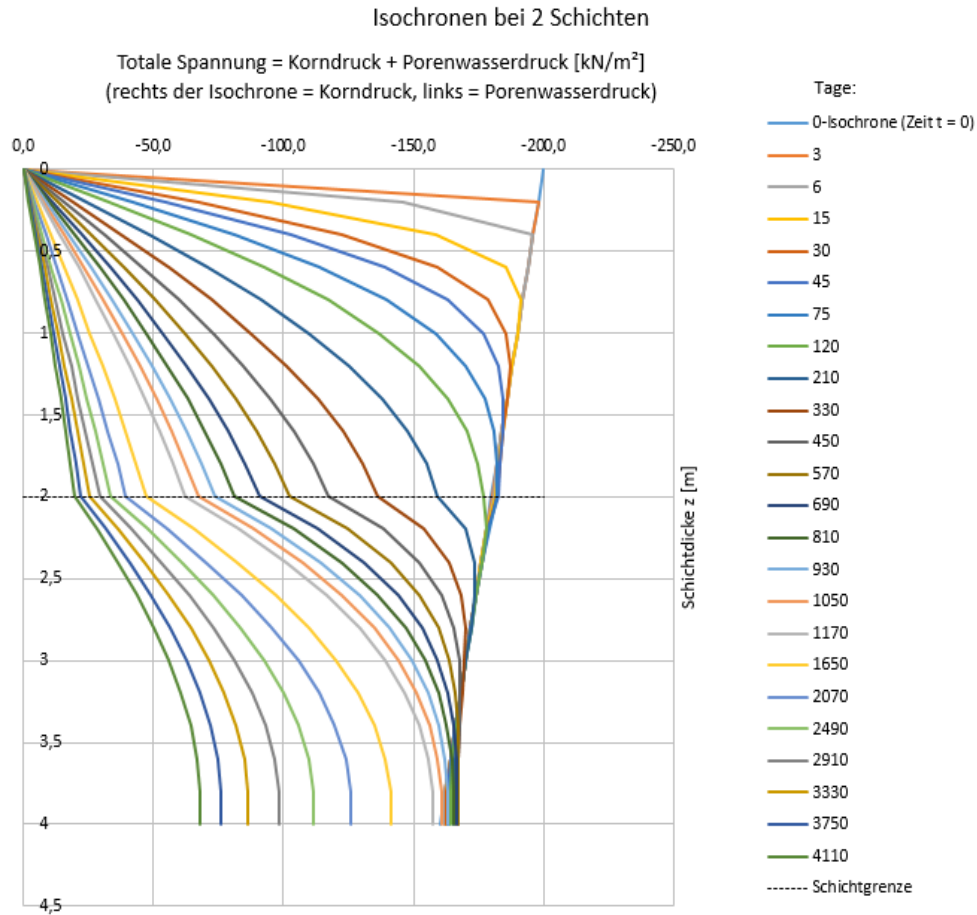
$$u_{(z=i),t+\Delta t} = M [u_{(z=i-1)} - 2u_{(z=i)} + u_{(z=i+1)}]_t + u_{(z=i),t}$$

Der Ausdruck $M = \Delta t c_v / \Delta z^2$ ist dimensionslos und für $M < 0,5$ konvergiert die obige Gleichung

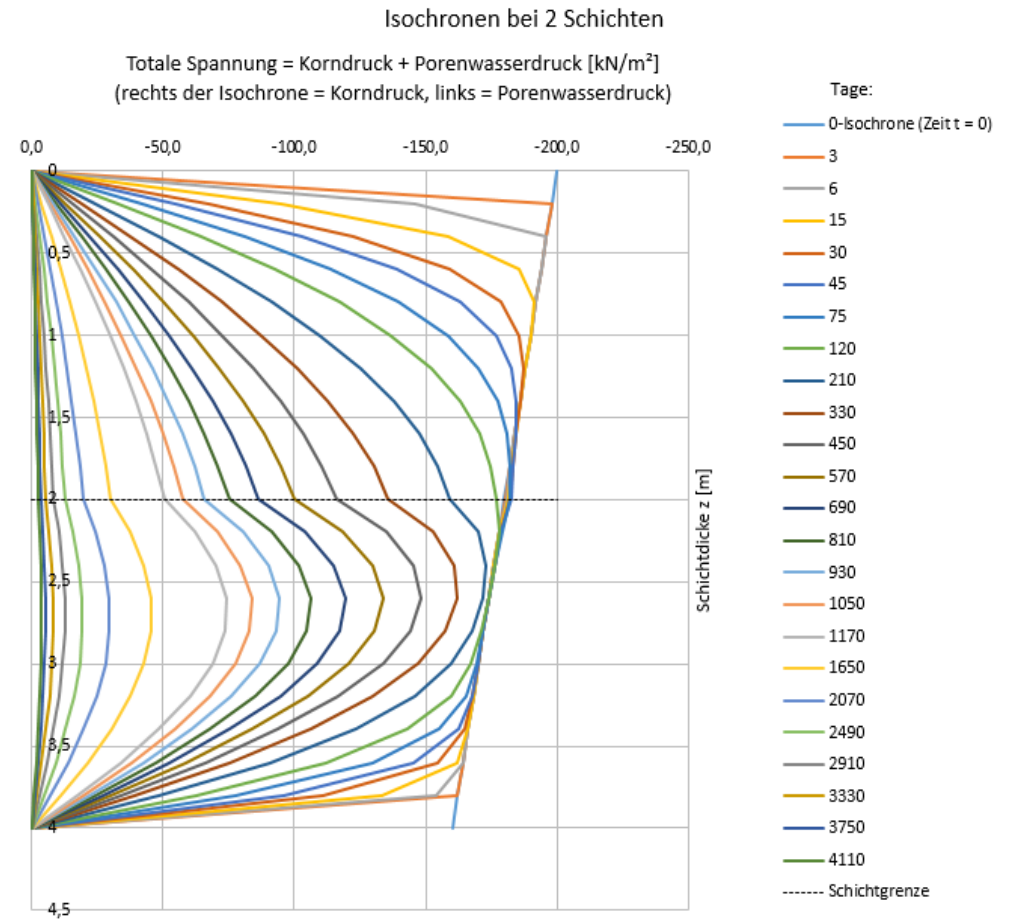
Mit Excel habe ich dieses Differenzenverfahren umgesetzt und das Ergebnis zeigen die nachfolgenden Isochronenbilder (Linien gleicher Zeit (iso und chrono))

Darstellung des Konsolidierungsvorganges anhand von Isochronenbildern

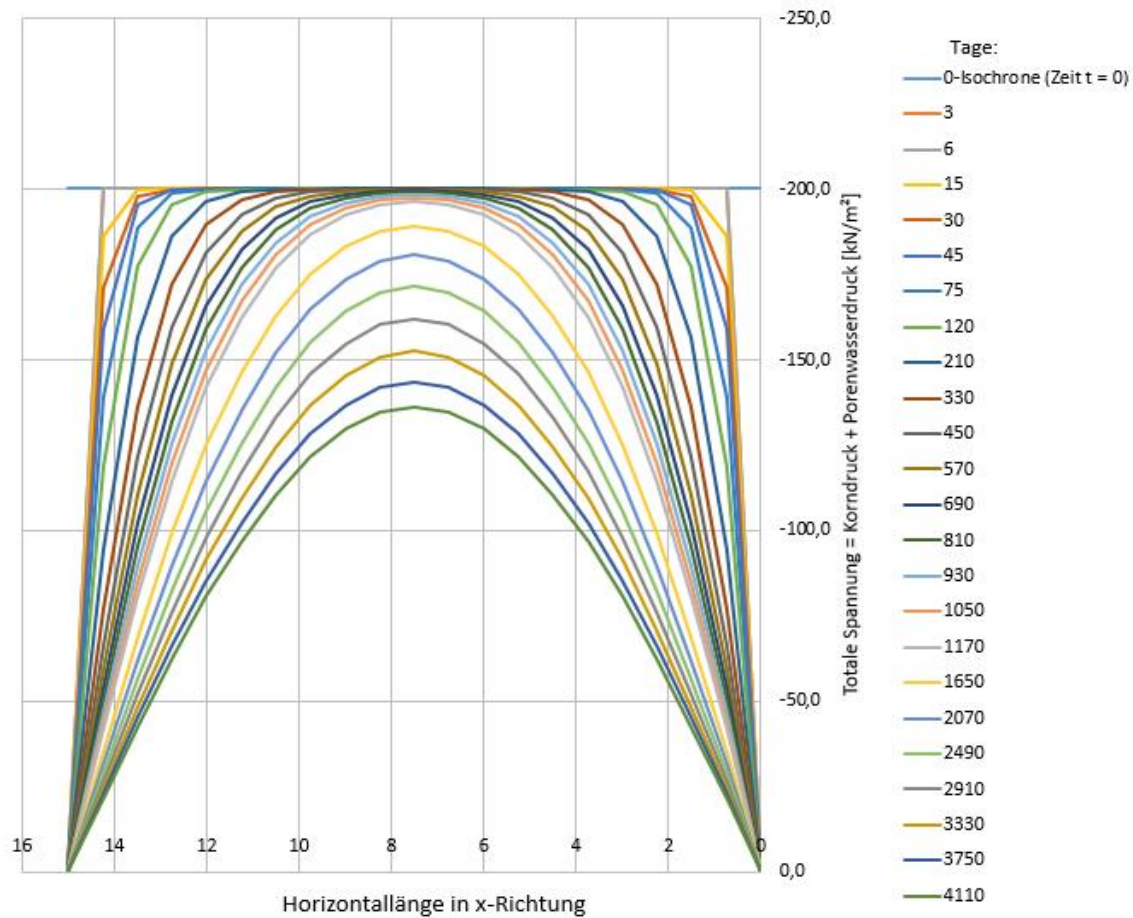
Nur oben entwässernd:



Oben und unten entwässernd:



Isochronen bei Entwässerung in Horizontalrichtung x



Es werden sich alle 3 Entwässerungsrichtungen überlagern, aber aufgrund des geringeren Weges in lotrechter Richtung wird hier die hauptsächliche Entwässerung (bzw. Konsolidierung) stattfinden. Bei Annahme einer Entwässerung nur in lotrechter Richtung liegt man demzufolge auf der sicheren Seite.

Wie wirkt sich dieses Ungleichgewicht auf die Sedimentböschungen aus?

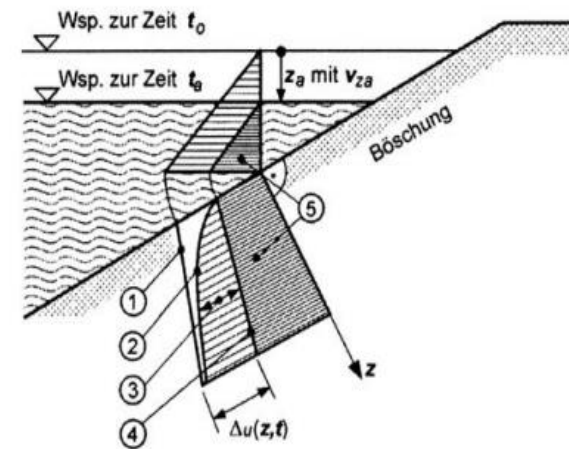
- Fortfall der Auflast durch das Außenwasser beim Sinken des Wasserspiegels
- Gewichtsverminderung der Erdbaustoffe in der Böschung infolge der Auftriebswirkung durch das in den Porenräumen zurückgebliebene Porenwasser
- Zugleich fällt beim Auftauchen der Sedimentböschungen aus dem Wasser in den oberen Schichten die Auftriebswirkung weg und es tritt in diesen obersten Schichten eine Gewichtserhöhung ein
- Die Zusammendrückung des Sediments wird durch das vorhandene Porenwasser gehindert
- Daher wird die Gewichtserhöhung aus dem Wegfall der Auftriebswirkung zum überwiegenden Teil anstelle vom Korngerüst von dem gespannten Porenwasser aufgenommen (vgl. Isochronenbilder)
- Der Scherwiderstand ist bei nassem Bodenmaterial kleiner als bei konsolidiertem erdfeuchtem Material, da das Porenwasser keinen Reibwiderstand besitzt.
- Das in den Porenräumen des Sediments zurückgebliebene Wasser übt von innen nach außen einen hydrostatischen Druck aus

Sehr detailliert wurden in Deutschland Böschungen von Schiffskanälen auf unterschiedliche Wasserstände aufgrund von Wellenbewegungen und geringen Wasserunterschieden untersucht (Mitteilungsblatt Nr. 87 der Bundesanstalt für Wasserbau).

Nachfolgend 2 Bilder die solche schnellen Wasserspiegeländerungen mit den Auswirkungen auf die einwirkenden Kräfte darstellen.

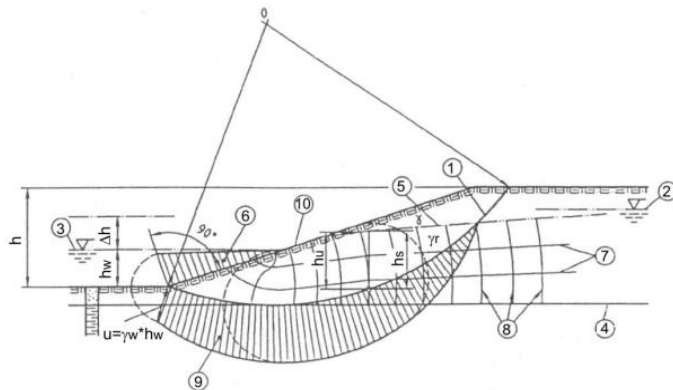
Obwohl hier die Wasserspiegeländerungen nur im Dezimeterbereich liegen, haben diese bereits Auswirkungen auf die Böschungstabilität von solchen Schiffskanälen.

Bei Speicherabsenkungen betragen die Absenkungen 10 m und mehr und vorhandene Sedimentböschungen liegen ohne Schutzschicht völlig frei.



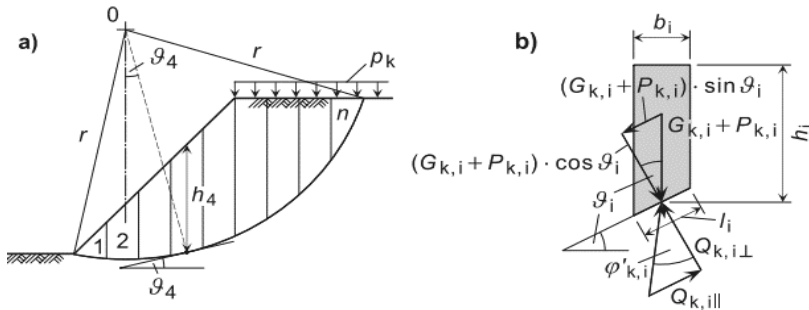
- Legende:
- ① Porenwasserdruck zur Zeit t_0
 - ② Porenwasserdruck zur Zeit t_a
 - ③ Porenwasserüberdruck Δu zur Zeit $t = t_a$
 - ④ Porenwasserdruck zur Zeit $t = t_\infty$
 - ⑤ Hydrostatischer Druckanteil für $t = t_a$
 - z_a Wasserspiegelabsenkung
 - v_{z_a} Absinkgeschwindigkeit ($v_{z_a} = \frac{z_a}{t_a}$)
 - Δu Porenwasserüberdruck
 - z Tiefe im Boden senkrecht zur Böschung

Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsinks (aus: BAW, 2004)



- 1 Gleitlinie
- 2 unbeeinflusste Grundwasseroberfläche
- 3 Außenwasserspiegel
- 4 undurchlässige Schicht
- 5 Grundwasseroberfläche
- 6 Wasserdruck infolge Außenwasser
- 7 Stromlinien
- 8 Potentiallinien
- 9 Porenwasserdruckverteilung längs der Gleitlinie
- 10 Austrittsbereich des Grundwassers

Anschauliche Berechnung mit einem im Excel erstellten Böschungsbruchprogramm



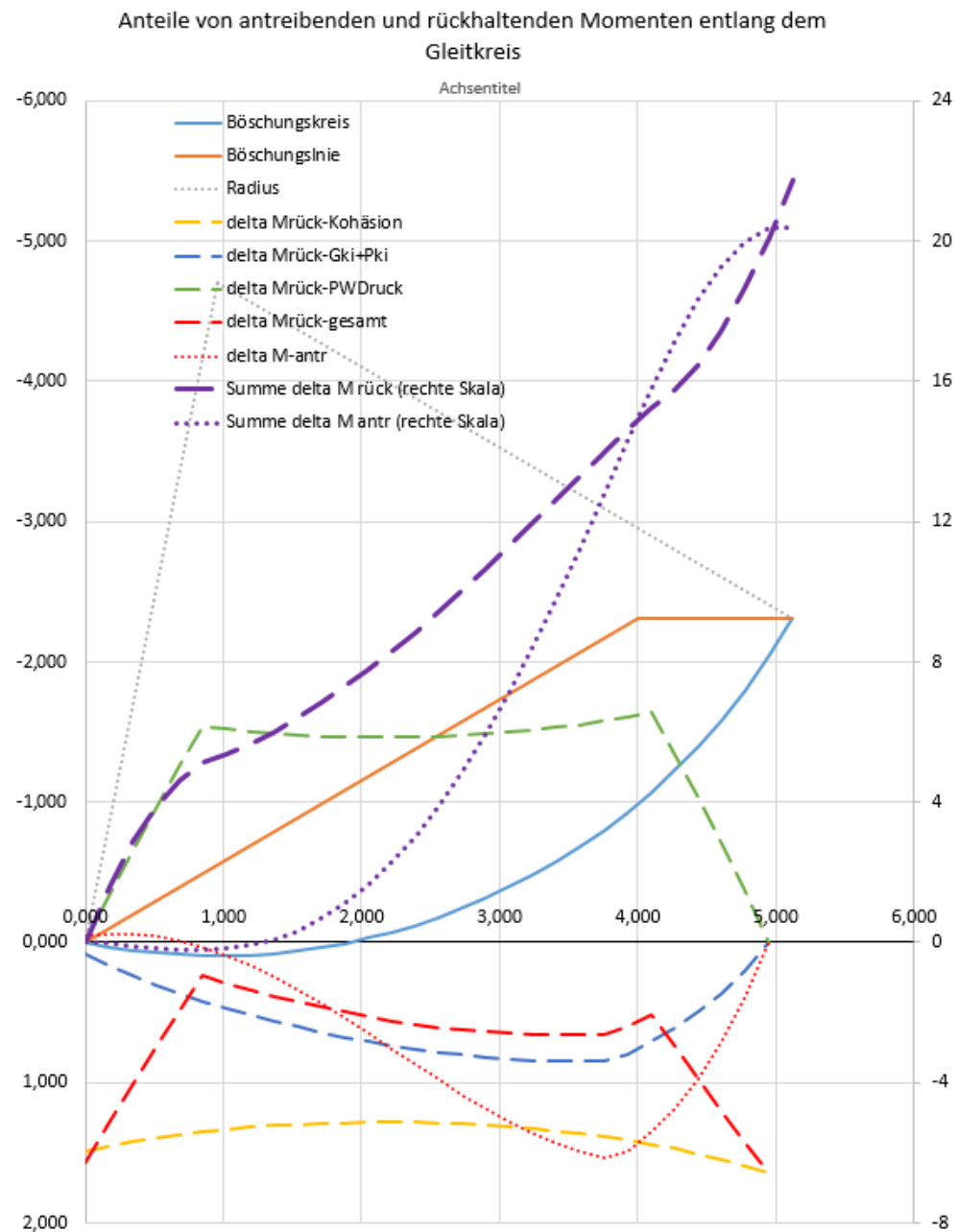
Der Ausnutzungsgrad μ errechnet sich mit Berücksichtigung des Porenwasserdruckes aus nicht abgeschlossener Konsolidierung $\Delta u_{k,i}$ und der Kohäsion $c'_{k,i}$ folgendermaßen. Da der Radius im Zähler und Nenner vorkommt, wurde er in dieser Beziehung gekürzt, so dass sich hier der Ausnutzungsgrad aus Kräften im Zähler und Nenner errechnet:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \text{vorh. antreibende Momente}}{\sum_{i=1}^n \text{max. rückhaltende Momente}}$$

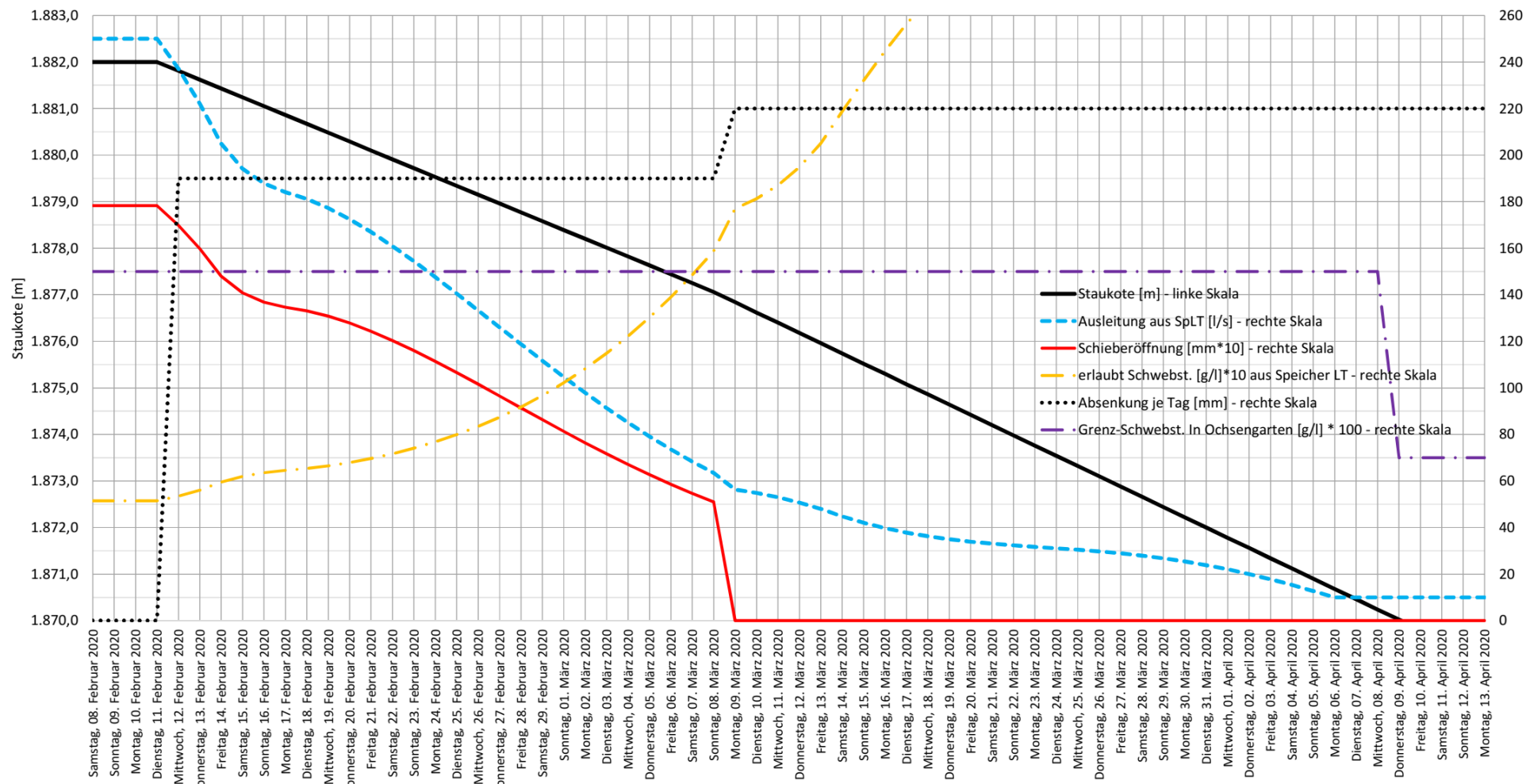
$$= \frac{\sum_{i=1}^n (G_{k,i} + P_{k,i}) \cdot \sin \vartheta_i}{\sum_{i=1}^n \left\{ c'_{k,i} \cdot \frac{b_i \cdot 1\text{m}}{\cos \vartheta_i} + \left[(G_{k,i} + P_{k,i}) \cdot \cos \vartheta_i - (u_{k,i} + \Delta u_{k,i}) \cdot \frac{b_i \cdot 1\text{m}}{\cos \vartheta_i} \right] \cdot \tan \varphi'_{k,i} \right\}} \quad \mu \leq 1$$

Böschungsbruchberechnung bei Grenz Betrachtung (mit Teilsicherheitsbeiwerte)

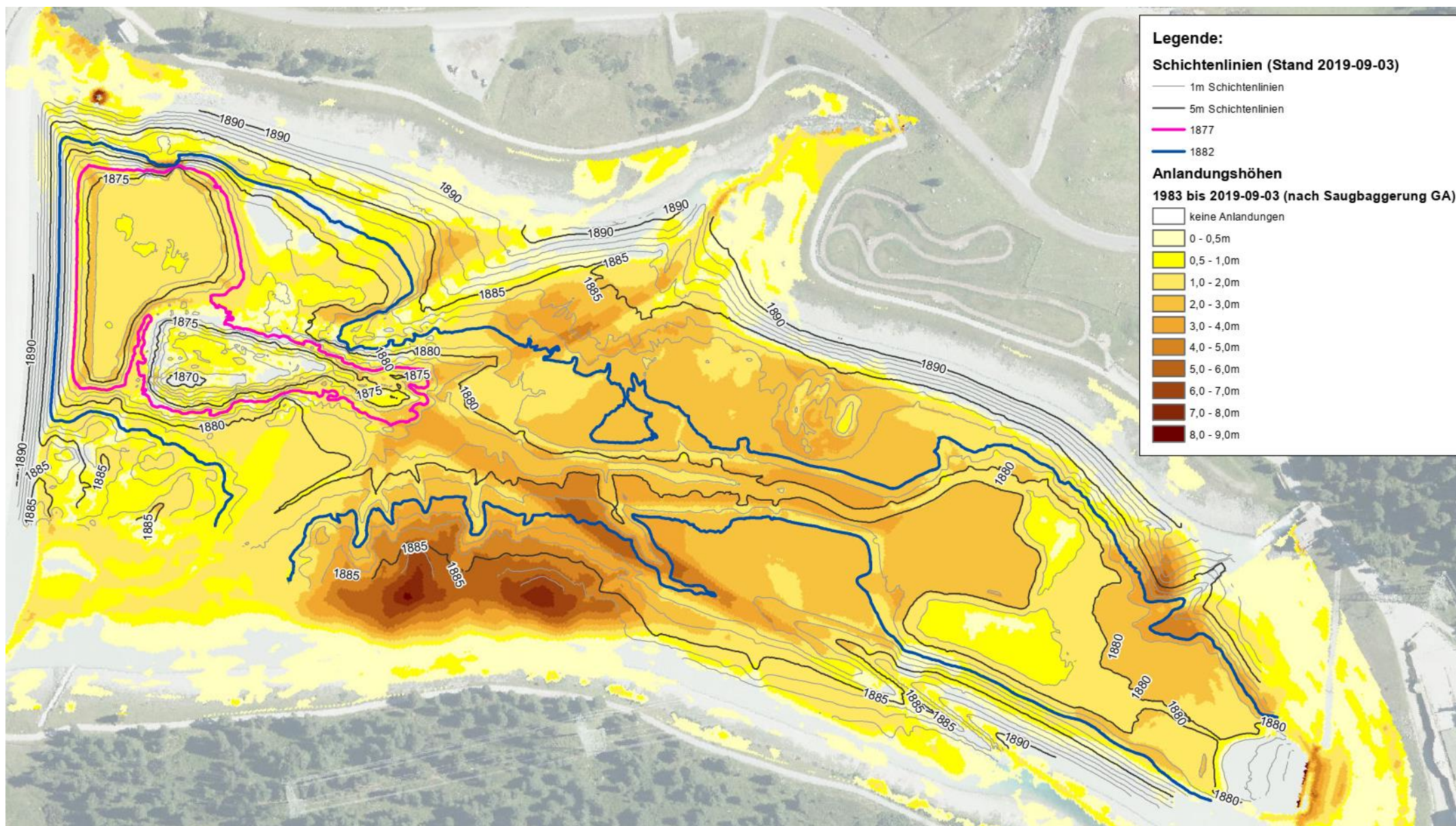
	x	y	
Böschungsfuss	0,00	0,00	[m]
Böschungswinkel $\beta =$	30,00		[°]
Böschungslänge x =	4,00		[m]
Böschungsoberkante		-2,31	[m]
Faktor r/BLx	1,20		[m]
Radius r =	4,80		[m]
Faktor MP-Bkreis	0,20		[m]
MP Böschungskreis	0,96	-4,70	[m]
Bkreis-oben	5,12	-2,31	[m]
Lamellenabschnitte	30		[m]
$\Delta x = b_i =$	0,171		[m]
s =	5,62		[m]
$\alpha = \alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{s}{2r}\right)$	71,62		[°]
$\Delta \alpha =$	2,39		[°]
ϑ -Anfang =	-11,54		[°]
γ -Boden =	10,00		[kN/m³]
Reibungswinkel $\varphi_k =$	25,00		[°]
Kohäsion $c_k =$	10,00		[kN/m²]
Auflast p_k -oben =	0,00		[kN/m²]
Auflast p_k -Bösch =	0,00		[kN/m²]
$r \cdot \sin \varphi_k =$	2,03		[m]
u_k (GW-PW-Druck) =	0,00		[kN/m²]
Δu_k (konsolid. PW-Druck)	25,00		[kN/m²]
γ_G (Einwirkung g) =	1,00		
γ_Q (Einwirkung p) =	1,35		
$\gamma_\varphi = \gamma_c$ (Widerstand) =	1,25		
BW-Zugglied FAd =	0,00		[kN/m]
Winkel zur Horz. $\alpha =$	15,00		[°]
BW-Zugglied FAd / Lam	0,00		[kN/m]



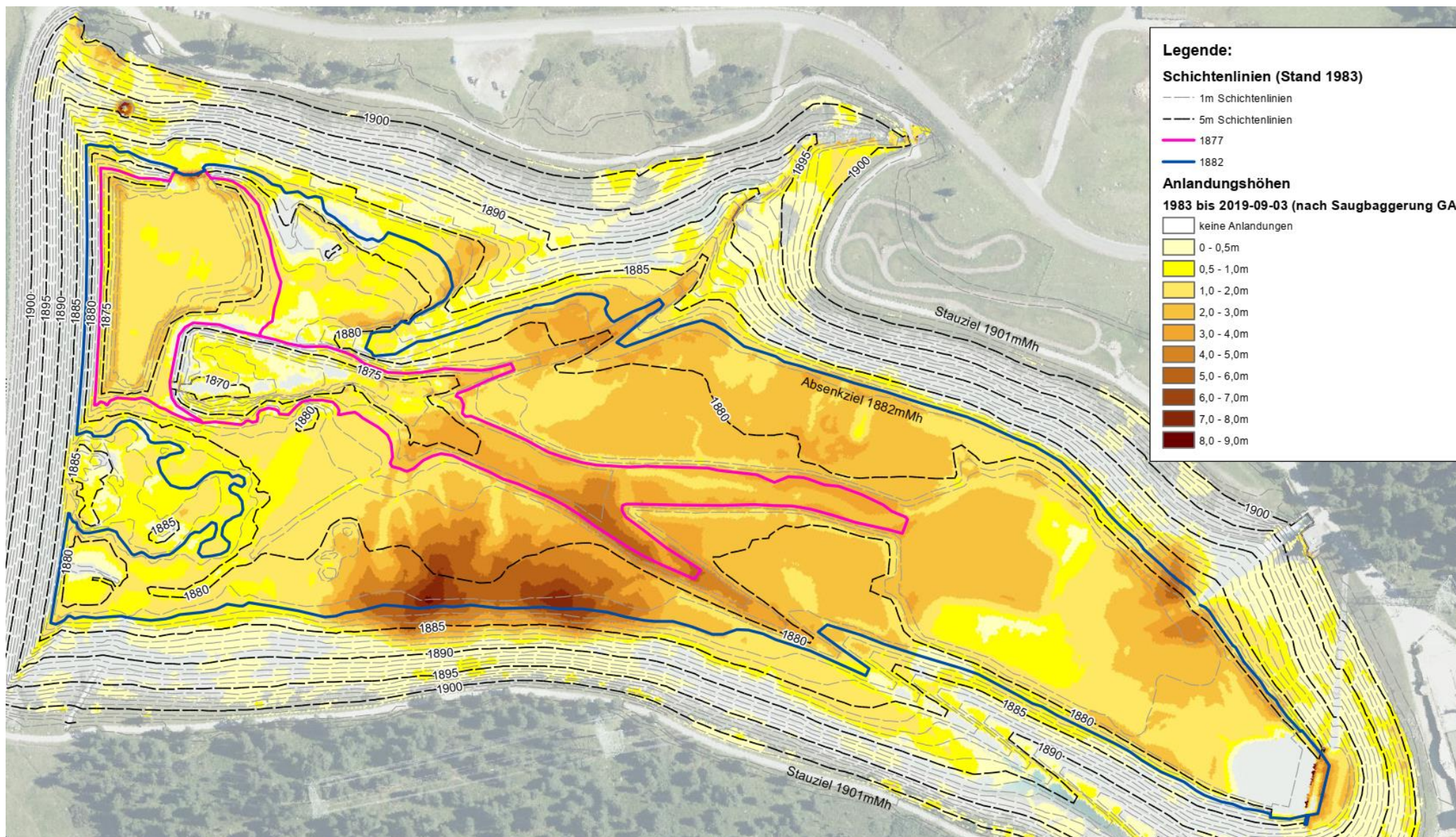
Abstauprogramm Speicher LT: Schieberöffnung, Staukoten, Absenkungen je Tag, Abflüsse, erlaubte Schwebstoffe (Stand 11.02.2020)



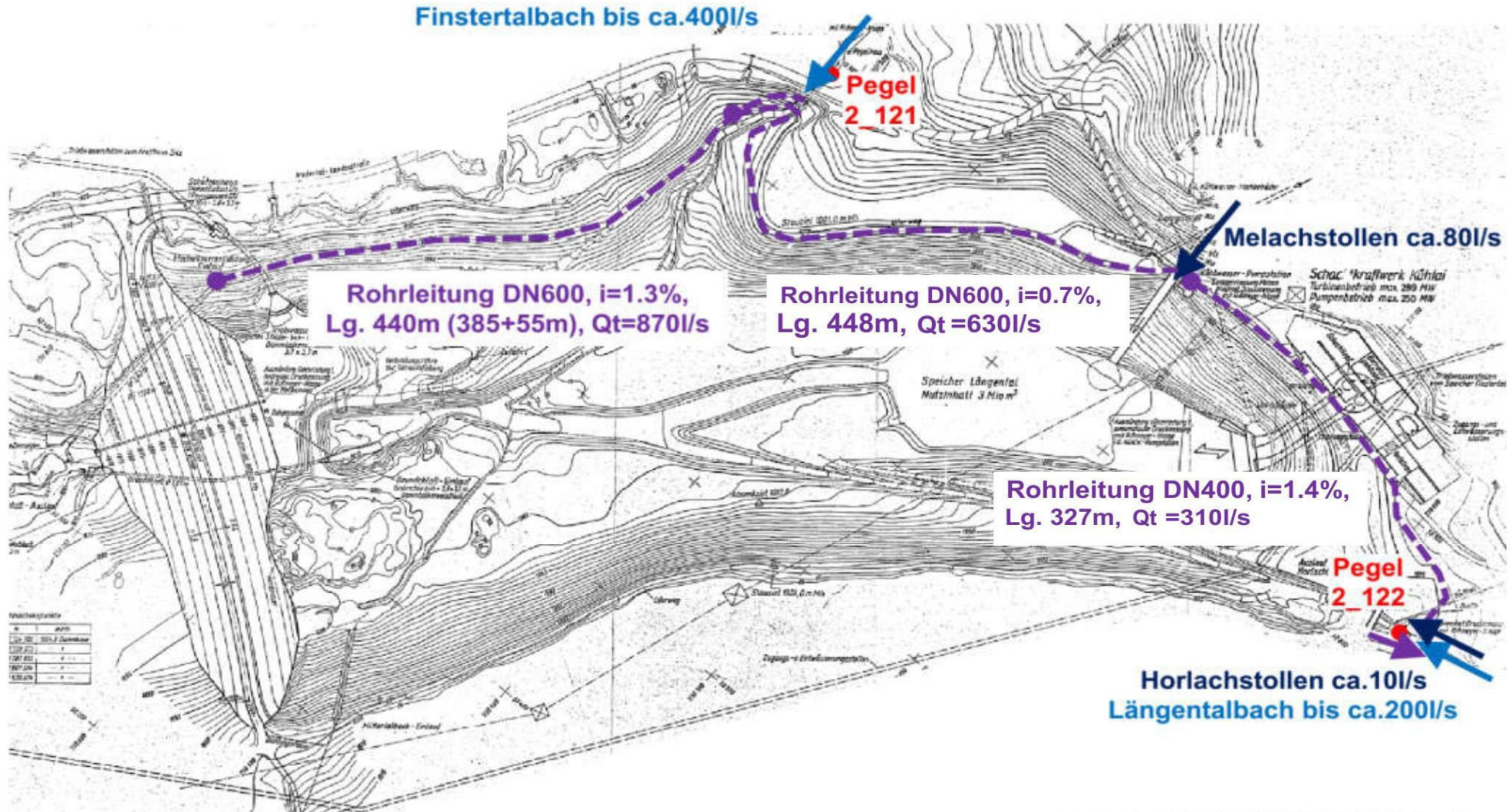
Speicher Längental: Verlandungshöhen und Stauflächen (1877,0 bzw. 1882,0 m (Absenkziel))



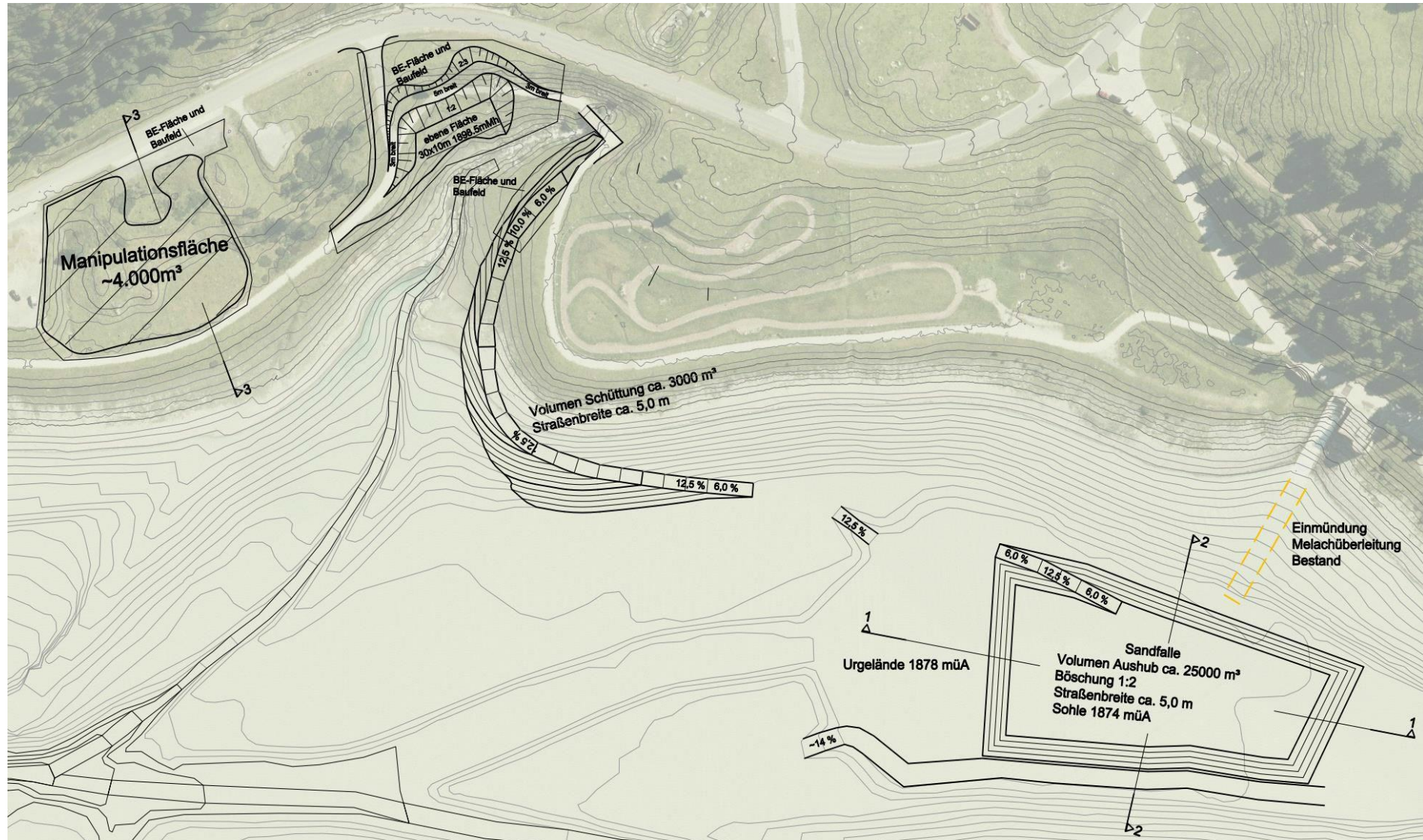
Speicher Längental: Stauflächen (1877,0 bzw. 1882,0 m (Absenkziel)) nach Räumung



Ringrohrleitung Speicher Längental (Herstellung September bis November 2019)



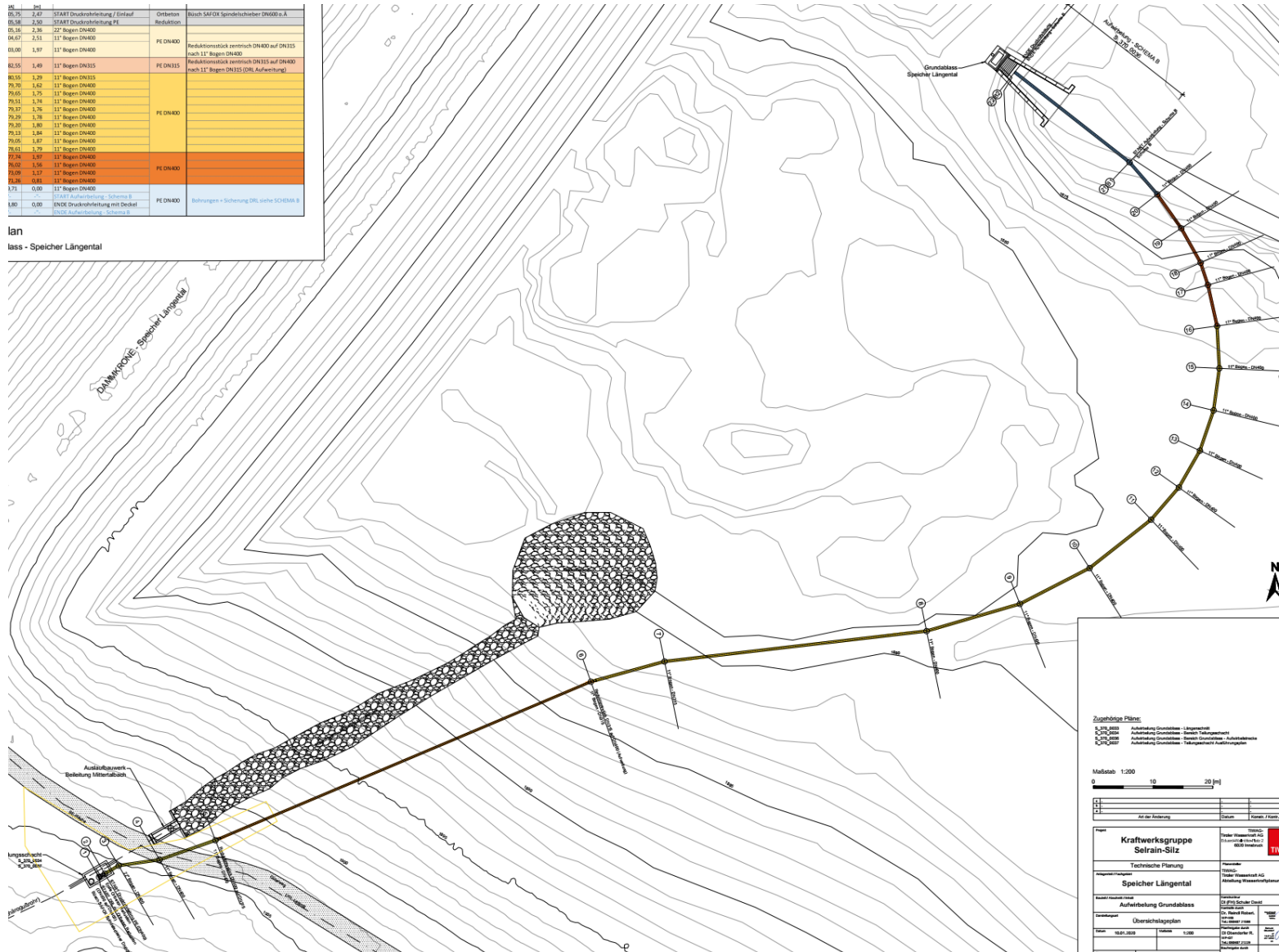
Nachhaltige Sedimentbewirtschaftung: Sedimentfalle Speicher Längental



Nachhaltige Sedimentbewirtschaftung: „Verlängerung“ der Mittertalbach-Überleitung für Aufwirbelung vor dem GA-Einlauf

km	PE	STABT Druckrohrleitung / Einlauf	Ort/Station	Beschreibung
05,75	2,47	STABT Druckrohrleitung / Einlauf	Ort/Station	Busch SA/ IX Spindelstreber DN600 a.A.
05,86	2,00	STABT Druckrohrleitung PE		
06,16	2,36	22° Bogen DN400	PE DN400	
06,67	2,51	11° Bogen DN400		
07,00	1,97	11° Bogen DN400		Reduktionsstück zwischen DN400 auf DN315 nach 11° Bogen DN400
07,55	1,49	11° Bogen DN315	PE DN315	Reduktionsstück zwischen DN315 auf DN400 nach 11° Bogen DN315 (OH, Aufwertung)
08,55	1,29	11° Bogen DN315		
09,70	1,62	11° Bogen DN400		
09,65	1,75	11° Bogen DN400		
09,51	1,88	11° Bogen DN400		
09,37	1,75	11° Bogen DN400		
09,29	1,78	11° Bogen DN400		
09,20	1,80	11° Bogen DN400		
09,13	1,84	11° Bogen DN400		
09,05	1,67	11° Bogen DN400		
09,01	1,75	11° Bogen DN400		
08,74	1,97	11° Bogen DN400		
08,60	1,96	11° Bogen DN400		
08,09	1,17	11° Bogen DN400		
07,89	0,84	11° Bogen DN400		
1,71	0,00	11° Bogen DN400		
1,80	0,00	STABT Aufwertung - Schema B		
		DN400 Druckrohrleitung mit Deckel		
		DN315 Aufwertung - Schema B		

lan
lass - Speicher Längental



Zugehörige Pläne:
 S_20_2000 Aufarbeitung Grundbläss - Längental
 S_20_2001 Aufarbeitung Grundbläss - Bereich Talübergang
 S_20_2002 Aufarbeitung Grundbläss - Bereich Oberlauf - Auslaufstelle
 S_20_2003 Aufarbeitung Grundbläss - Talübergang Auslaufstelle

Maßstab 1:200
 0 10 20 [m]

Blatt	Titel	Status	Maßstab	Verf.
C1				
C2				

Projekt:
 Kraftwerksgruppe
 Selrain-Silz

Technische Planung:
 Speicher Längental
 Aufarbeitung Grundbläss

Überwachungsplan:
 Aufarbeitung Grundbläss

Maßstab:
 1:200

Verfasser:
 08.01.2020

Geprüft:
 08.01.2020

Gezeichnet:
 08.01.2020

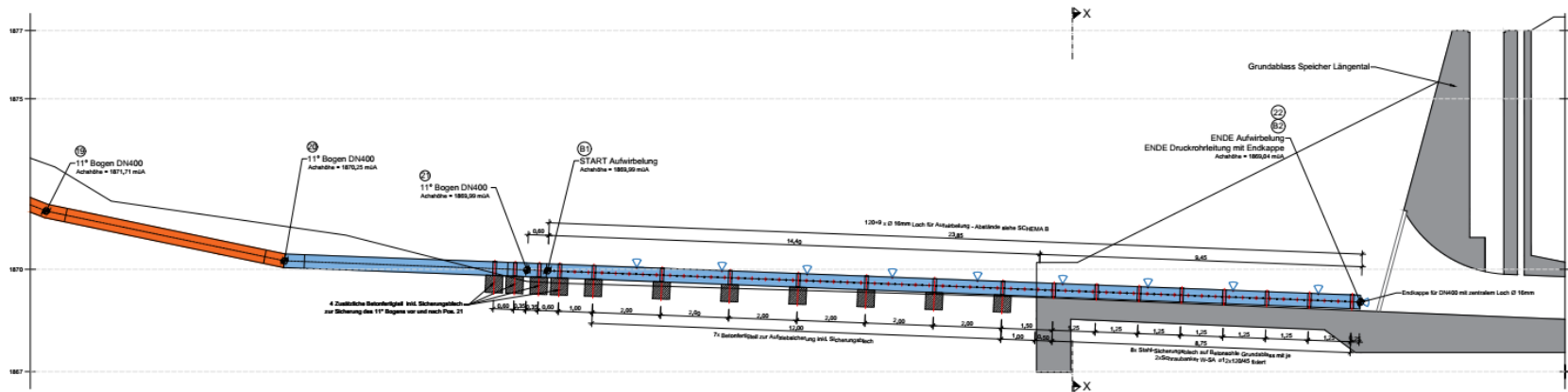
Geprüft:
 08.01.2020

Gezeichnet:
 08.01.2020

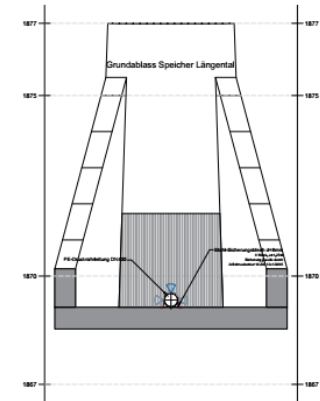


Nachhaltige Sedimentbewirtschaftung: „Verlängerung“ der Mittertalbach-Überleitung für Aufwirbelung vor dem GA-Einlauf

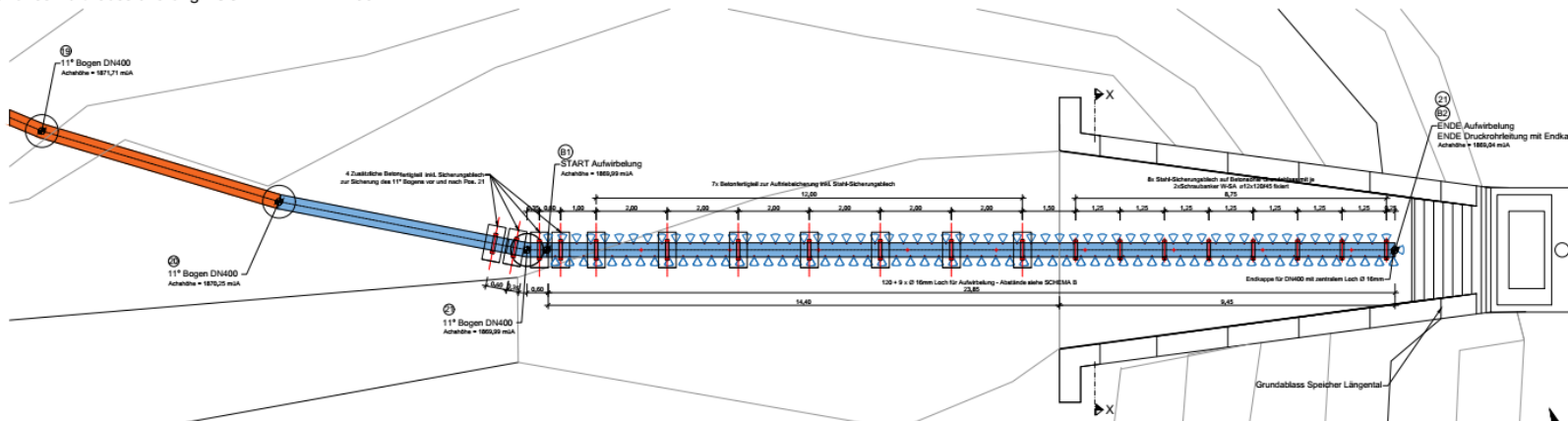
Längenschnitt Druckrohrleitung - Bereich Aufwirbelung - SCHEMA B M=1:50



Schnitt X-X M=1:50



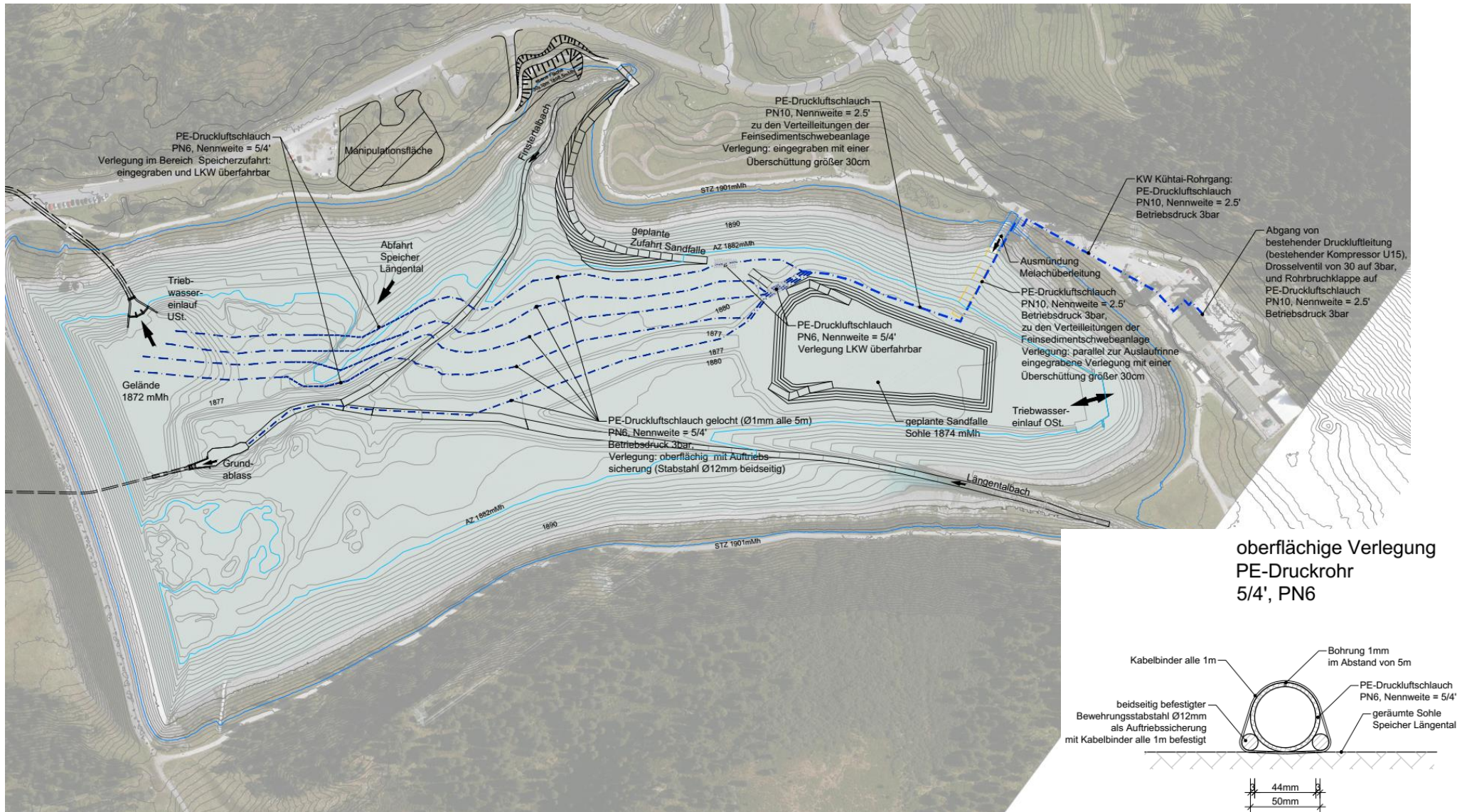
Grundriss Auftriebssicherung - SCHEMA A M=1:50



Abk.	Pos.	Station	Achshöhe [mSL]	Gelände [mSL]	Überhöhung	Reparatur DRL	DRL Element
5	21	205,20	1870,57	1871,74	2,57	11° Bogen DN400	FE DN400
	19	205,17	1874,40	1870,02	1,56	11° Bogen DN400	FE DN400
	18	205,49	1871,71	1873,00	1,17	11° Bogen DN400	FE DN400
	20	205,61	1870,03	1871,26	0,91	11° Bogen DN400	FE DN400
	21	205,73	1869,99	1869,71	0,00	11° Bogen DN400	FE DN400
6	22	204,19	1869,04	1868,90	0,00	ENDE Druckrohrleitung mit Deckel	FE DN400



Nachhaltige Sedimentbewirtschaftung: Feinsediment-Schwebeanlage im Speicher Längental



Feinsediment-Schwebeanlage im Speicher Längental Verwendung der insgesamt 4 Kompressoren der Blasluftanlage im Schachtkraftwerk U15



Gefahr der Sedimentmobilisierung bei
Speicherabsenkungen bzw. -entleerungen

TIWAG-
Tiroler Wasserkraft AG
Eduard-Wallnöfer-Platz 2
6020 Innsbruck



Speicher Finstertal: Einlaufbauwerk für Triebwasser/Grundablass sowie Totraumentleerung mit Schieber und Korb



Speicher Finstertal: Abdecken der Rechenfelder mit Aluplatten mit Dichtung, um Triebwasserstollen entleeren zu können, ohne den Speicher vollständig absenken zu müssen



Speicher Finstertal: Vergleich der Staufflächen bei Absenkung 2218,0 und bei 2211,0 m

