

Wasserdruck auf Konsolidierungssperren – Messungen in situ

R. Hofmann, S. Berger, D. Kolymbas, L. Wimmer

ZUSAMMENFASSUNG In diesem Beitrag werden die theoretischen Grundlagen des Aufsatzes „Wasserdruck auf Wildbachsperren“ [1] den Messungen an vier Konsolidierungssperren gegenübergestellt. Im Speziellen wird dabei auf den Ansatz der Wasserdruckbelastung eingegangen. In [1] wurde bereits auf Grundlage von Felduntersuchungen sowie Beobachtungen gezeigt, dass oft keine Wassersättigung in der Hinterfüllung vorhanden ist. Der auf diesen Erkenntnissen aufbauende Vorschlag für eine empirische Festlegung der Belastungen auf Konsolidierungssperren konnte durch die nunmehr vorliegenden Feldmessungen an vier Konsolidierungssperren über einen Zeitraum von 15 Monaten bestätigt werden.

STICHWÖRTER

Forschung und Entwicklung, Konsolidierungssperren, Geotechnik, Baugrund-Tragwerk-Interaktion

1 Einleitung

Für Bemessungen von Konsolidierungssperren ist die Größe und die Verteilung des Wasserdruckes in der ÖNORM Regel ONR 24802 [2] [3] und in [4] beschrieben. Es stellt sich vermehrt die Frage nach tatsächlich auf solche Konsolidierungssperren wirkenden Wasserdrücken. In diesem Zusammenhang wurde der Arbeitsbereich für Geotechnik der Universität Innsbruck von der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, in Kooperation mit dem Fachbereich Geologie der Wildbach- und Lawinenverbauung mit der Installation einer Messtechnik, sowie der Auswertung der Messdaten, beauftragt. Ziel der Messungen war es, an drei verschiedenen Standorten in Tirol, mit unterschiedlichen geologischen-geotechnischen Verhältnissen, bei Konsolidierungssperren mit variierender Bauwerkshöhe und Seehöhe über einen Zeitraum von zumindestens drei Jahren Messungen des Erddrucks und des Wasserdrucks durchzuführen. Dabei wurden alle Messaufnehmer unmittelbar nach Fertigstellung der Beton- oder Stahlkonstruktion installiert. Im Anschluss erfolgte die Hinterfüllung der Bauwerke mit Aushubmaterial, sowie die Umlegung des Wildbaches, über das Sperrenbauwerk. Alle drei Konsolidierungssperren wurden mit unterschiedlicher Lage, Form und Anzahl von Dolen ausgeführt.

2 Instrumentierte Konsolidierungssperren in Wildbächen

2.1 Allgemeines

Für die Ermittlung der Erddruck- und Wasserdruckbelastungen auf Konsolidierungssperren sind vier Bauwerke ausgewählt

Water pressure on consolidation barriers – measurements in situ

ABSTRACT In this article, the theoretical principles of the paper “water pressure on torrent barriers” [1] are compared with the measurements on four consolidation barriers. In particular, the water pressure load, in the dimensioning of such consolidation barriers, is discussed. In [1] it was already shown on the basis of field investigations as well as observations that there is often no water saturation in the backfill. The proposal based on these conclusions was confirmed by the field measurements now available at four consolidation barriers, over a period of 15 months.

worden, welche ab 2019 neu errichtet wurden. Zwei dieser Sperrenbauwerke befinden sich in Nordtirol und zwei in Osttirol. In Nordtirol befinden sich die Sperren im Schlickerbach (Stubaital) und im Leonhardsbach (nahe Roppen). Die beiden Wildbachsperren in Osttirol liegen im Tödterbach, oberhalb von Sillian.

Bei den drei Konsolidierungssperren aus Beton besteht die Instrumentierung jeweils aus neun Porenwasserdruckaufnehmern, sechs Erddruckzellen und einem Barometer. An der Stahlsperre Tödterbach wurden zehn Erddruckaufnehmer und sechs Porenwasserdruckaufnehmer angebracht. Für die Kalibrierung der Messdaten an der Stahlsperre im Tödterbach werden die Barometerdaten der circa 50 m entfernten Betonsperre verwendet.

Die Messinstrumente wurden mit einem Datenlogger verbunden, welcher alle zwei Stunden die Werte abliest und speichert. Die Aufzeichnung hat im Schlickerbach im Juni 2019 begonnen. Im Dezember 2019 erfolgte die Instrumentierung an der Betonsperre im Tödterbach und im Februar 2020 am Leonhardsbach. Der Beginn der Messung erfolgte unmittelbar nach Beendigung der bergseitigen Hinterfüllarbeiten.

Innovative Konstruktionen bei Wildbachsperren, wie beispielsweise Rückverankerungen mit Totmannankern am Tödterbach, wurden sowohl für die Betonsperre, als auch für die Stahlsperre in die Messkampagne aufgenommen (Bild 5).

Die Ermittlung der Kräfte in den Zuelementen erfolgt indirekt über die an den Totmannankerplatten angebrachten Erddruckzellen. Die Instrumentierung erfolgte mittels Erddruckzelle (Typ VW 4810) und Porenwasserdruckaufnehmer (Typ 4500) der Firma Geokon (Bild 1).



Bild 1. Links Erddruckzelle (Geokon), rechts Porenwasserdruckaufnehmer Foto: Geokon
 Fig. 1. Left earth pressure cell (Geokon), right Piezometer Source: Geokon

Es wurde an jedem der drei Standorte ein Barometer in die Datenaufzeichnung integriert. Luftdruckschwankungen können damit aus den Versuchsergebnissen der Erddruckzellen und der Porenwasserdruckaufnehmern herausgerechnet werden. Für jedes Messinstrument wird die Temperatur zum Messzeitpunkt aufgezeichnet. Die Spannungsdifferenzen infolge Temperaturveränderungen durch die Befestigung der Erddruckzellen am Bauwerk, können in Abhängigkeit des Konstruktionsmaterials einen Einfluss aufweisen. Für Betonbauwerke mit massiven Querschnitten zeigt sich, dass die täglichen Temperaturschwankungen an der bergseitigen Oberfläche keinen Einfluss auf die Messdatenerfassung nehmen. Für die Stahlsperre ergeben sich tägliche Schwankungen. Dementsprechend werden die Tagesmittelwerte für die Analyse verwendet.

2.2 Konsolidierungssperre Schlickerbach (Nordtirol)

2.2.1 Bauwerk

Die instrumentierte Konsolidierungssperre im Schlickerbach wurde 2019 aus Stahlbeton errichtet. Die maximale Höhe des Bauwerks beträgt exkl. Fundament circa 6 m. In der Überfallsektion weist die Wandhöhe jedoch nur circa 3,90 m auf. Die Wandkrone wurde mit Stahlblech verkleidet und weist eine Dicke von circa 1,20 m auf. Am Übergang Wand-Fundament beträgt die Wandstärke 1,60 m. Die Fundierung besteht aus einem 4 m breiten bergseitig orientiertem Fundament. Die seitlichen Flügel ragen in die abfallenden Talflanken ein und stabilisieren die massive Stahlbetonkonstruktion durch den talseitigen Widerstand zusätzlich.

2.2.2 Untergrund

Im Rahmen des Untersuchungsprogrammes wurde der Wassergehalt, die Korngrößenverteilung, die Proctordichte, der Reibungswinkel und die Durchlässigkeit bestimmt. Die Scherfestigkeit wurde mittels Großrahmenscherversuch (50 cm x 50 cm) und einem Größtkorn < 31,5 mm ermittelt. Der Untergrund besteht aus sandigem, schluffigem Kies. Die Proctordichte liegt zwischen 2,05 und 2,11 g/cm³ bei einem Wassergehalt zwischen 6,1 und 9,1%. Der Scherversuch ergab eine Reibungswinkel von $\varphi = 35,5^\circ$ bis $37,0^\circ$ und einen Restschervinkel zwischen $34,0^\circ$ und $37,0^\circ$. Die Durchlässigkeit des Bodenmaterials wurde in Ab-

hängigkeit der Lagerung zwischen $2,4 \times 10^{-2}$ m/s (locker) und $3,2 \times 10^{-4}$ (dicht) bestimmt.

2.3 Konsolidierungssperre Leonhardsbach (Nordtirol)

2.3.1 Bauwerk

Das Sperrenbauwerk im Leonhardsbach wurde 2020 aus Stahlbeton errichtet. Das Bauwerk hat eine maximale Höhe von 8,80 m, im Bereich der Überfallsektion circa 6,50 m. Die Stahlbetonwand wurde, im Gegensatz zur Sperre im Schlickerbach, direkt d.h. ohne Fundament gegründet. Die Wandkrone weist eine Dicke von 0,80 m auf, der Wandfuß circa 1,75 m. Die Gründungstiefe in Bezug zum talseitigen Geländeniveau beträgt mindestens 1,60 m.

2.3.2 Untergrund

Das bodenmechanische Untersuchungsprogramm umfasste dieselben Versuche wie für das Bodenmaterial im Schlickerbach. Die Bodenart im Leonhardsbach besteht aus schluffigem, sandigem Kies. Die Proctordichte liegt zwischen 2,06 und 2,15 g/cm³ bei einem Wassergehalt zwischen 7,0 und 7,3%. Der Scherversuch ergab eine Reibungswinkel von $\varphi = 33^\circ$ - 42° und eine Restreibungswinkel φ_r von circa 37° . Die Durchlässigkeit des Bodenmaterials wurde in Abhängigkeit der Lagerung mit $6,2 \times 10^{-2}$ m/s (locker) und $9,2 \times 10^{-7}$ (dicht) bestimmt.

2.4 Konsolidierungssperre Tödterbach (Osttirol)

– Stahlbetonsperre

2.4.1 Bauwerk

Die Betonsperre im Tödterbach wurde Ende 2019 fertiggestellt. Die massive Betonkonstruktion weist eine maximale Höhe, exklusiv Fundament, von circa 7,8 m, im Bereich der Überfallsektion von 5,4 m, auf.

Die Wandkonstruktion wurde mit konstanter Dicke von 1,3 m errichtet. Das bergseitig orientierte Fundament weist eine Breite von 2,8 m auf.

Neben der Fundation wird die Konstruktion mit sieben Totmannanker und einer 0,8 x 0,8 m großen Ankerplatte rückverankert. Die 8,0 m langen, verzinkten Vollstäbe mit einem Durchmesser von 32 mm wurden circa 2,0 m unterhalb der bergseitigen

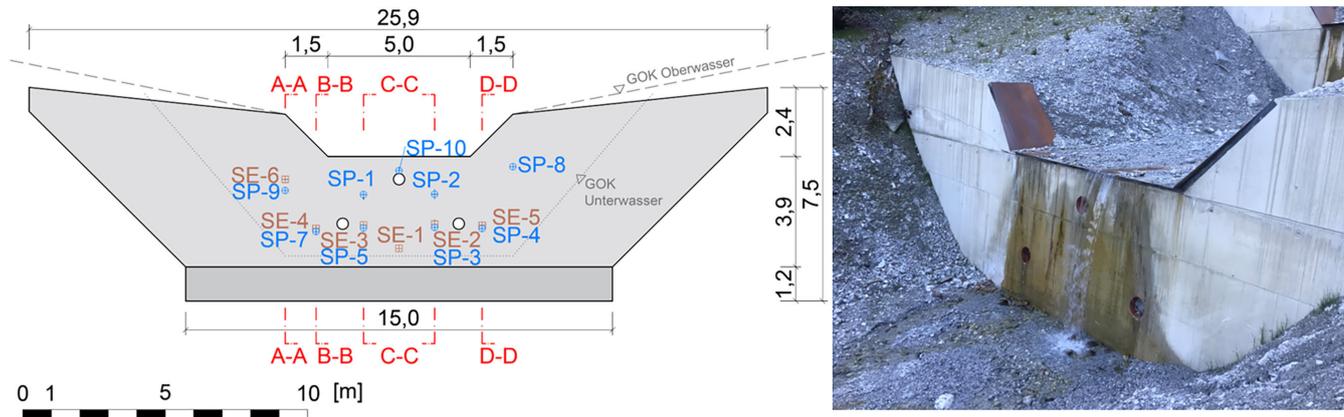


Bild 2. Ansicht Konsolidierungssperre Schlickerbach (Beton), Porenwasserdruckaufnehmer (SP-1 bis SP-10), Erddruckaufnehmer (SE-1 bis SE-6)
 Grafik/Foto: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 2. View of consolidation barrier Schlickerbach (concrete), piezometer (SP-1 to SP-10), earth pressure cell (SE-1 to SE-6)
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

Geländeoberkante (GOK) mit einem Winkel zur Horizontalen von 10° abfallend, im Schutz eines Hüllrohres, eingebaut. Die Anker wurden auf eine Kraft von circa 100 kN ($< 15\%$ der Last an der Streckgrenze des Stabquerschnitts) vorgespannt. Die beiden Flügel der Konsolidierungssperre ragen in die seitlichen Talflanken ein, und stabilisieren die Konstruktion durch den talseitigen Widerstand des Bodenmaterials zusätzlich.

2.5 Konsolidierungssperre Tödterbach (Osttirol) – Stahlsperr

2.5.1 Sonderbauwerk

Unterhalb der instrumentierten Betonsperre wurden im Abstand von circa 50 m vorgefertigte Stahlelemente zur Errichtung einer weiteren Konsolidierungssperre verwendet. Diese innovative Bauweise ermöglicht die Herstellung der Sperre in einer Woche (gegenüber sechs Wochen für die Betonbauwerke). Die Fundation der einzelnen Rahmenelemente bildet ein horizontales HEA 320 Profil, welches pfahlartig auf mehreren 2 m langen, Stahlrohren mit Durchmesser 110 mm fundiert ist. Der Kopfanschluss des Rohres ist so konstruiert, dass ein nachträgliches Justieren und Fixieren des horizontalen HEA 320 Profils möglich ist.

Die Rahmenelemente wurden mit Bewehrungsnetzen und Geokunststoffen zur Gewährleistung der Erosionsstabilität ausgekleidet. Neben der seitlichen Einbindung wird die gesamte Konstruktion, analog der Betonsperre, mit Totmannankern rückverankert. Im Unterschied zur Betonkonstruktion wurden über die gesamte Länge der Stahlsperr 19 Totmannanker in zwei Reihen eingebaut und mittels Ankerplatten von $0,8 \times 0,8$ m rückverankert.

2.5.2 Untergrund

Der Untergrund im Tödterbach besteht ebenfalls aus schluffigem sandigem Kies. Die Proctordichte liegt zwischen $2,10$ und $2,14 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt zwischen $6,4$ und $7,2\%$. Der Rahmenscherversuch ergab einen Reibungswinkel von $\varphi = 31^\circ$ bis 34° . Die Durchlässigkeit des Bodenmaterials wurde in Abhängigkeit der Lagerung zu $1,1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (locker) beziehungsweise $1,4 \times 10^{-6}$ (dicht) bestimmt.

3 Auswertungen der Messergebnisse für die Erd- und Wasserdrücke

3.1 Konsolidierungssperre Schlickerbach

Da nur geringste Porenwasserdrücke gemessen wurden, besteht in der Datenauswertung für die Ermittlung der Erddruckbelastung nahezu kein Unterschied zwischen den totalen und effektiven Spannungen. Im Bereich der Überlaufsektion wurden die bergseitigen Erddrücke in vier Schnitten (Schnitt A-A, B-B, C-C, D-D, **Bild 2**) über die Tiefe im **Bild 6** festgehalten. In den nachfolgenden Bildern wurden die Spannungen des aktiven Erddrucks mit K_a und des Erdruhedrucks mit K_0 angeführt.

Die im **Bild 6** dargestellten Werte entsprechen den Mittelwerten aus den Messungen zwischen Juni 2019 und November 2020. Die Abweichung zwischen den in **Bild 6** dargestellten Mittelwerten und den maximal gemessenen Werten der totalen Spannungen beträgt für alle Erddruckaufnehmer maximal 16% . Schnitte A-A und D-D weisen Erddruckbelastungen in Höhe des aktiven Erddrucks auf. Die Belastung im Schnitt B-B sowie im Schnitt C-C weisen die Messwerte für SE-1 bis SE-4 auf, welche den theoretischen Erdruhedruck geringfügig überschreiten. In den Schnitten A-A und D-D ist die räumliche Wirkung des Erdruhedrucks, bedingt durch die begrenzte Ausbildung eines aktiven Erdkörpers durch den bergseitigen Geländeverlauf, erkennbar.

3.2 Konsolidierungssperre Leonhardsbach

Für die Konsolidierungssperre im Leonhardsbach wurde nach Rücklegung des Baches über das Sperrenbauwerk ein Wasserdruck von maximal 18 kN/m^2 gemessen. Die Maximalwerte wurden von den Porenwasserdruckaufnehmern LP-1 und LP-4 erreicht, welche im Zeitraum von Mitte April 2020 bis Ende November 2020 den Wert von circa $6,5 \text{ kN/m}^2$ nicht unterschreiten. Temporär wurde für den Porenwasserdruckaufnehmer LP-5 ein Wasserdruck von 4 kN/m^2 gemessen.

Alle weiteren Porenwasserdruckaufnehmer weisen nahezu keinen Wasserdruck ($< 2 \text{ kN/m}^2$) auf. Die Porenwasserdruckaufnehmer LP-1 und LP-4 befinden sich in einer Tiefe von $5,80 \text{ m}$ unterhalb der Geländeoberkante. Die nächsthöhere Dole befindet sich circa $2,0 \text{ m}$ oberhalb der Porenwasserdruckaufnehmer LP-1 und LP-4.

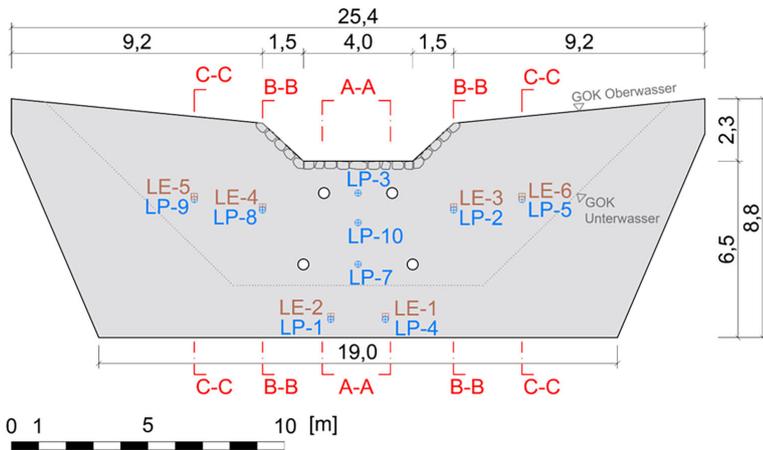


Bild 3. Ansicht Konsolidierungssperre Leonhardsbach (Beton) in Fließrichtung, Porenwasserdruckaufnehmer (LP-1 bis LP-10) Erddruckaufnehmer (LE-1 bis LE-6) Grafik/Foto: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 3. View of consolidation barrier Leonhardsbach (concrete) in flow direction, piezometer (LP-1 to LP-10), earth pressure cell (LE-1 to LE-6)
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

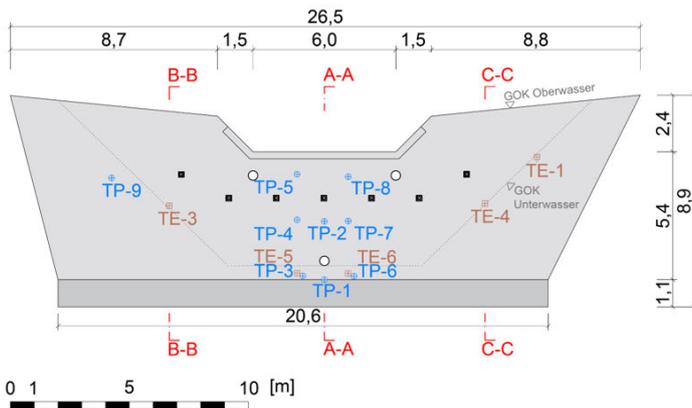


Bild 4. Ansicht Konsolidierungssperre aus Beton im Tödterbach, Porenwasserdruckaufnehmer (TP-1 bis TP-9) Erddruckaufnehmer (TE-1 bis TE-6) Grafik/Foto: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 4. View of consolidation barrier Tödterbach (concrete), piezometer (TP-1 to TP-9), earth pressure cell (TE-1 to TE-6)
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

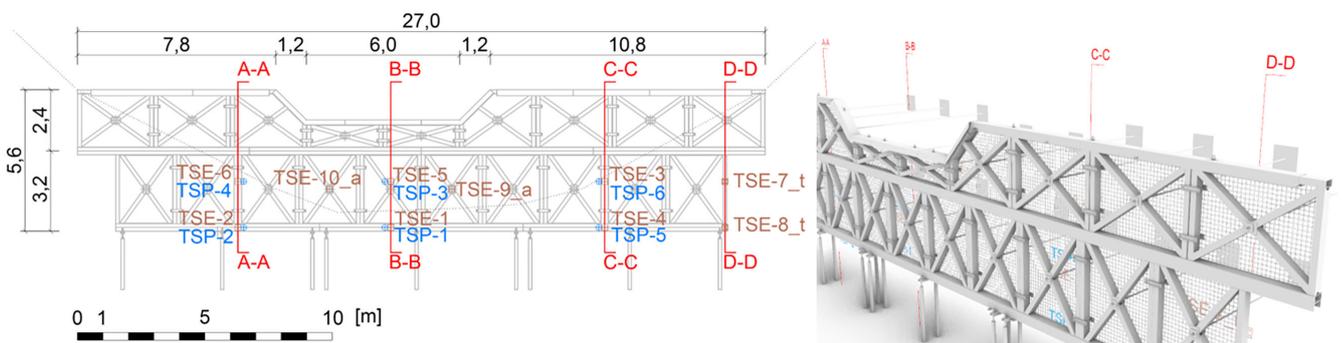


Bild 5. Ansicht Konsolidierungssperre Tödterbach (Stahl), Porenwasserdruckaufnehmer (TSP-1 bis TSP-6) Erddruckaufnehmer (TSE-1 bis TSE-10) Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 5. View of consolidation barrier Tödterbach (steel), piezometer (TSP-1 to TSP-6), earth pressure cell (TSE-1 to TSE-10)
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

Die Erddruckverteilungen bergseitig der Konsolidierungssperre wird im Bereich der Überlaufsektion in Schnitt A-A dargestellt. Die Schnitte B-B und C-C sind beidseitig im Abstand von circa 3,5 m und 6,0 m von der Symmetrieachse angeordnet (Bild 3).

Die grafische Darstellung der gemessenen Maximalwerte der effektiven horizontalen Spannungen in Abhängigkeit der Tiefe wird im Bild 7 ersichtlich.

Im Schnitt A-A liegen der Erddruck im Bereich zwischen Erdruchdruck und aktivem Erddruck. Im Schnitt B-B erreichen die

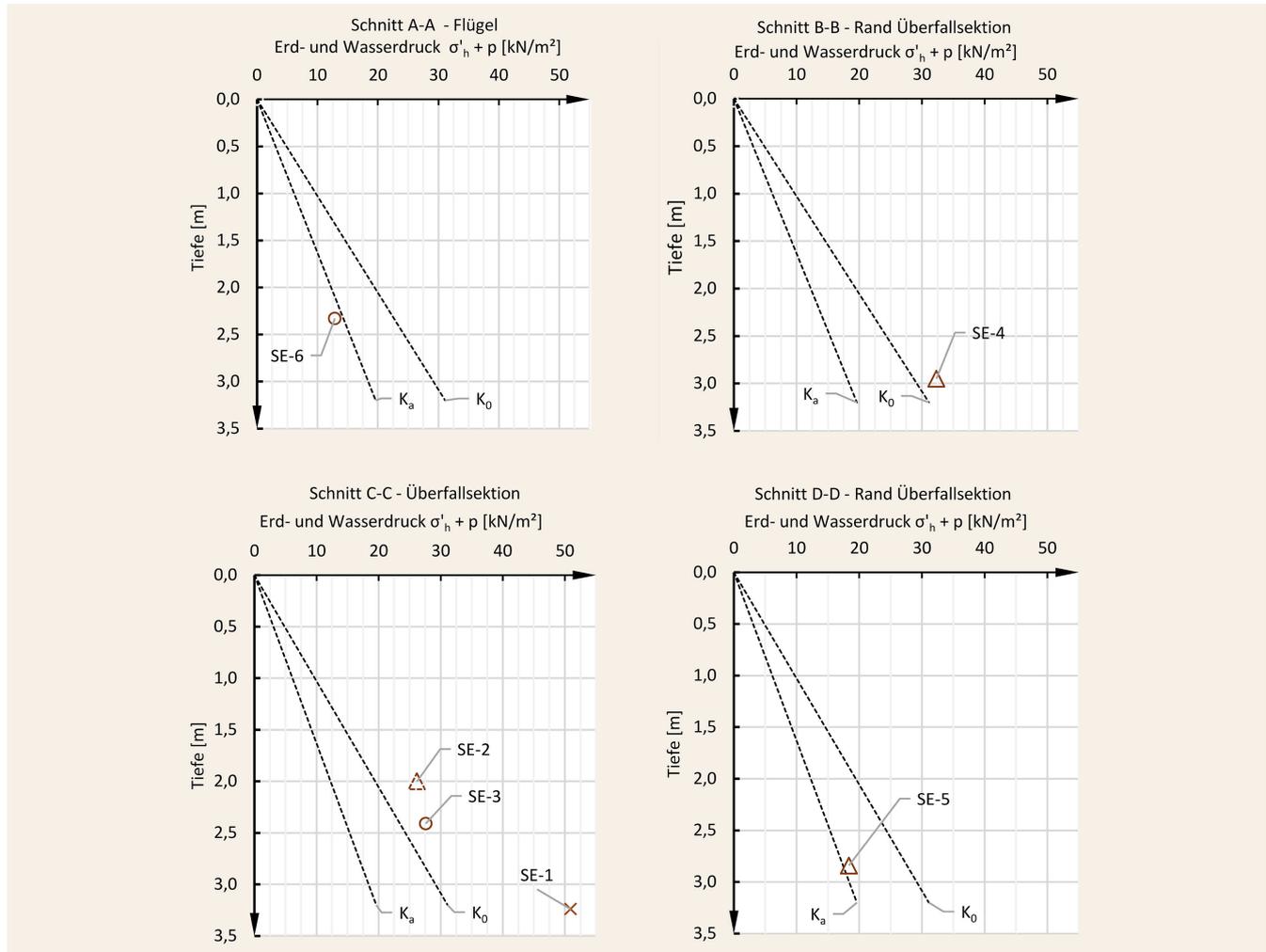


Bild 6. Messwerte der Erddruckaufnehmer als totale Spannungen, Schnitt A-A, Schnitt B-B, Schnitt C-C und Schnitt D-D, ergänzt mit den Werten des aktiven Erddrucks (K_a) und des Erdruhedrucks (K_0) Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 6. Measured values of the earth pressure cell as total stresses, section A-A, section B-B, section C-C and section D-D, supplemented with the values of the active earth pressure (K_a) and the earth pressure at rest (K_0) Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

effektiven Spannungen den Bereich des Erdruhedrucks, im Schnitt C-C liegen die Werte hingegen beim aktiven Erddruck. Die effektiven Spannungen wurden mithilfe der gemessenen totalen Spannungen und den gemessenen Porenwasserdrücken ermittelt.

Die Erddruckaufnehmer LE-1 und LE-2 liegen in einer Tiefe von circa 5,8 m, mit einem horizontalen Abstand von 2,0 m. Ebenso die beiden Erddruckaufnehmer LE-3 und LE-4 in einer Tiefe von 3,2 m. Zwischen Juli 2020 und Ende August 2020 weist der Erddruckaufnehmer LE-3 ein sprunghaftes Ansteigen beziehungsweise Abfallen der Spannungen auf, welche aber stets geringer sind als der maximale Wert am Erddruckaufnehmer LE-4. Ab August 2020 bleiben die Messwerte für LE-3 zwischen 15 und 20 kN/m² konstant. Der maximale Wert am Erddruckaufnehmer LE-4 ergibt sich kurz vor Rücklegung des Wasserlaufes (Mitte April) über die neu errichtete Sperre. Wahrscheinlich wurden die erhöhten Erddrücke infolge abschließender Bauarbeiten (Gerätelasten) gemessen.

Aus dem Vergleich der Porenwasserdrücke lässt sich die Rücklegung des Wasserlaufes über die neue Konsolidierungssperre ab circa Mitte April 2020 feststellen.

Tabelle 1. Porenwasserdruck in Abhängigkeit der Tiefe bzw. zur nächst höheren Dole (Bild 4)

Table 1. Pore water pressure in relation to depth or to the next higher dote (Fig. 4)

PWD	Tiefe ab Wasserlauf [m]	Tiefe ab Dolen UK [m]	Porenwasserdruck gemessen [kN/m ²]
TP6	6,4	ca. - 0,5	0,39
TP3	6,4	ca. - 0,5	0,79
TP1	6,2	ca. - 0,6	1,08
TP7	4,1	ca. - 1,8	2,84
TP2	4,1	ca. - 1,8	3,75
TP4	4,1	ca. - 1,8	5,35

3.3 Konsolidierungssperre Tödterbach – Betonsperre

An der Betonsperre im Tödterbach lassen sich während der Bauarbeiten einzelne intensive Niederschlagsereignisse durch Erhöhung der Porenwasserdrücke zwischen 1,5 bis 4,0 kN/m² fest-

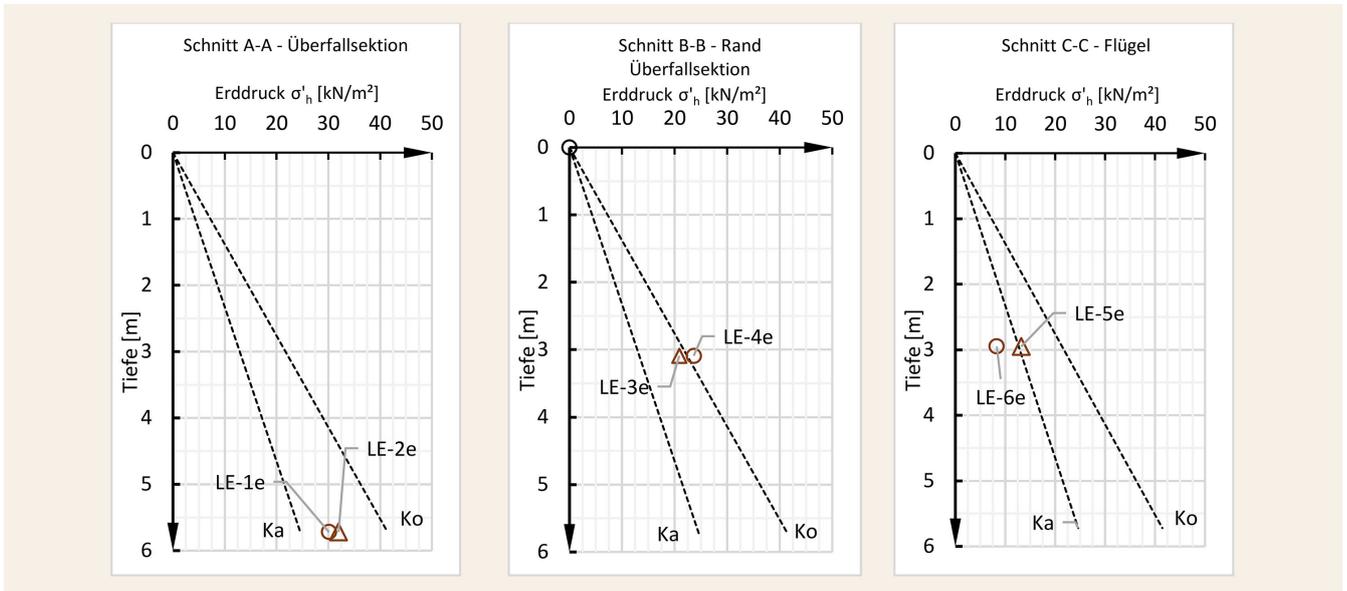


Bild 7. Maximal gemessene effektive Spannungen am Leonhardsbach in den Schnitten A-A, Schnitt B-B und im Schnitt C-C
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 7. Maximum measured effective stresses on the Leonhardsbach in section A-A, section B-B and in section C-C
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

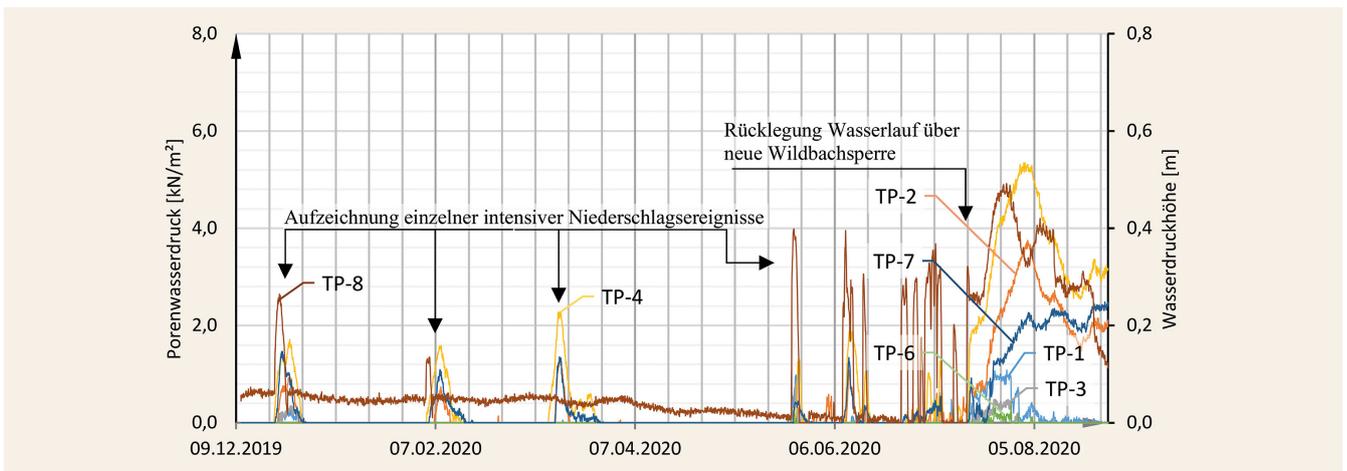


Bild 8. Messwerte der Porenwasserdrucks Spannungen an der Betonsperre im Tödterbach Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 8. Measured values of the pore water stresses at the concrete barrier in the Tödterbach Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

stellen (Bild 8). Nach Rücklegung des Baches über das neu errichtete Bauwerk steigt der Höchstwert des gemessenen Porenwasserdruckes auf maximal 5,4 kN/m². Werden die Porenwasserdrücke nach dem Abstand zur nächsthöheren Dole (Tabelle 1) geordnet, lässt sich zeigen, dass der Porenwasserdruck mit zunehmendem Abstand zur Dole steigt. Abstände zur Geländeoberkante (GOK) spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Obwohl der Porenwasserdruckaufnehmer TP-8 circa 1,05 m unterhalb der GOK liegt, wird ein maximaler Porenwasserdruck von circa 0,5 kN/m² gemessen.

Die bergseitige Belastung der Betonsperre im Tödterbach wurde in den Schnitten A-A, B-B und C-C (Bild 4) unterteilt. Die maximal gemessenen totalen Spannungen (TE-i) und die maximal gemessenen Porenwasserdrücke (TP-i) in den drei Schnitten können dem Bild 9 entnommen werden. Die beiden Schnitte B-B und C-C liegen am Rand der Konsolidierungssperre und weisen

Erddruckbelastungen in Höhe des aktiven Erddrucks auf. Für die Mitte der Konsolidierungssperre in Schnitt A-A, entspricht die Erddruckbelastung dem Erdruehdruck.

Die Betonsperre im Tödterbach wurde mittels Totmannanker mit Ankerplatten rückverankert. Der Erddruckaufnehmer TA-2 wurde, auf einer der in der Mitte liegenden Ankerplatten, in einer Tiefe von circa 4,5 m unterhalb der GOK angebracht. Die gemessene Belastung an der Ankerplatte liegt im Bereich zwischen Erdruehdruck und dem passiven Erdwiderstand (Bild 9). Nach dem Vorspannen der Gewindestäbe wurde eine Belastung in Höhe von circa 167 kN/m² gemessen. Mit den Abmessungen der Totmannankerplatten von 0,8 m x 0,8 m und der (vereinfachten) Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung resultiert eine Rückhaltekraft von circa 107 kN.

Aufgrund der bis dato gemessenen geringen Porenwasserdrücke können die effektiven Spannungen mit den totalen Spannun-

gen annähernd gleichgesetzt werden. Dies trifft insbesondere für die Erddruckaufnehmer TE-5 und TE-6 zu, welche sich in einer Tiefe von > 5 m befinden. In einer Tiefe von circa 3 bis 4 m ergeben sich geringe Unterschiede zwischen den effektiven und den totalen Spannungen nach Rücklegung des Wildbaches über die Konsolidierungssperre für die beiden Erddruckaufnehmer TE-3 und TE-4.

3.4 Konsolidierungssperre Tödterbach – Stahlsperre

Für die Stahlsperre im Tödterbach wurden analog der Betonsperrre einzelne intensive Niederschlagsereignisse gemessen (Bild 8). Nach Rücklegung des Wasserlaufes wurden maximale Porenwasserdrücke für TP-1 von 5,5 kN/m², für TP-2, 6,9 kN/m² und für TP-5 von 2,4 kN/m² gemessen. Für die Stahlsperre wurden während der Messaufzeichnungen große Temperaturschwankungen infolge direkter Sonneneinstrahlung gemessen, weshalb die Messwerte als Tagesmittelwerte berücksichtigt wurden. Die Auswertung der Erddruckbelastung an der Stahlsperre im Tödterbach erfolgt in fünf Schnitten (Bild 5). Die Schnitte A-A, B-B und C-C geben die effektiven horizontalen Spannungen bergseitig der Stahlsperre wieder (Bild 10). Die auf den Stahlsperren angebrachten Erddruckaufnehmer haben einen Einflussbereich von circa 1 m². Mögliche Spannungskonzentrationen durch die Rahmenkonstruktion wurden mit dieser Einflussfläche erfasst. Die einzelnen Stahlelemente werden durch ein HEA-Stahlprofil auf einer „pfahlartigen“ Fundierung gelagert. Durch das Hinterfüllen und das Vorspannen der Gewindestangen stellt sich für die Stahlkonstruktion eine um den Fußpunkt rotierende, bergseitige geringe Verdrehung ein. Dies spiegelt sich im Erddruck in Schnitt A-A und B-B wider. Die beiden Schnitte zeigen am Fußpunkt geringere horizontale Spannungen wie auf Höhe des Ankers.

Im Schnitt C-C wurden effektive horizontale Erddruckspannungen in Höhe des aktiven Erddrucks gemessen. Neben der Montage der bergseitigen Erddruckaufnehmer wurden am äußersten Element der Stahlkonstruktion, talseitig (Bild 5) zwei Erddruckaufnehmer in einer Tiefe von circa 3,6 m beziehungsweise 5,4 m ob GOK angebracht. Die totalen Spannungen für den talseitigen Widerstand im Schnitt D-D und auf die beiden Ankerplatten können dem folgendem Bild 11 entnommen werden.

4 Interpretation und Bewertung der Messergebnisse

4.1 Wirkung von Dolen (Drainageöffnungen)

Gemäß ONR 24800:2009, Abschnitt 4.6.4.2.1 [3] sind zur Reduktion des Wasserdrucks durch Sickerwasser im Verlandungskörper, Entlastungen in Form von Entwässerungsdolen vorzusehen. Für die Konsolidierungssperren aus Beton im Schlickerbach, Leonhardsbach und Tödterbach wurden, Dolen mit Durchmesser von circa 40 cm vorgesehen. Die Betonsperrre am Tödterbach weist eine zusätzliche Dole im Bereich der Sohle, mit einem Durchmesser von 100 cm auf. Nach Rückführung des Wasserlaufes über die Konsolidierungssperren aus Beton am Schlickerbach, Leonhardsbach und am Tödterbach wurden keine beziehungsweise geringste Wasseraustritte aus den Dolen beobachtet, obwohl gleichzeitig die Konsolidierungssperren überströmt wurden. Diese Beobachtungen decken sich mit den Anmerkungen nach [1]. Messtechnisch kann die Wirkungsweise von Dolen mithilfe eines Vergleichs der gemessenen Porenwasserdrücke in der Nähe von Dolen, mit jenen in größerer Entfernung ermittelt werden.

Tabelle 2. Vergleich zwischen gemessenen und hydrostatischem Porenwasserdruck im Schlickerbach
Table 2. Comparison between measured and hydrostatic pore water pressure in the Schlickerbach

Schlickerbach					
Porenwasserdruck	Typ	Tiefe ab GOK [m]	Wasserdruck [kN/m ²]		ρ_{mes}/ρ_{th} [%]
			ρ_{mes}	ρ_{th}	
			SP-10	- 0,5	0,3
SP-2	- 1,3	0,2	13,3	1,7	
SP-1	- 1,3	0,0	13,4	0,0	
SP-8	- 0,4	1,7	3,6	46,7	
SP-3	- 2,5	0,3	25,1	1,1	
SP-5	- 2,5	0,1	25,3	0,4	
SP-9	- 1,3	0,0	13,0	0,0	
SP-4	- 2,5	0,3	25,3	1,0	
SP-7	- 2,7	0,0	26,5	0,0	

Tabelle 3. Vergleich zwischen gemessenen und hydrostatischem Porenwasserdruck im Leonhardsbach
Table 3. Comparison between measured and hydrostatic pore water pressure in the Leonhardsbach

Leonhardsbach						
Porenwasserdruck	Typ	Tiefe ab GOK [m]	Wasserdruck [kN/m ²]	ρ_{mes}/ρ_{th} [%]		ρ_{mes}/ρ_{th} [%]
				ρ_{mes}	ρ_{th}	
				LP-3	- 1,2	3,5
LP-10	- 2,3	2,3	22,7	10,0	1,7	
LP-5	- 1,4	4,0	14,2	28,1	0,0	
LP-9	- 1,4	1,0	14,2	6,7	46,7	
LP-2	- 1,8	1,8	18,0	9,9	1,1	
LP-8	- 1,8	1,0	18,0	5,6	0,4	
LP-7	- 3,8	0,4	38,0	1,1	0,0	
LP-1	- 5,8	17,3	58,3	29,7	1,0	
LP-4	- 5,8	18,2	-58,3	31,2	0,0	

cke in der Nähe von Dolen, mit jenen in größerer Entfernung ermittelt werden.

Die Rahmenelemente der Stahlsperre am Tödterbach wurden mittels Bewehrungsgitter und Geokunststoffen verkleidet. Durch die netzartige und durchlässige Struktur entsteht eine Konsolidierungssperre mit einer flächenhaften Drainage entlang der Wandfläche.

4.2 Wasserdrücke

Für die Konsolidierungssperre aus Beton im Schlickerbach, Leonhardsbach und am Tödterbach wurden in Summe 27 Porenwasserdruckaufnehmer installiert. Die Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen, in Abhängigkeit der Tiefe, die maximal gemessenen Porenwasserdrücke (ρ_{mes}) der einzelnen Porenwasserdruckaufnehmer. Der theoretische Wasserdruck (ρ_{th}) ergibt sich als hydrostatischer Wasserdruck im vollständig wassergesättigten Boden ohne Berücksichtigung des Einflusses der Dole beziehungsweise einer Unterströmung. Werden die von Null verschie-

denen Werte über alle Sperrenbauwerke aus Beton hinsichtlich des Verhältnisses aus p_{mes}/p_{th} analysiert, lässt sich feststellen, dass der Mittelwert 7,6% und das 95% -Quantil 45,9% beträgt. Der Maximalwert ergibt sich zu 46,8%.

Die einzelnen Werte können der Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 entnommen werden.

Um den Einfluss der Unterströmung und der Dolenöffnungen hinsichtlich Porenwasserdruckreduktion zu analysieren, werden die einzelnen Sperrenbauwerke mithilfe dem FE-Programm OP-TUM G2 numerisch untersucht.

Im vollgesättigten Zustand resultiert die Ermittlung des Porenwasserdrucks somit ausschließlich aus der Querschnittsgeometrie und der Voraussetzung, dass keine Diskontinuitäten beziehungsweise Undurchlässigkeiten in einzelnen Bodenschichten vorhanden sind. Der Porenwasserdruck wurde zudem als stationär mit gleichbleibenden Lagen des Grundwasserspiegels angenommen. Die Berechnungen erfolgen am 2D-Modell. Für die Konsolidierungssperre im Schlickerbach wurde zunächst der Porenwasserdruck entlang von vertikalen Schnitten im Bodenmaterial mit Abstand von 5 cm, 25 cm und 50 cm berechnet. Im Weiteren wurden die Dolenöffnungen zwischen 0 und 40 cm variiert. Die Variation der Dolenöffnung soll dem Umstand Rechnung tragen, dass die numerische Auswertung der Porenwasserdrücke, aus einer 2-dimensionalen Analyse hervorgeht.

Tabelle 4. Vergleich zwischen gemessenen und hydrostatischem Porenwasserdruck im Tödterbach, Betonsperre
Table 4. Comparison between measured and hydrostatic pore water pressure in the Tödterbach, concrete barrier

Tödterbach					
Porenwasserdruck	Typ	Tiefe ab GOK [m]	Wasserdruck [kN/m ²]		p_{mes}/p_{th} [%]
			p_{mes}	p_{th}	
	TP-8	- 1,1	4,9	10,5	46,8
	TP-4	- 2,9	5,3	28,7	18,6
	TP-2	- 2,9	3,7	29,3	12,8
	TP-7	- 2,9	2,5	29,2	8,5
	TP-1	- 5,4	1,1	53,9	2,0
	TP-3	- 5,1	0,8	51,1	1,5
	TP-6	- 5,4	0,4	53,9	0,7
	TP-5	-	-	-	-
	TP-9	-	-	-	-

Die Reduktion des Porenwasserdruckes ergibt sich für jeden Porenwasserdruckaufnehmer in Abhängigkeit seines horizontalen und vertikalen Abstandes zur Dole. Der obere Grenzwert ergibt sich aus der tatsächlichen Breite der Dole mit 40 cm gemäß Aus-

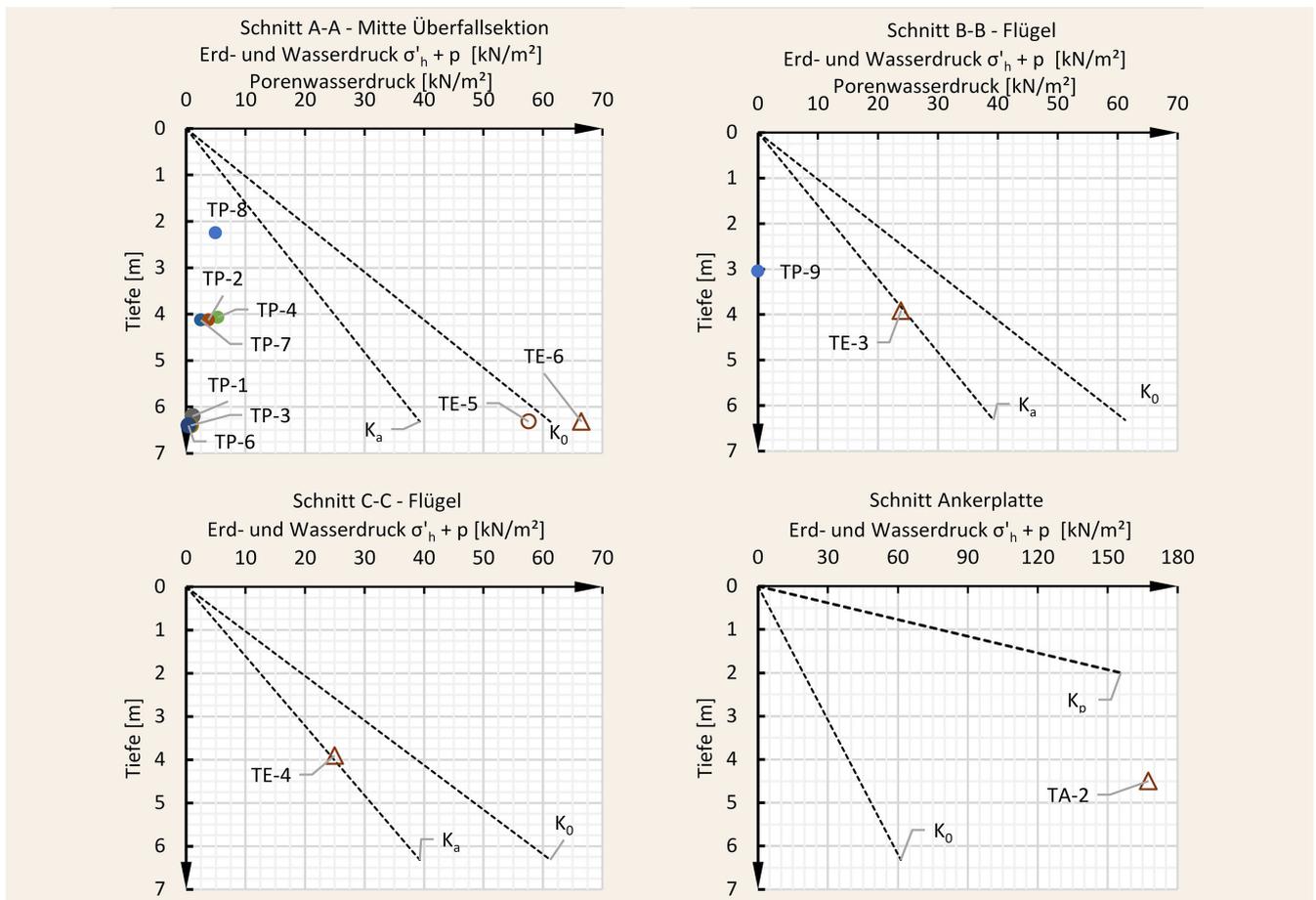


Bild 9. Maximalwerte der totalen Spannungen in den Schnitten A-A, B-B, C-C und im Schnitt der Ankerplatte an der Betonsperre am Tödterbach
Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
Fig. 9. Maximum values of the total stresses in section A-A, B-B, C-C and in the section of the anchor plate at the concrete barrier Tödterbach
Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

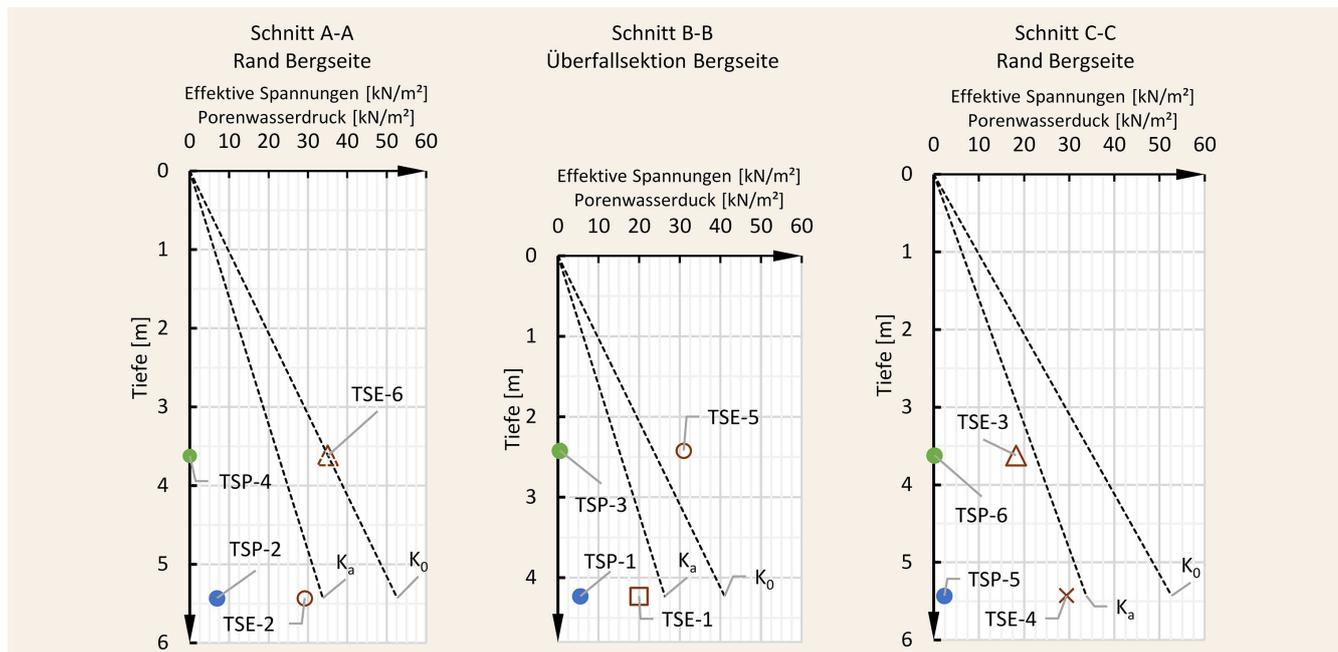


Bild 10. Effektive Spannungen in den Schnitten A-A, B-B und C-C im Tödterbach, Stahlsperrre *Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck*
 Fig. 10. Effective stresses in the section A-A, B-B and C-C in the Tödterbach, steel barrier *Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck*

führung und gilt für Porenwasserdruckaufnehmer in deren unmittelbarer Nähe. Der untere Grenzwert, sofern ein wassergesättigtes Bodenmaterial vorhanden ist, ergibt sich aus der Berücksichtigung der Unterströmung ohne Einfluss von Dolenöffnungen. Die Analyse der Porenwasserdrücke im bergseitigen Bodenmaterial kann dem **Bild 12** entnommen werden. Die vertikale Lage der Dolenöffnungen im Schlickerbach befinden sich in einer Tiefe von 0,8 m und 2,8 m unterhalb der GOK (siehe blaue horizontale Pfeile in Bild 12). Linien gleichen Typs zeigen den Porenwasserdruck entlang einer vertikalen Linie mit gleichbleibendem horizontalem Abstand zur Konsolidierungssperre, aber mit unterschiedlichen Dolenöffnungen. Daraus lässt sich erkennen, dass sowohl der vertikale, als auch der horizontale Abstand der Dole einen Einfluss auf die Reduktion des Porenwasserdruckes hat.

Die Porenwasserdruckaufnehmer wurden in unmittelbarer Nähe der bergseitigen Wand installiert. Für die folgenden Sperrbauwerke wird dementsprechend der vertikale Schnitt mit einer horizontalen Entfernung von 5 cm unter Variation der Grenzwerte der Dolenöffnungsbreiten bis 40 cm herangezogen.

Die Dolen der Konsolidierungssperre im Leonhardsbach befinden sich in einer Tiefe von 1,25 m und 3,80 m unterhalb der GOK. Die im **Bild 13** dargestellten gelben Dreiecke sind Messwerte, welche sich außerhalb des Bereichs der Dolen befinden. Messwerte in der Nähe der Symmetrieachse der Sperre, liegen im Einflussbereich der Dolen und sind mit einem roten Viereck im Bild 13 gekennzeichnet. Die Messinstrumente LP-3 und LP-7 liegen auf Höhe der Dolen. Während der Einfluss des Überstromwassers auf den LP-3 noch signifikant zu erkennen ist, wird durch die beidseitige Anordnung der Dolen auf Höhe der Messinstrumentierung von LP-7 der Wasserdruck nahezu vollständig reduziert.

Die Messwerte der Porenwasserdruckaufnehmer LP-7, LP-1 und LP-4 zeigen, dass der Anstieg des Porenwasserdrucks mit dem hydrostatischen Wasserdruck gut übereinstimmt. So beträgt

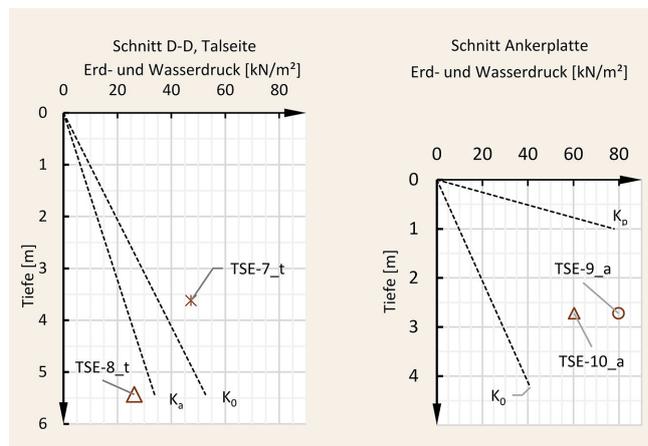


Bild 11. Totale Spannungen im Schnitt D-D und im Schnitt der Ankerplatte im Tödterbach, Stahlsperrre *Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck*
 Fig. 11. Total stresses in section D-D and in the section of the anchor plate in the Tödterbach, steel barrier *Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck*

die Druckdifferenz zwischen LP-7 und dem Mittelwert aus LP-1 und LP-5 circa 18 kN/m² und die Höhendifferenz circa 2,0 m.

Das maximale Verhältnis zwischen gemessenem und theoretischem Wasserdruck (p_{mes}/p_{th}) beträgt 31,2%. Wird die Unterströmung berücksichtigt, beträgt das Verhältnis circa 44,3%. Die Dolen der Konsolidierungssperre aus Beton im Tödterbach befinden sich in einer Tiefe von 1,0 m und 4,6 m unterhalb der GOK. Analog der Sperre im Leonhardsbach weist der Porenwasserdruckaufnehmer auf Höhe der Dole im **Bild 14** einen reduzierten, aber von Null verschiedenen Wert aus. Darunterliegende Aufnehmer (TP-2, TP-4 und TP-7) zeigen, dass keine Zunahme des Porenwasserdrucks mit der Tiefe stattfindet. Der vertikale Abstand zwischen den untersten Aufnehmern (TP-1, TP-3 und TP-6) ist mit 40 cm unterhalb der Unterkante der Dole sehr ge-

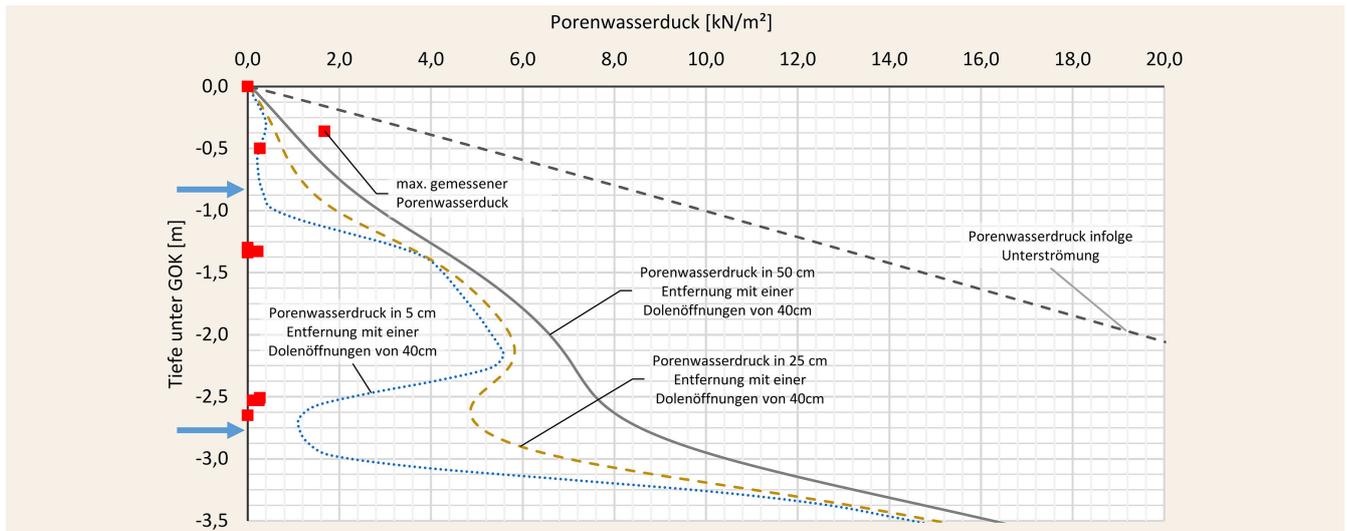


Bild 12. Konsolidierungssperre Schlickerbach, Vergleich der gemessenen und berechneten Porenwasserdrücke mit Variation des Abstandes (5 bis 50 cm) und einer Dolenöffnung von 40 cm, blaue Pfeile = Lage der Dole, rote PWD-Messung im Bereich der Dole

Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck

Fig. 12. Schlickerbach consolidation barrier, comparison of measured and calculated pore water pressures with variation of spacing (5 to 50 cm) and a dole opening of 40 cm, blue arrows = location of doles, red PWP measurement in the area of the doles

Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

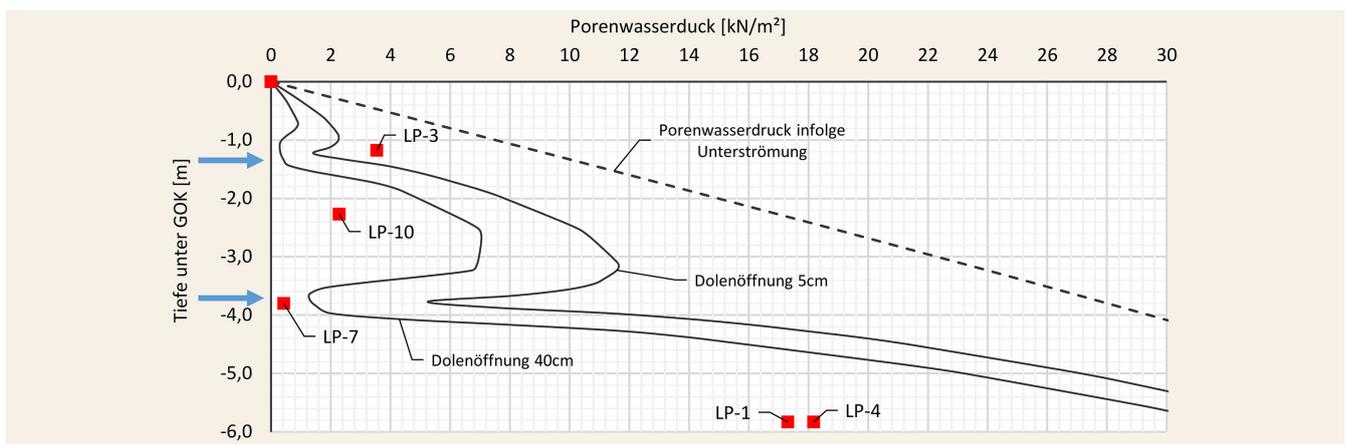


Bild 13. Vergleich der gemessenen und berechneten Porenwasserdrücke in Abhängigkeit der Tiefe im Leonhardsbach (blaue Pfeile zeigen die Lage der Dole)

Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck

Fig. 13. Comparison of measured and calculated pore water pressures in relation to depth in the Leonhardsbach (blue arrows show the location of the dole)

Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

ring. Demzufolge werden auch keine signifikanten Wasserdrücke gemessen.

Die zweidimensionale numerische Modellierung der Stahlsperre kann unabhängig einer Eingrenzung beziehungsweise Abschätzung der Dolenöffnungsbreiten erfolgen, da die Bewehrungsgitter und Geokunststoffe der Stahlsperre am Tödterbach eine flächenhafte Drainage ermöglichen. Die Annahme, dass das Porenwasserdruckpotenzial entlang dieser Auskleidung null sein muss, ist damit sowohl im Rechenmodell als auch in der Realität als feste Randbedingung zu berücksichtigen. Im **Bild 15** wurde der Porenwasserdruck ohne und mit Berücksichtigung der flächenhaften Drainagewirkung ermittelt. Die Messwerte zeigen einen analogen Verlauf des Porenwasserdruckes, wobei der Wert des Porenwasserdruckaufnehmers TSP-2 (6,91 kN/m²) circa 58 % vom berechneten Wert infolge Unterströmung (12,0 kN/m²) beträgt (**Bild 15**).

4.3 Erd- und Wasserdrücke

Die gemessenen Erddrücke bestätigen die mögliche Verdrehung/Verschiebung der Sperrenbauwerke. Bei der massiven Sperre im Schlickerbach, mit relativ großen Fundamenten, wurden bei der Überfallsektion (SE 1 bis SE 3) Erddrücke registriert die teilweise über dem Erdruhedruck liegen. Dies steht auch mit der intensiven Verdichtung in Zusammenhang. Bei der höheren und schlankeren Sperre im Leonhardsbach hingegen wurden Erddrücke festgestellt, die zwischen dem aktiven Erddruck und dem Erdruhedruck liegen (**Bild 16**).

Die in [1], [5], [6] und [7] vorgestellten Ansätze zur Bestimmung der bergseitigen Einwirkung auf Konsolidierungssperren infolge unterschiedlicher Drainagewirkung werden in diesem Kapitel mit der gemessenen Einwirkung gegenübergestellt. Für den Einwirkungsfall E_{k4} wird, für die Konsolidierungssperre im Leon-

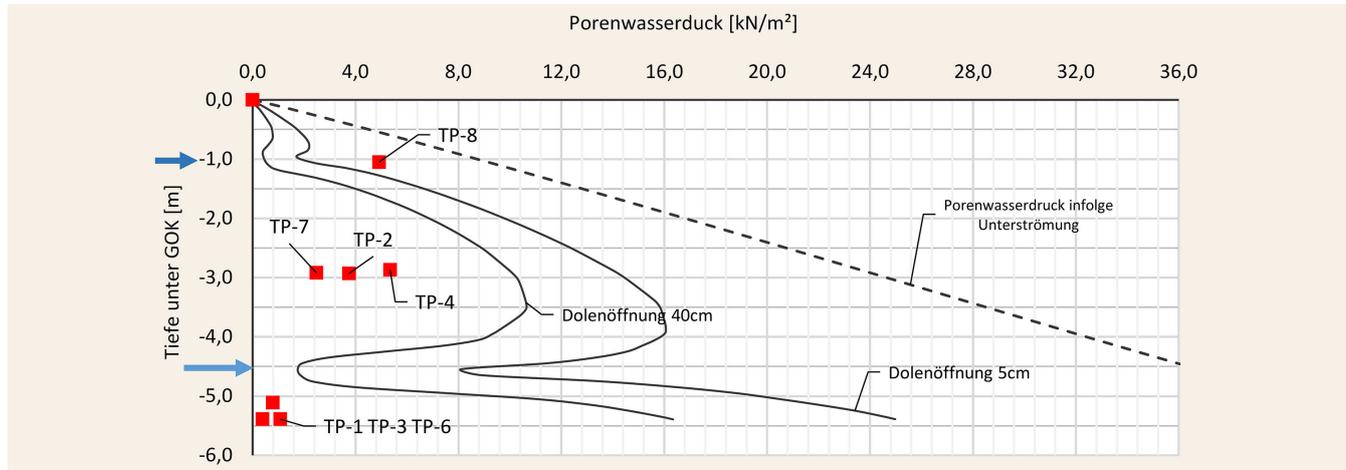


Bild 14. Vergleich der gemessenen und berechneten Porenwasserdrücke in Abhängigkeit der Tiefe im Tödterbach, Betonsperre
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 14. Comparison of measured and calculated pore water pressures in relation of depth in the Toedterbach, concrete barrier.
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

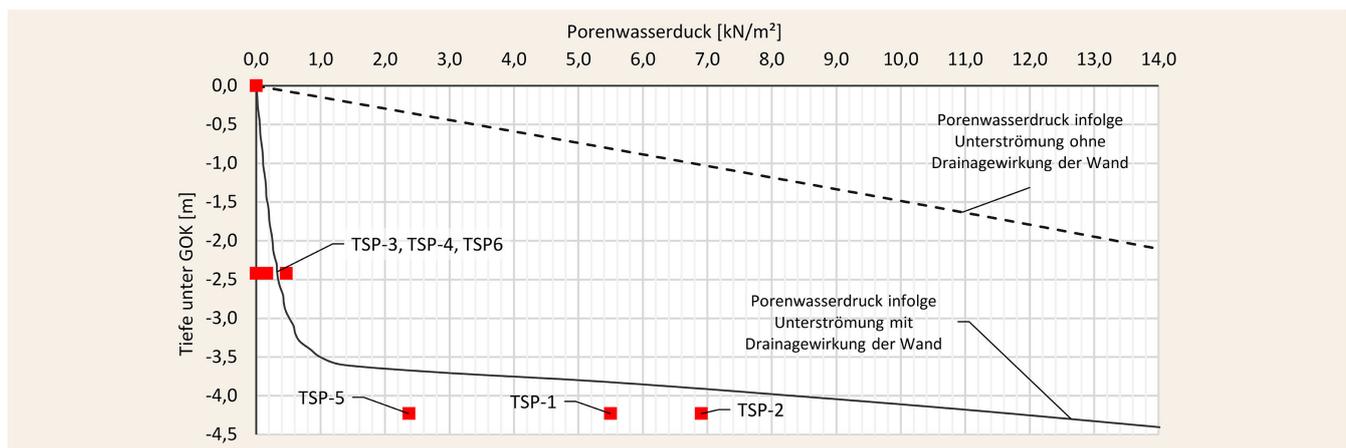


Bild 15. Vergleich der gemessenen und berechneten Porenwasserdrücke in Abhängigkeit der Tiefe im Tödterbach, Stahlsperre
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 15. Comparison of measured and calculated pore water pressures in relation of depth in the Toedterbach, steel barrier.
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

hardsbach, ein Reibungswinkel von $\varphi = 40^\circ$ berücksichtigt. Die vier Einwirkungsfälle $E_{k,i}$ gemäß [1] sind:

– E_{k1} ...ohne Drainage, Abdichtung entlang der Bachsohle, kein Wasserdruck

$$E_{k1} = 1/2 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_h \quad (1)$$

– E_{k2} ...ohne Drainagen, vollständig wassergesättigt

$$E_{k2} = 1/2 \cdot \gamma' \cdot H^2 \cdot K_h + 1/2 \cdot \gamma_w \cdot H^2 \quad (2)$$

– E_{k3} ...mit geneigter Drainage (Neigung ca. $45^\circ + \varphi/2$) [5]

$$E_{k3} = 1/2 \cdot \gamma_r \cdot H^2 \cdot K_h \quad (3)$$

– E_{k4} ...mit vertikaler Drainage hinter der Wandmauer

$$G = 1/2 \cdot \gamma_r \cdot H^2 \cdot \tan(90 - \vartheta) \quad (4)$$

$$\vartheta = 45^\circ + \varphi/2 \approx 65^\circ \quad (5)$$

$$E_{k4} = (G - P \cdot \cos 65) \cdot \tan(65 - \varphi) + P \cdot \sin 65 \quad (6)$$

Die Kraft P wird in Anlehnung an [1] als resultierende Wasserdruckbelastung normal auf die Gleitfläche (Gleitflächenwinkel ϑ) bestimmt. Zusätzlich wirkt eine vertikale Drainage entlang der Konsolidierungssperre, wodurch der Porenwasserdruck entlang der Wandfläche und am Fußpunkt der Konsolidierungssperre mit Null angenommen werden kann, da eine vollständige Ableitung des Wassers unterhalb des Bauwerks vorhanden ist. Die Gesamtbelastung wird je nach Konstruktionstyp (mit oder ohne Dolen) und der Durchlässigkeit des Materials als Summe der oben angeführten Fälle 1 bis 4 wie folgt berechnet.

$$E_k = (E_{k1} \cdot f_1 + E_{k2} \cdot f_2 + E_{k3} \cdot f_3 + E_{k4} \cdot f_4) \cdot h_m \cdot c \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^4 f_i = 1 \quad (8)$$

mit:

$f_{1,2,3,4}$ = Modellfaktoren zur Gewichtung der einzelnen Einwirkungsfälle

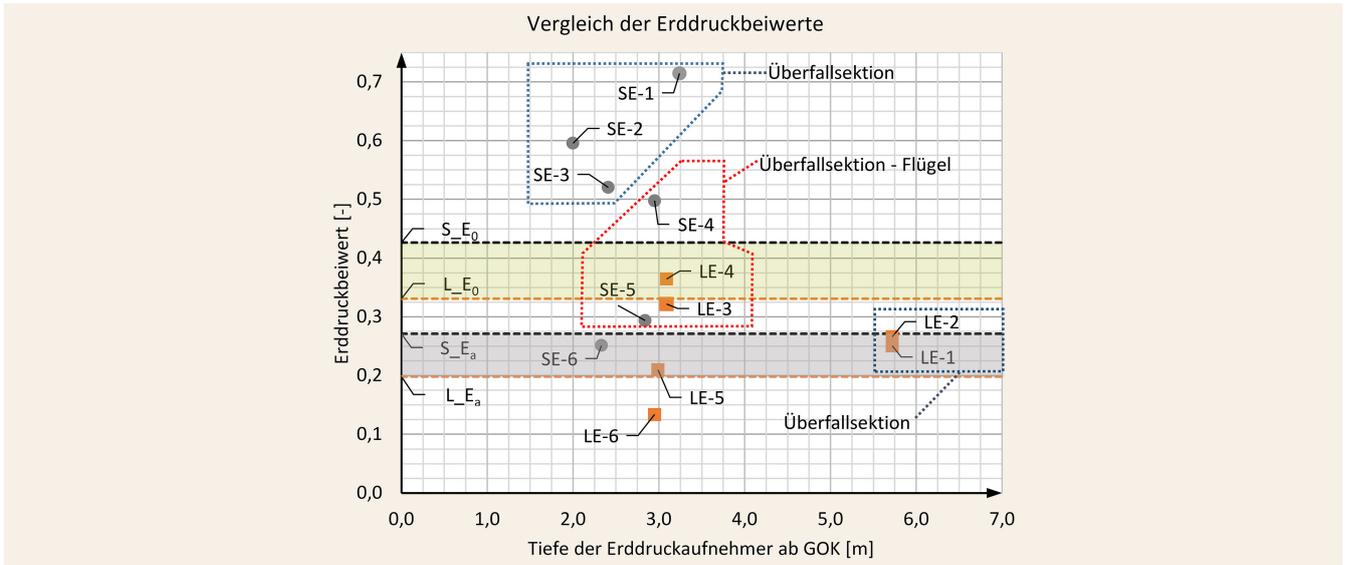


Bild 16. Vergleich der gemessenen Erddruckbeiwerte (SE-X Schlickerbach/LE-X Leonhardsbach) mit dem aktiven Erddruckbeiwert (S_Ea Schlickerbach/L_Ea Leonhardsbach) und dem Erddruckbeiwert (S_E0 Schlickerbach/L_E0 Leonhardsbach) Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 16. Comparison of the measured earth pressure coefficients (SE-X Schlickerbach/LE-X Leonhardsbach) with the active earth pressure coefficient (S_Ea Schlickerbach/L_Ea Leonhardsbach) and the earth pressure at rest (S_E0 Schlickerbach/L_E0 Leonhardsbach)
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

Tabelle 5. Berechnung der Einwirkung auf die Konsolidierungssperren aus Beton auf Grundlage der Messergebnisse
 Table 5. Calculation of the impact on the concrete consolidation barriers based on the measurement results

	Tiefe unter GOK [m]	Erddruck [kN/m ²]	Erddruckspannungen		Wandhöhe [m]	Resultierende Erddruckkraft [kN/m]
			Wandunterkante	Mittelwert der Erddruckspannungen		
Schlickerbach Schnitt C-C	- 2,00	27,4	53,43	53,60	3,90	E _{k,mes} = 104,5
	- 2,41	28,5	46,12			
	- 3,24	50,9	61,26			
Leonhardsbach Schnitt A-A Schnitt B-B	- 3,09	20,9	43,96	41,04	6,50	E _{k,mes} = 133,4
	- 3,09	23,6	49,64			
	- 5,72	30,1	34,20			
	- 5,72	32,0	36,36			
Tödterbach Schnitt A-A	- 6,32	57,6	49,22	53,02	5,40	E _{k,mes} = 143,2
	- 6,32	66,5	56,82			

h_m = Modellfaktor zur Berücksichtigung der Höhe

c = Modellfaktor zur Berücksichtigung der Schadensfolgeklasse

Die nach [1] prognostizierten Grenzwerte der Modellfaktoren für f_i sind:

f_1 : 0 bis 0,2

f_2 : $\geq 0,5$

f_3 : 0 bis 0,2 je nach Drainagewirkung der künstlichen Hinterfüllung, bei selbstständiger Verlandung $f_3 = 0$

f_4 : 0 bis 0,3 je nach Drainagewirkung der künstlichen Dränage, bei selbstständiger Verlandung $f_4 = 0$

Für den nachfolgenden Vergleich werden die beiden Modellfaktoren (h_m und c) zu 1,0 angenommen. Gegenübergestellt werden die Messwerte im Bereich der Überfallsektion. Die Einwirkung auf die Konsolidierungssperren aus Beton im Schlickerbach, Tödterbach und Leonhardsbach werden aus den einzelnen Messdaten ermittelt. Die resultierenden Einwirkungen je Meter in Länge der Konsolidierungssperre werden in der **Tabelle 5** dargestellt.

Die einzelnen Einwirkungsfälle 1 bis 4 werden für jedes Sperrenbauwerk getrennt voneinander ermittelt und sind in **Tabelle 6** dargestellt.

Die Wahl des Erddruckbeiwertes wird in Anlehnung an die Konstruktionsquerschnitte der Sperrenbauwerke gewählt. Die Sperre im Schlickerbach weist eine massive Fundamentkonstruktion auf. Insbesondere dessen bergseitige Orientierung ermöglicht kaum eine ausreichende Verschiebung beziehungsweise Verdrehung für die Annahme eines aktiven Erddruckbeiwertes. Das Verhältnis zwischen Wandhöhe im Bereich der Überfallsektion mit

Tabelle 6. Ermittlung der resultierenden Einwirkungen nach [1] für die Fälle 1-4
 Table 6. Determination of the resulting actions according to [1] for cases 1-4

	Schlickerbach [kN/m]	Leonhardsbach [kN/m]	Tödterbach [kN/m]
Fall 1, E_{k1}	68,1	87,9	98,7
Fall 2, E_{k2}	118,2	265,7	206,9
Fall 3, E_{k3}	74,6	96,3	108,1
Fall 4, E_{k4}	64,51	127,72	117,70

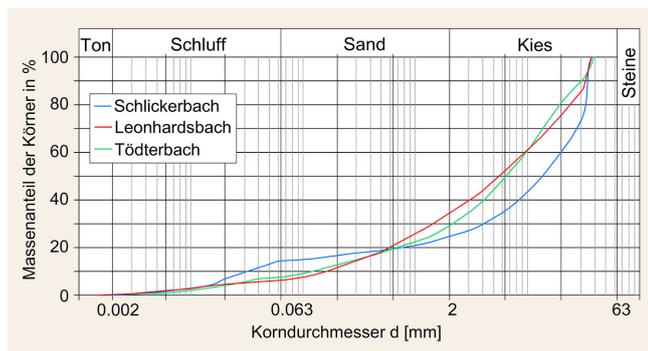


Bild 17. Korngrößenverteilung des Bodenmaterials der Konsolidierungssperren Schlickerbach Leonhardsbach und Tödterbach
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 17. Grain size distribution of the soil material of the consolidation barriers Schlickerbach Leonhardsbach and Tödterbach
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

Tabelle 7. Gewählte Modellfaktoren für die Konsolidierungssperren aus Beton im Schlickerbach, Leonhardsbach und Tödterbach
 Table 7. Selected model factors for concrete consolidation barriers in Schlickerbach, Leonhardsbach and Tödterbach

	Schlickerbach	Leonhardsbach	Tödterbach
f_1	0,1	0,2	0,2
f_2	0,7	0,5	0,6
f_3	0,2	0,2	0,2
f_4	0	0,1	0
$E_{k,i} \cdot f_i$	104,5	182,5	165,5
$E_{k,mes}$	104,8	133,4	143,2
$E_{k,mes}/E_{k,i} \cdot f_i$	1,00	1,37	1,16

3,9 m und der Länge des Fundaments circa 4,0 m beträgt nahezu 1. Die Annahme eines Erddruckbeiwertes in Höhe des Erdruehrucks ist damit plausibel. Für die Konsolidierungssperre im Leonhardsbach ist kein Fundament vorhanden. Es wird diesbezüglich der aktive Erddruck bei der Ermittlung der einzelnen Einwirkungsfälle berücksichtigt. Die Konsolidierungssperre am Tödterbach weist zwar ebenfalls ein Fundament auf, ist aber im Vergleich zur Sperre im Schlickerbach von geringerer Dimension. Das Verhältnis zwischen Wandhöhe im Bereich der Überfallsektion mit 5,4 m und der Länge des Fundaments mit circa 2,8 m beträgt nahezu 2. Für die (rückverankerte) Sperre im Tödterbach wird damit ein erhöhter Erddruck mit $0,25 E_0$ und $0,75 E_a$ angenommen.

Für die Bestimmung der resultierenden Einwirkungen nach [1] sind neben der Wahl des Erddruckbeiwertes auch die Werte

der Modellfaktoren f_i zu bestimmen. Die Modellfaktoren f_3 und f_4 berücksichtigen eine eventuelle bergseitige Drainage. Für die Konsolidierungsbauwerke sind keine künstlichen Drainagen in Form von Drainageleitungen vorhanden. Die Dolen im Bereich der Überfallsektion ermöglichen aber eine Reduktion des Wasserdrucks, weshalb der Modellfaktor f_3 mit 0,20 berücksichtigt wird. Der Modellfaktor f_4 berücksichtigt einen vollständigen Abbau der Porenwasserdruckspannungen infolge einer am Mauerfuß vorhandenen Drainageleitung. Der Modellfaktor $f_4 > 0$ wird ausschließlich für das Sperrbauwerk im Leonhardsbach berücksichtigt und dadurch begründet, dass der Abbau des Wasserdrucks nicht durch ein Fundament behindert wird. Da dieser Effekt aber nicht ausschließlich vom Vorhandensein eines Fundaments abhängig ist, wird der Modellfaktor f_4 in den von [1] empfohlenen Grenzwerten zwischen 0 und 0,3, mit 0 bis 0,1 gewählt. Der Modellfaktor f_1 richtet sich in Abhängigkeit der Durchlässigkeit des Bodenmaterials innerhalb der empfohlenen Grenzwerte zwischen 0 und 0,2. Für die Sperren im Leonhardsbach und Tödterbach beträgt die Durchlässigkeit des Bodenmaterials circa 10^{-5} m/s. Die Durchlässigkeit für das Bodenmaterial im Schlickerbach beträgt circa 10^{-3} m/s. Ein undurchlässigeres Bodenmaterial begünstigt den Modellfaktor f_1 , woraus folgt, dass für die Bauwerke am Leonhardsbach und Tödterbach der obere Grenzwert mit $f_1 = 0,2$ und im Schlickerbach der Mittelwert mit $f_1 = 0,1$ gewählt wird. Der Modellfaktor f_2 ergibt sich somit aus der Differenz der Modellfaktoren f_1, f_3 und f_4 mit Berücksichtigung, dass die Summe der einzelnen Modellfaktoren $f_i = 1$ sein muss. Im nachfolgendem **Bild 17** können die Korngrößenverteilungen des Bodenmaterials, welches für die Hinterfüllung der Konsolidierungssperren verwendet wurde, entnommen werden.

Entsprechend der Erddrucktheorie ist im ersten Schritt der Ansatz des Erddrucks in Abhängigkeit der Verschiebungsmöglichkeiten der Sperre zu bestimmen. Mit den charakteristische Bodenkennwerte für das Hinterfüllmaterial sind die Erddruckspannungen zu ermitteln. Projektbezogen sind vom Sachverständigen für Wildbachverbauungen und dem Geotechniker die Faktoren f_1 bis f_4 empirisch festzulegen. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen die Faktoren f_1 bis f_4 unabhängig der Erddruckbeanspruchung sind.

4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse für die Belastungen mithilfe der Modellfaktoren

Nachfolgend werden die in der **Tabelle 7** gewählten Modellfaktoren f_i für die drei Konsolidierungssperren wiedergegeben. Sie erfüllen die oben beschriebenen Randbedingungen und zeigen, dass die Grenzwerte nach [1] eine konservative aber durchaus plausible Übereinstimmung mit den Messergebnissen liefern.

Die Bestimmung der Einwirkung auf Basis der empfohlenen Werte nach [1] ergibt im Vergleich zu den Messwerten eine mittlere Abweichung in Höhe von circa 17 %. Für die drei Konsolidierungssperren aus Beton liegen die prognostizierten Einwirkungen zudem immer auf der „sicheren“ Seite.

Werden die Anteile aus den einzelnen Modellfaktoren und den dazugehörigen Einwirkungen dimensionslos in Prozent dargestellt, sind die vorigen Überlegungen zu deren Abschätzung noch deutlich sichtbarer (**Bild 18**).

Der im **Bild 19** dargestellte Bereich I repräsentiert die Durchlässigkeit des Bodenmaterials. Geringere Durchlässigkeiten bedeuten einen höheren Anteil an der Gesamtbelastung. Mit III und

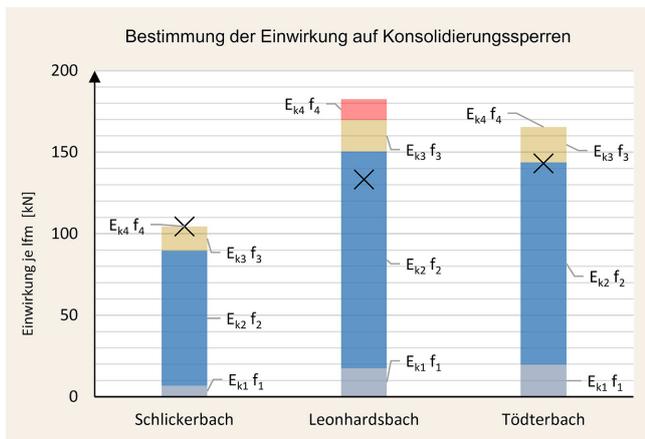


Bild 18. Bestimmung der Einwirkungen auf Konsolidierungssperren mit Hilfe der von [1] publizierten Fälle 1-4, Vergleich der berechneten Modellfaktoren mit den gemessenen Werten, Messwerte mit X dargestellt
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 18. Determination of the impacts on consolidation barriers using cases 1-4 published by [1], comparison of the calculated model factors with the measured values, measured values shown with X
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

IV wird der Potenzialabbau des Wasserdrucks durch Drainagen durch und unterhalb der Konsolidierungssperren berücksichtigt. Sperren Fundamente verringern den Einfluss und somit Anteil der Gesamtbelastung aus III und IV. Der mit circa 70 bis 80 %, auf die Gesamtbelastung bezogen größte Anteil von II, ergibt sich als Restanteil, beeinflusst durch die drei Faktoren I, III und IV. Die im Bild 18 gezeigten Ergebnisse zeigen, dass mit den Empfehlungen nach [1] auch die tatsächlich gemessenen Einwirkungen der Sperren plausibel ermittelt werden können.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Messungen über den Beobachtungszeitraum von 15 Monaten zeigen die relativ geringen Porenwasserdrücke in den Hinterfüllungskörpern der Konsolidierungssperren. Erkennbar ist, bei allen Sperrenbauwerken der Einfluss der temporären Umlegung des Gerinneverlaufes für die Bauzeit zum Endzustand, bei dem der Wildbach über die Konsolidierungssperre geführt wird. Auch ist der Einfluss der Dolen in den Porenwasserdrücken deutlich erkennbar. Die bereits in [1] abgeschätzten Modellfaktoren f_1 bis f_4 wurden durch die Messungen im Wesentlichen bestätigt und können für eine Bemessung angewendet werden. Diese Modellfaktoren stellen auf Grundlage der Feldmessungen eher konservative Werte dar. Alle mit den Modellfaktoren ermittelten rechnerischen Einwirkungen auf die Konsolidierungssperren liegen über den tatsächlichen gemessenen Erd- und Wasserdrücken während des Beobachtungszeitraumes. Wesentliche Einflüsse auf den Porenwasser- und Erddruck stellen die Fundamentabmessungen, die Drainagewirkung in der Hinterfüllung und im Baugrund, sowie die Dolengröße und Dolenzahl dar. Die erstmalige Ausführung einer Konsolidierungssperre als Stahlfachwerk hat sich außerordentlich bewährt. So konnte die Bauzeit gegenüber eine Betonsperre deutlich verkürzt (fünf Tage gegenüber vier Wochen) und die Hanganschnitte für die Einbindung der Sperrenflügel stark reduziert werden. Diese beiden Faktoren haben positive Auswirkungen auf die Arbeitssicherheit und verringern gleichzeitig das Risiko der Aktivierung einer Massenbewegung in den

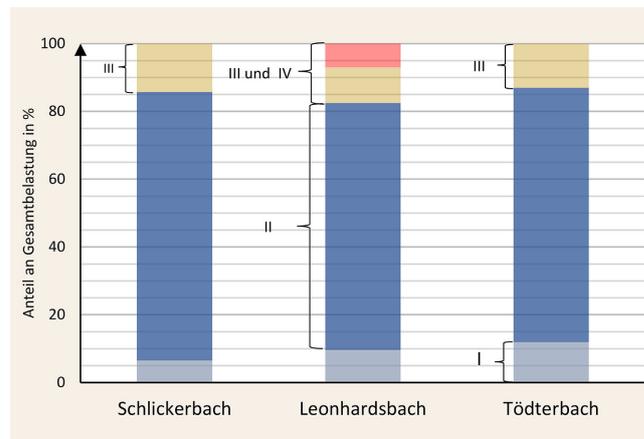


Bild 19. Dimensionslose Darstellung anteilmäßig an der Gesamteinwirkung
 Grafik: Arbeitsbereich für Geotechnik, Universität Innsbruck
 Fig. 19. Dimensionless representation proportional to the total impact
 Source: Unit of Geotechnical Engineering, University of Innsbruck

Hangflanken. Es ist geplant, die Messungen an den Bauwerken über einen längeren Zeitraum fortzusetzen, um mögliche Veränderungen der Wasserdrücke, bedingt durch die Reduktion der Drainagewirkung des Hinterfüllungsmaterials und des Untergrundes, zu erkennen.

Literatur

- [1] Hofmann, R.; Kolymbas, D.: Wasserdruck auf Konsolidierungssperren. In: Bauingenieur 95 (2020) Heft 6, S. 201-209.
- [2] ONR 24802 Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. 2011.
- [3] ONR 24800 Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und Ihre Definitionen sowie Klassifizierung. 2009.
- [4] ONR 24801 Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Statische und dynamische Einwirkung. 2013.
- [5] Lambe, T. W.; Whitman, R. V.: Soil Mechanics. SI version. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1979.
- [6] Böll, A.: Wildbach und Hangverbau. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 1997.
- [7] Eidgenössisches Amt für Straßen- und Flussbau: Dimensionierung von Wildbachsperren, Beton und Stahlbeton. Bern, 1973.



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Hofmann
 robert.hofmann@uibk.ac.at

Foto: R. Hofmann, 2018

Dipl.-Ing. Simon Matthias Berger
 simon.berger@uibk.ac.at

em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dimitrios Kolymbas
 dimitrios.kolymbas@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Lukas Wimmer
 Lukas.Wimmer@uibk.ac.at

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur
 AB für Geotechnik
 Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich