



Kevin Alfons Hatz, BSc

# **Hydraulische Optimierung der Querausleitung der Ulmendrainagen des Semmering-Basistunnels**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

Graz, Mai 2017

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

Betreuer der Diplomarbeit:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ

.....

Mitbetreuender Assistent:  
Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

.....

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit und im Speziellen beim Verfassen meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Für die Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz und Dipl.-Ing. Wolfgang Richter für die konstruktiven Diskussionen und die Hilfestellung bei jeder Art von Problemen. Ebenso bedanken möchte ich mich bei der ÖBB-Infrastruktur AG, im Besondern bei Dipl.-Ing. Oliver Kai Wagner, Dipl.-Ing. Tobias Schachinger und Dipl.-Ing. Petra Wolf, für die angenehme Zusammenarbeit und die Unterstützung mit Daten und Fachwissen.

Ich bedanke mich auch bei meinen Freunden und Studienkollegen des Stahlbauzeichensaals für die schöne gemeinsame Zeit und all die unvergesslichen Erlebnisse. Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitgliedern des Wasserbauzeichensaals für die produktiven Kaffeepausen in ihren Räumlichkeiten.

Vielen Dank an meine Familie, insbesondere an meine Eltern, für die moralische und finanzielle Unterstützung meines Studiums und für den Rückhalt Semester für Semester.

Ganz besonderer Dank gebührt meinem Bruder Dominik, dem besten Mitbewohner und Hausarzt, für die viele Geduld und Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit.

## Kurzfassung

Der Semmering-Basistunnel ist derzeit eines der größten im Bau befindlichen Infrastrukturprojekte Österreichs. Nach seiner Fertigstellung wird die Fahrzeit zwischen den Bahnhöfen Gloggnitz und Mürzzuschlag um 30 Minuten verkürzt. Davon profitiert, neben dem Personenverkehr, vor allem der Güterverkehr, da die neue Trasse für diesen uneingeschränkt befahrbar sein wird. Zusätzlich kann durch die Verlagerung von Individual- und Massenverkehr auf die Schiene CO<sub>2</sub> eingespart werden, da die Fortbewegung mit der Bahn, mit einer Emission von 14 g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer, um 12 mal klimafreundlicher als mit dem PKW (177 g CO<sub>2</sub>/Pkm) ist.

Betrieb und Instandhaltung solcher Infrastrukturanlagen stellen über die Jahre eine komplexe Herausforderung dar. Auch entscheidend ist hierbei der Umgang mit anfallenden Bergwässern. Das Drainagesystem soll eine nachhaltige Ableitung des Bergwassers ermöglichen und zusätzlich eine ökonomische Nutzung des Bauwerks gewährleisten (d.h. Sinterbildung in der Drainage ist zu vermeiden und der Wartungsaufwand des Systems sollte so gering als möglich sein).

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Möglichkeit die Sinterbildung mittels baulicher Maßnahmen zu reduzieren. Da Versinterungen unter anderem durch den Austausch des Bergwassers mit CO<sub>2</sub> entstehen, sollen Verwirbelungen, welche diesen Austausch fördern, reduziert werden. Dabei fokussiert sich die Untersuchung auf zwei Hauptpunkte: Im ersten Punkt wird mittels CFD-Berechnungen eine optimierte Ausführung der Ulmenausleitung entwickelt, welche nicht nur die Turbulenzen im Ablauf vermindert, sondern auch die Abflussleistung des Wehrs erhöht. Im zweiten Punkt wird versucht die Einleitung in den Sammelkanal zu verbessern, wobei die numerischen Berechnungen zeigen, dass die in der Ausschreibungsplanung angedachte Konstruktion bei den gegebenen Randbedingungen die technisch und ökonomisch sinnvollste Variante darstellt.

Schlagwörter: Tunneldrainage, CFD-Modellierung, hydraulische Optimierung, Sinterbildung, Kalkablagerung

## **Abstract**

### **Hydraulic optimization of the sidewall-drainage outlet of the Semmering Base Tunnel**

The Semmering Base Tunnel is currently one of the largest infrastructure projects in Austria. After its completion it will reduce the travel time from Gloggnitz to Mürz-zuschlag by 30 minutes. Freight trains will especially benefit from the new route avoiding the steep inclinations (28‰) of the historic Semmering-Bahn. Furthermore traveling by train is 12-times more environmentally friendly as traveling by car.

Operation and maintenance of such infrastructures is a complex challenge. One essential reason for this is the handling of accruing mountain water. A drainage system is one technical way to ensure a sustainable dewatering of the tunnel-structure and enables an economical use of the infrastructure.

This master thesis investigates the possibility of reducing sinter formation by structural measures. Since sintering, among other things, is caused by the exchange of mountain water with CO<sub>2</sub>, swirls which promote this exchange should be reduced. Using 3D-CFD simulations this thesis focuses on two main points: The first one is the optimization of the sidewall-drainage outlet. By developing a new bed-geometry for the maintenance shafts turbulences are reduced and the discharge capacity of the weir is increased. The second point is the discharge of the sidewall drainage water into the collector duct. The calculations show that the tender design is, considering the given boundary conditions, the most technically and economically suitable solution.

Keywords:            tunnel drainage system, CFD-modelling, hydraulic optimization, sinter formation, lime scale

## Inhaltsverzeichnis

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung).....	ii
Danksagung .....	iv
Kurzfassung .....	v
Abstract.....	vi
Inhaltsverzeichnis.....	vii
1. Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Semmering-Basistunnel.....	2
2. Tunnelentwässerung.....	4
2.1 Verdrängung (druckwasserhaltende Abdichtungen).....	5
2.2 Teilentspannung (teilweise Ableitung).....	7
2.3 Drainierte Tunnel mit drucklosen Wasserabfluss .....	9
2.3.1 Bestandteile des Drainagesystems .....	10
2.3.2 Vor- und Nachteile eines Drainagesystems (Girmscheid, 2008):.....	12
3. Versinterung.....	13
3.1 Versinterungsmechanismen in Tunnel drainagen .....	15
3.1.1 Kohlendioxidanreicherung im Wasser (Girmscheid et al., 2003):.....	19
3.1.2 Versinterung durch kalkübersättigtes Wasser .....	20
3.1.3 Versinterung durch Erhöhung des pH—Werts des Bergwassers.....	20
3.1.4 Versinterung durch kohlensaures (kalkaggressive) Bergwasser.....	21
3.1.5 Versinterung durch Kalkhydrat-Lösung .....	21
3.1.6 Versinterung durch Mischwasserbildung .....	21
3.1.7 Exkurs Zementgebundene Baustoffe .....	22
3.2 Gegenmaßnahmen .....	23
3.2.1 Materialauswahl und Drainagedesign.....	23
3.2.2 Härtestabilisatoren .....	24
4. Entwässerung Semmering-Basistunnel .....	25
4.1 Ausleitung Ulmendrainage .....	28

4.2	Einleitung Sammelkanal.....	30
4.3	Vorgaben für hydraulische Optimierung der Querausleitung .....	32
5.	Berechnungstools für die Untersuchung .....	33
5.1	Erstellung der Geometrie: Rhino 5.0 .....	33
5.2	Pre-processing, CFD-Solver und Post-processing: Ansys Workbench 17.1 und Ansys CFX 17.1 .....	33
5.3	Exkurs CFD-Simulationen.....	34
5.3.1	k- $\omega$ -SST Turbulenzmodell (Shear Stress Transport).....	37
6.	Modellaufbau .....	38
6.1	Modelaufteilung .....	38
6.2	Allgemeine Arbeitsschritte.....	39
6.2.1	Erstellung der 3D-Geometrie.....	42
6.2.2	Solid und Netzgenerierung .....	42
6.2.3	Pre-processing .....	45
7.	Randbedingungen.....	46
7.1	Beschreibung der Berechnung.....	46
7.2	Modell und Fluideinstellungen.....	46
7.3	Randbedingungen bei Ein- und Auslaufelemente .....	47
8.	Ergebnisse der CFD-Simulation.....	48
8.1	Hydraulische Optimierung der Ulmenausleitung .....	48
8.1.1	Geometrievariation Streichwehr .....	50
8.1.2	Höhenanpassung Streichwehr .....	55
8.1.3	Optimierung Variante 5 der Ulmenausleitung .....	57
8.2	Hydraulische Optimierung der Einleitung in den Sammelkanal .....	62
8.2.1	Analyse der Varianten - Einleitung Sammelkanal .....	64
8.3	Einfluss der Drainageschlitze auf den Abfluss.....	69
8.3.1	Berechnungsansatz .....	70
8.3.2	Ergebnis.....	71
9.	Ausführungsvorschlag .....	76
9.1	Ulmenausleitung .....	76
9.2	Einleitung Sammelkanal.....	77

---

10. Schlussfolgerung.....	78
10.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	78
10.2 Ausblick .....	79
Literaturverzeichnis .....	80
Abbildungsverzeichnis .....	83
Tabellenverzeichnis .....	86
Anhang A .....	87
Anhang B .....	100

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Semmering-Basistunnel ist derzeit eines der größten und wichtigsten im Bau befindlichen Infrastrukturprojekte Österreichs und der Europäischen Union. Als Teil der Baltisch-Adriatischen Achse, wird der Tunnel, nach seiner geplanten Fertigstellung 2026, nicht nur die historische Semmeringbahn entlasten, sondern auch die Fahrzeiten auf der Südstrecke entscheidend verkürzen. Für Schnellzüge verkürzt sich die Fahrzeit zwischen den Bahnhöfen Mürzzuschlag und Gloggnitz von derzeit ca. 45 Minuten auf 15 Minuten. Gleichzeitig profitiert auch der Güterverkehr, da der Tunnel aufgrund seiner geringen Neigung auch für schwere Güterzüge uneingeschränkt befahrbar sein wird (die Semmeringbahn weist Steigungen von bis zu 28 ‰ auf). Zu guter Letzt profitiert von einer gestiegenen Attraktivität des Bahnnetzes auch die Umwelt. Mit einer Emission von 14 g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer ist die Fortbewegung mittels Zug um bis zu 12-mal klimafreundlicher als jene mittels PKW (ÖBB-Infrastruktur AG, 2016).

Betrieb und Instandhaltung stellen neben der Planung und baulichen Umsetzung solcher Infrastrukturanlagen eine komplexe Herausforderung dar. Ein wesentlicher Teil hierbei ist der Umgang mit anfallenden Wässern aus dem Gebirge. Planung und Ausführung des Drainagesystems sollen eine nachhaltige Ableitung des Bergwassers ermöglichen und zusätzlich einen möglichst geringen Wartungsaufwand der Drainage sicherstellen. Abhängig von Geologie und Ausführung kann das Auftreten von Ablagerungen und Inkrustationen zu gravierenden Mängeln in der Drainageleitung führen. Mit der Länge der Tunnelbauwerke und somit auch deren Entwässerungssystemen steigt die Gefahr von Sinterbildung. Gleichzeitig steigen hiermit auch die Kosten für die Erhaltung.

Durch bauliche Maßnahmen kann die Entstehung von Ablagerungserscheinungen minimiert sowie der gesamte Erhaltungsaufwand verringert werden. Ziel dieser Arbeit ist es mittels einer hydraulischen Optimierung der Querausleitung der Ulmendrainage, sowie der Einleitung in den Sammelkanal den Lufteintrag in das Drainagewasser zu minimieren wodurch die Bildung von Ablagerungen erschwert wird.

## 1.2 Semmering-Basistunnel

Die seit 2012 in Ausführung befindliche Trassenvariante „Pfaffensattel“ verbindet die Orte Gloggnitz in Niederösterreich und Mürzzuschlag in der Steiermark. Die beiden Tunnelröhren verlaufen dabei deutlich südlich der Semmeringbahn durch die Fischbacher Alpen. Der Regelachsabstand der beiden Röhren beträgt zwischen 40 – 70 m. Alle 500 m werden diese durch einen Querschlag miteinander verbunden. Der Höhenunterschied zwischen den beiden Portalen von ca. 240 m wird mit einer Steigung von 8,4‰ bewältigt. Die Ausbaugeswindigkeit des Tunnels beträgt 230 km/h.

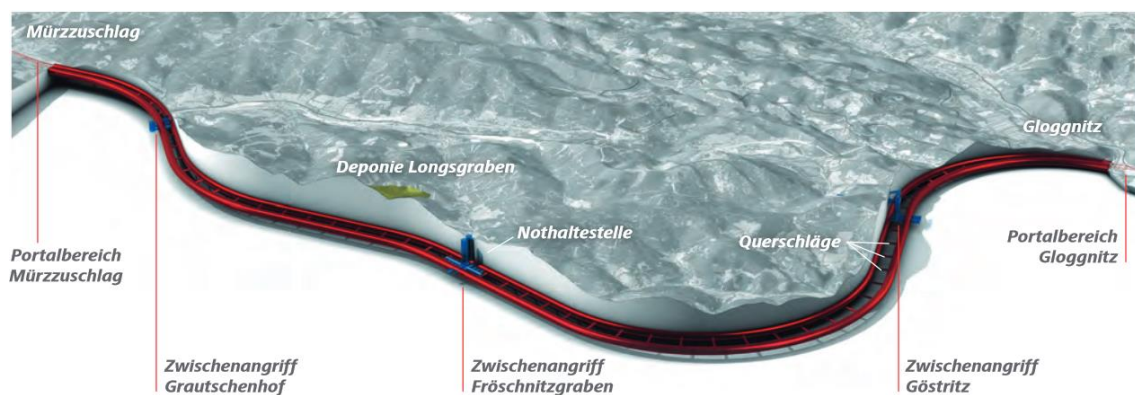


Abbildung 1 - Verlauf der Trassenvariante Pfaffensattel mit Zwischenangriffen (ÖBB-Infrastruktur AG, 2016)

Aus geologischen und bauphysikalischen Gründen wurde das Großprojekt in mehrere Bauabschnitte aufgeteilt:

- Das Bauabschnitt im Portalbereich Mürzzuschlag umfasst neben der Modernisierung des Bahnhofs auch die Anbindung an die bestehende Strecke sowie ein kurzes Stück Tunnel in offener Bauweise
- Im Ortsteil Grautschenhof der Gemeinde Spital am Semmering entsteht der erste Zwischenangriff. Dazu wird über zwei Schächte sowohl in Richtung Mürzzuschlag, als auch in Richtung Zwischenangriff Fröschnitzgraben vorgetrieben. Der Vortrieb erfolgt dabei nach der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode.

- Der zweite Zwischenangriff befindet sich im Fröschnitzgraben in der Nähe der Ortschaft Steinhaus am Semmering. Hier befindet sich der längste Abschnitt des Semmering-Basistunnels. Über zwei 400 m tiefe Schächte werden mehrere Kaverne aufgefahren. Hier befindet sich im fertigen Zustand eine 6000 m<sup>2</sup> große Nothaltestelle. Von dieser aus wird im Verfahren der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode ca. 4,3 km Richtung Mürzzuschlag vorgetrieben. In Richtung Gloggnitz werden, aufgrund der dafür geeigneten geologischen Verhältnisse, ca. 8,6 km mittels Tunnelbohrmaschine vorgetrieben
- Der Tunnelabschnitt Gloggnitz wird einerseits vom Zwischenangriff Göstritz als auch vom Portal aus im Bagger-Spreng Vortrieb aufgefahren. Zusätzlich wurden bereits zwei Eisenbahnbrücken über die Schwarza errichtet, sowie deren Hochwasserschutz erweitert

## 2. Tunnelentwässerung

Der Umgang mit Bergwasser war schon immer eine der größten Herausforderungen im Tunnelbau. Der Schutz der Konstruktion gegen unerwünschten Wassereintritt und Feuchtigkeit ist für einen langfristigen Erhalt der Funktionen eines Tunnels entscheidend. In fast allen Fällen von unterirdischen Bauarbeiten ist durch die Störungen der Klüfte im Gebirge ein Wassereintritt zu erwarten. Die Menge und der Druck des einfallenden Bergwassers kann stark variieren und ist unter anderem von der Hydrogeologie und dem Bergwasserspiegel des Gebirges abhängig. Der Umgang mit diesem Wasser ist nicht nur während der Bauarbeiten sondern auch während des Betriebs entscheidend. Dabei ist nicht nur die Menge des eintretenden Wassers von Bedeutung, sondern auch dessen chemische Zusammensetzung. Aggressive Wässer sorgen neben ihrer korrodierenden Wirkung auf die Bewehrung, auch für ein Auswaschen der Bestandteile von zementgebundenen Baustoffen. Die sich dabei im Wasser angereicherten Stoffe sorgen ebenfalls für Ablagerungen in den Drainagen, deren einwandfreie Funktion dadurch gefährdet ist.

Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts war es technisch und wirtschaftlich nicht möglich Tunnel druckdicht herzustellen, weshalb das Wasser zumeist mittels einer Drainageschicht zur Ulme geleitet, dort aufgefangen und anschließend in einem Sammelkanal abgeführt wurde (Abbildung 2) (Maidl et al., 2014).

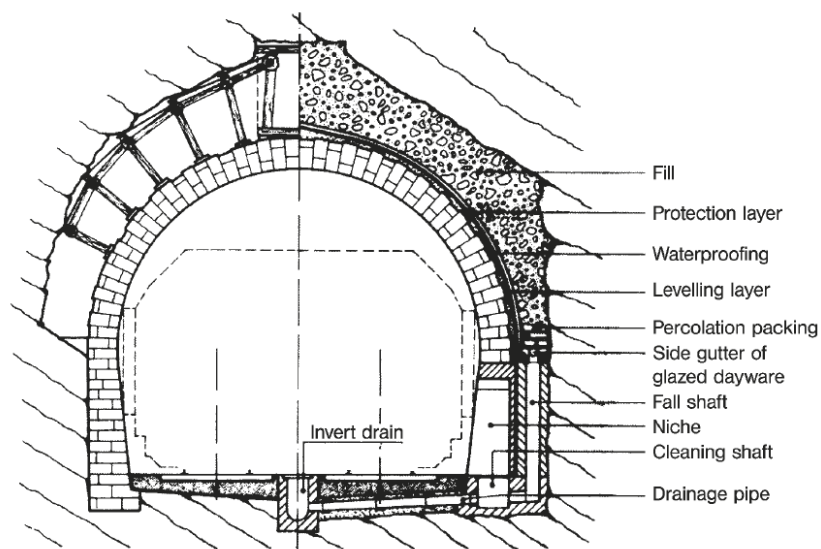


Abbildung 2 - Drainagesystem eines alten Eisenbahntunnels (Maidl et al., 2014)

Heute gibt es im Allgemeinen drei Möglichkeiten der Tunnelentwässerung (Chabot, 2002):

- Verdrängung (druckwasserhaltende Tunnelabdichtung)
- Teilentspannung (teilweise Ableitung mittels Drainage)
- Drainierte Tunnel mit drucklosem Wasserabfluss

## **2.1 Verdrängung (druckwasserhaltende Abdichtungen)**

Zur Herstellung von druckwasserhaltenden Tunnelabdichtungen gibt es viele verschiedene Möglichkeiten (Girmscheid, 2008):

- Wasserundurchlässigen Beton
- Dichtungsfolien (bituminöse Folien und Kunststofffolien)
- Kunststoffmodifizierte Mörtel
- Metallauskleidung (vorwiegend im Druckstollenbau)
- Injektionen

Die Vorteile einer druckdichten Ausbildung des Tunnelbauwerks liegen darin, dass der Bau keine dauerhaften Auswirkungen auf das umliegende natürliche Grundwasser-Regime hat. Zusätzlich spielt das Bergwasser in der Betriebsphase eine geringere Rolle da lediglich das fallweise durch Leckagen eintretende Bergwasser und die durch den Betrieb anfallenden Flüssigkeiten abgeleitet werden müssen.

Nachteile einer solchen Abdichtungskonstruktion sind die wesentlich höheren Baukosten aufgrund der stärkeren Ausbildung der Stützkonstruktion sowie aufwändigen Abdichtungsmaßnahmen. Um diese in Grenzen zu halten wird dieses Verfahren meist nur bis zu einer Wasserspiegelüberlagerung von maximal 30 m angewandt (technisch sind auch über 60 m möglich) (Chabot, 2002). Zusätzlich sind solche Bauten in der Regel nicht von Beginn an wasserdicht, sondern weisen zahlreiche Leckagen auf. Diese müssen unter großen Arbeits- und Kostenaufwand abgedichtet werden, was zu erheblicher Bauzeitverlängerung führen kann.

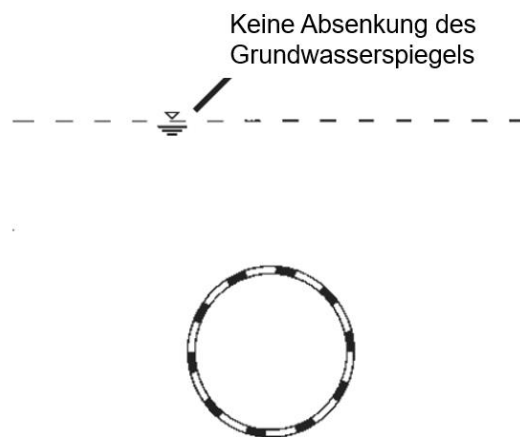


Abbildung 3 – druckwasserhaltende Abdichtung (Maidl et al., 2014)

## 2.2 Teilentspannung (teilweise Ableitung)

Zu einer teilweisen Verdrängung kommt es wenn das Bergwasser sich aufstaut und nicht mehr frei abfließen kann.

Dies ist bei einem druckhaltendem Tunnel mit Wasserdruckbegrenzung der Fall. Das Bergwasser wird anfangs verdrängt und erst bei Erreichen eines vordefinierten Wasserdrucks entlastet. Dadurch kann, im Vergleich zu einer drucklosen Drainage, die Wasserentnahme aus dem umliegenden Gebirge erheblich reduziert werden. Der Druck wird entweder durch ein Ventil oder die Größe der Öffnung reguliert.

Vorteil dieser Art der Tunnelentwässerung ist die nur geringe Absenkung des Grundwasserspiegels (Abbildung 4). Nachteilig sind die hohen Herstellungskosten sowie die geringe Erfahrung mit solchen Systemen (Maidl et al., 2014).

Zur teilweisen Verdrängung des Grundwassers kann es jedoch auch bei einer behinderten/funktionsunfähigen drucklosen Bergwasserableitung kommen. Durch fehlende bzw. verstopfte Drainageeinrichtungen kann es lokal zu einem Wasserrückstau und somit geringen Wasserdrücken kommen. In solchen Fällen muss meist aufwendig saniert werden.

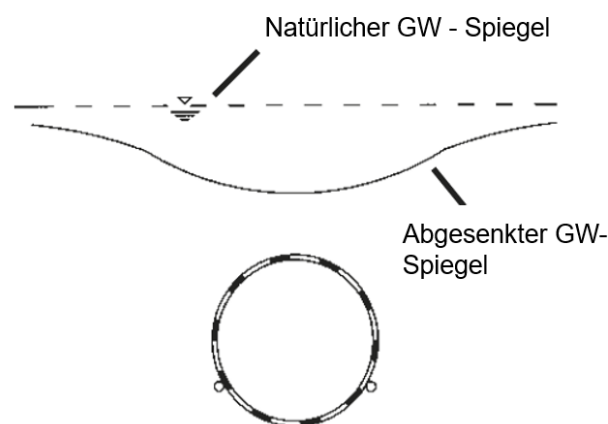


Abbildung 4 - druckregulierte Entwässerung (Maidl et al., 2014)

Soll eine Absenkung des natürlichen Bergwasserspiegels vermieden werden, können in Sonderfällen die den Tunnel umgebenden Klüfte im Fels mittels Injektionen verpresst werden. Dadurch verringert sich die Durchlässigkeit des Felsen und der Wasserdruck wird im Bereich des Injektionskörpers abgebaut. Erreicht das Wasser die Tunnelabdichtung wird es zur Drainage geleitet und dort aufgefangen.

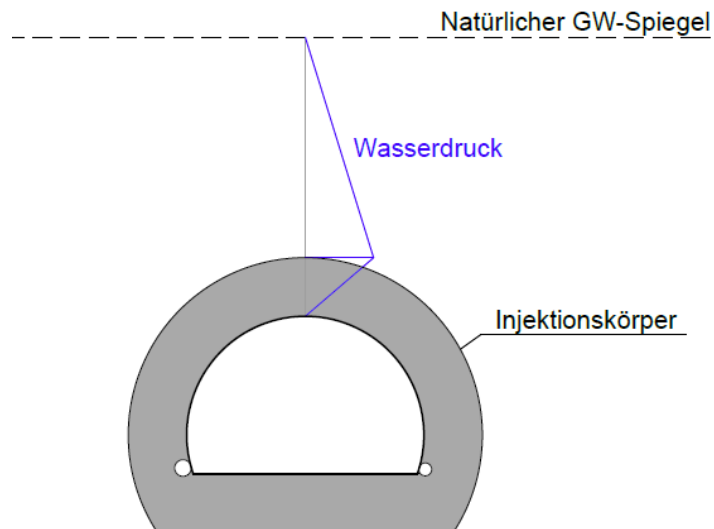


Abbildung 5 - Drainiert und Bergwasserdruck haltend

### 2.3 Drainierte Tunnel mit drucklosen Wasserabfluss

Aus wirtschaftlichen und auch baupraktischen Gründen kommen bei hohen Überlagerung oder geringem Wasseranfall meist drainierte Entwässerungssysteme zum Einsatz. Wenn erforderlich wird der Wasserandrang jedoch durch Injektionen im Zuge des Vortriebs bereits deutlich minimiert (siehe Seite 8). Bei dieser Ausführungsmethode ist vor allem die Gewährleistung eines drucklosen Abflusses über die gesamte Betriebsdauer zu beachten.

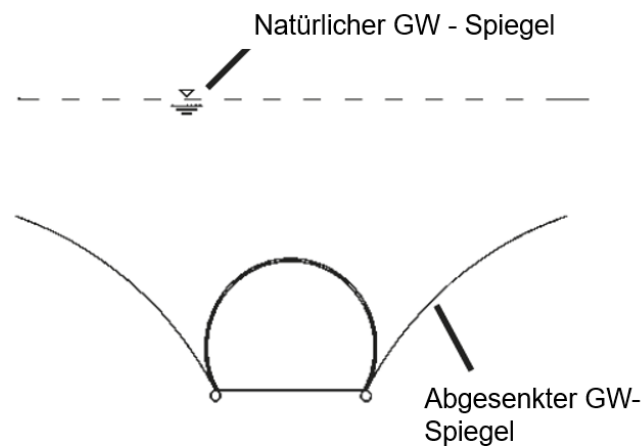


Abbildung 6 - Drainierter Tunnel mit drucklosen Abfluss (Maidl et al., 2014)

Beim Einsatz dieses Systems wird das Sicker- und Kluftwasser durch eine umliegende Abdichtung beidseitig zu den Ulmen geführt („Regenschirmprinzip“). Dort wird es von den Drainagen aufgefangen und abgeführt. Dadurch ist ein druckloser Abfluss gewährleistet und die Abdichtung muss nicht druckwasserhaltend ausgeführt werden.

### 2.3.1 Bestandteile des Drainagesystems

Das gesamte Entwässerungssystem wird hierbei in ein primäres und sekundäres Entwässerungssystem aufgeteilt (Chabot, 2002). Zum primären Drainagesystem zählen alle Teile der direkten Wasserfassung:

- **Flexible Halbschalen** die einen Abfluss entlang der Tunnelleibung gewährleisten.
- **Noppenbahnen und Drainagematten** dienen dazu das anstehende Bergwasser an Gewölbe und Sohle flächenhaft zu entspannen und zur Öffnung in der Auskleidung zu leiten.
- **Drainagerohre** welche quer zur Tunnelachse eingelegt werden um z.B. Quellen zu fassen.
- **Sickerpackungen** zur Gewährleistung eines druckfreien Zulaufs.

Diese Elemente sind nach dem Einbau nicht mehr zugänglich und sollten deshalb zur Gewährleistung einer einwandfreien Funktion großzügig dimensioniert werden.

Das sekundäre Drainagesystem beinhaltet alle nach dem Einbau noch zugänglichen bzw. wartbaren Teile.

- **Ulmen- bzw. Sohl drainage** sollten ausreichend groß dimensioniert werden (Durchmesser  $\geq 250$  mm) und auf der Innenseite möglichst glatt sein. Die Schlitze sollten eine Öffnungsweite zwischen 5 – 10 mm aufweisen und die Wassereintrittsfläche sollte bei Teilsickerrohren mind  $200 \text{ cm}^2/\text{m}$  betragen (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010).

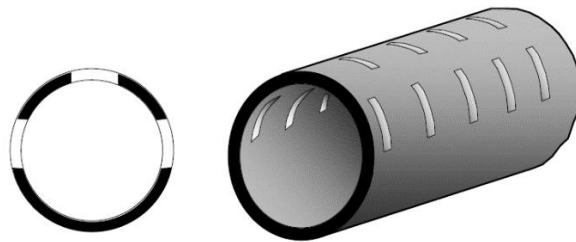


Abbildung 7 - Beispielhafte Skizze eines Drainagerohrs (SBB CFF FFS, 2010)

- **Stichleitungen** dienen dazu, das in der Drainage gefasste Wasser ab einer bestimmten Menge in den Sammelkanal zu leiten.
- Der **Sammelkanal** leitet das Wasser in Richtung Portal bzw. zur nächsten Fassung. Er sollte ausreichend groß dimensioniert sein um ein Zuschlagen des Rohres zu vermeiden.
- **Kontroll- und Putzschächte** dienen dem Zugang zum Drainagesystem für Kamerabefahrungen oder Wartungsarbeiten.

### 2.3.2 Vor- und Nachteile eines Drainagesystems (Girmscheid, 2008):

#### Vorteile einer Tunneldrainage:

- Es muss bei der Bemessung der Innenschale kein bzw. nur ein geringer Druck angenommen werden.
- Die Ausführung einer Abdichtung gegen druckloses Wasser ist technisch wesentlich einfacher und preislich günstiger.

#### Nachteile einer Tunneldrainage

- Durch das Ausfallen der im Bergwasser gelösten Stoffe (Kalk und gelöste Betonbestandteile) kann die Funktionsfähigkeit des Systems gefährdet werden.
- Die dauerhafte Funktion der Drainage erfordert erheblichen Wartungsaufwand.
- Bei durchlässigen Gebirgen kann der Wasserandrang enorm sein.
- Die Entnahme von Wasser geht immer mit dem Absenken des natürlichen Wasserspiegels einher.

### 3. Versinterung

Als Versinterung wird jener Vorgang beschrieben, bei dem aus fließendem Wasser Minerale ausgeschieden werden. Diese lagern sich anschließend an der Sohle ab. Man spricht von Sinter.

In der Natur ist dieser Prozess oft in Form sogenannter Sinterstufen (auch Sinterterrassen) in Kalksteingebieten, zu beobachten. Die ausfallenden Mineralien bilden dabei eine Stufe, welche das Wasser überfließen muss. Dabei Verdunstet ein Teil des Wassers. Zusätzlich entgast Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus dem Wasser. Entgegen der Erosion durch das die Stufe, überströmende Wasser wachsen diese langsam. Bekannte Beispiele hierfür sind die Kalksinterterrassen im türkischen Pamukkale oder die Plitvicer Seen im gleichnamigen kroatischen Nationalpark (Spektrum Akademischer Verlag, 2017).

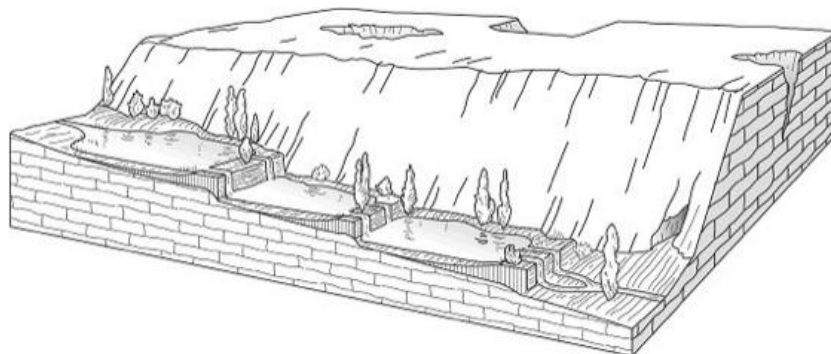


Abbildung 8 - Schematische Darstellung einer Sinterstufe  
(Spektrum Akademischer Verlag, 2017)



Abbildung 9 – Kalksinterterrassen in Pamukkale, Türkei (Thinkstock, 2013)

Auch bei der Konstruktion von Wasserversorgungsleitungen spielt der Effekt der Versinterung seit jeher eine Rolle. Bei dem 2004 im Zuge eines Forschungsprojekts entdeckten Wasserversorgungstunneln der Dekapolis (einem Städtebund aus der Zeit ~1. Jh.v.Chr. im Grenzgebiet zwischen Syrien und Jordanien) lassen sich anhand der Versinterung die damaligen Wasserstände in den Aquädukten und Tunneln bestimmen. Schon damals wurde versucht die Strömung möglichst laminar zu gestalten. Einerseits um Verluste zu minimieren, andererseits um die Bildung von Ablagerungen (unter anderem Sinter) zu vermeiden. Als Gegenmaßnahme wurden Schachtwand und Sohle verputzt um eine möglichst glatte Oberfläche zu erhalten (Döring, 2016).

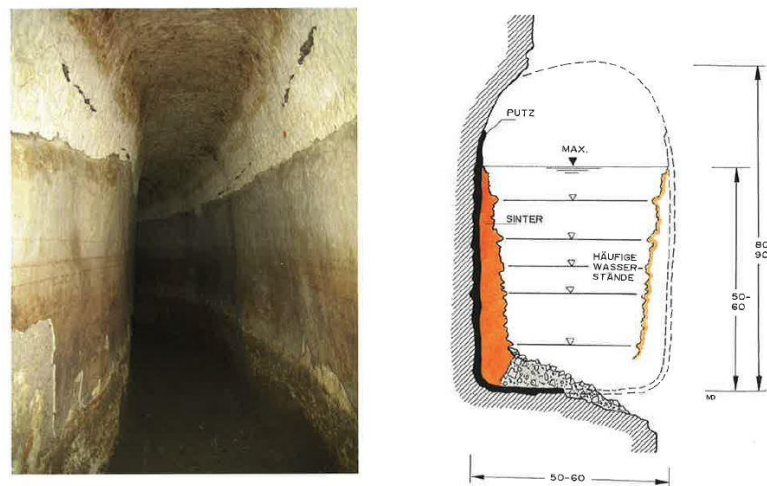


Abbildung 10 – (a) verputzter Schacht; (b) Wasserstandsbestimmung aufgrund der Sinterablagerungen (Döring, 2016)

### 3.1 Versinterungsmechanismen in Tunnel drainagen

In Tunnelsystemen anfallende Bergwässer weisen teils einen hohen Gehalt an gelösten Inhaltsstoffen auf. In der Regel führt dies zu sehr robusten Sinter bzw. Kalkablagerungen in Tunnel drainagen und bringt einen erheblichen Instandhaltungsaufwand mit sich.

Die Sinter verursachenden Inhaltsstoffe der Bergwässer kommen zum Teil aus dem Grundwasser selbst, d.h. sie werden während dem Sickers durch das natürlich gewachsene Erdreich aufgenommen (vor allem bei kalzium- und karbonatreichen Wässern). Zusätzlich hat auch die Interaktion mit zementgebundenen Baustoffen (z.B. Spritzbetonauskleidungen, Injektionsmaterialien, Zusammensetzung Perlkies etc.) großen Einfluss auf das Versinterungspotential dieser Wässer. Zusammenfassend kann also festgestellt werden, *dass die Auflösungs- und Abscheidungsprozesse im Wesentlichen von der Zusammensetzung der Bergwässer, den Materialien, die für den Bau des Tunnel verwendet wurden und den spezifischen Vorgaben der Tunnelkonstruktion abhängig sind (Dietzl et al., 2008).*

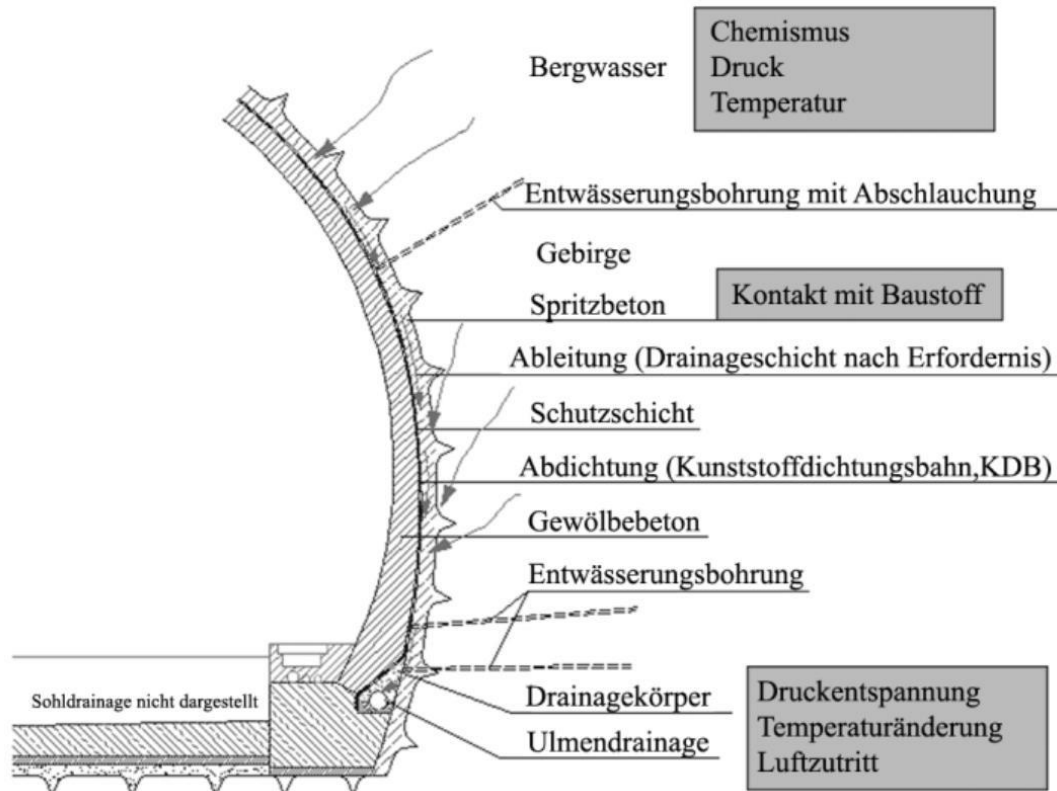


Abbildung 11 - Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage  
inkl. der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Versinterung (Kusterle et al., 2011)

Wie bereits zuvor erwähnt führen solche Ablagerungen zu einer Verengung der Rohrquerschnitte und im schlimmsten Fall sogar zum Vollverschluss. In weiterer Folge führt dies zu einem Überspülen der Fahrbahnoberfläche bzw. des Oberbaus oder an der Außenverkleidung druckhaft anstehendem Wasser. Für diese zusätzliche Belastung sind die Tunnelgewölbe i.d.R. nicht ausgelegt wodurch die Standsicherheit des Tunnels gefährdet ist. Um solche Schäden zu vermeiden werden die Drainageleitungen regelmäßig gespült. Hierbei ist zu erwähnen dass zumeist die ganze Leitung und nicht nur die Haupteintrittspunkte des Wassers gespült werden, so dass sich lösender Sinter ausgespült wird und die Ablagerungen sich mehr oder weniger konstant über die Abflussstrecke bilden (Girmscheid et al., 2003).

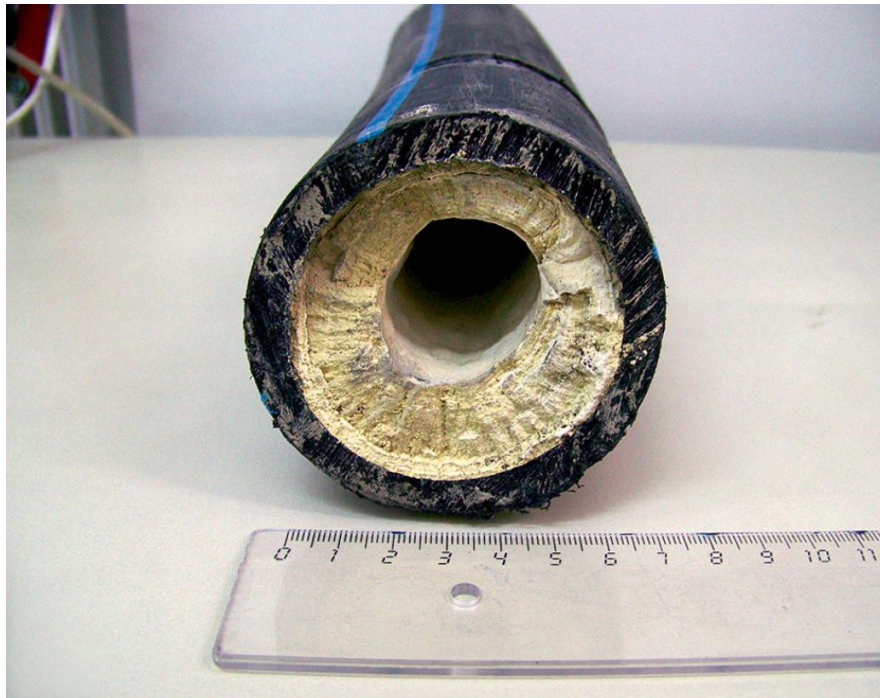


Abbildung 12 - Kalzitsinter in einer Drainageleitung des Koralmtunnels (Dietzel et al., 2008)

Die chemischen Prozesse die zur Versinterung in den Entwässerungseinrichtungen der Tunnel führen sind vielfältig und stehen sehr oft im Wechselspiel zueinander. Dies führt dazu, dass in vielen Fällen eine klare Abgrenzung der sinterbildenden Faktoren gar nicht möglich ist. Nach der *Richtlinie Tunnelentwässerung von 2010* der Österreichischen Vereinigung für Beton und Bautechnik und anderer Fachliteratur (z.B. *Girmscheid, Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008*) lassen sich 5 Mechanismen unterscheiden. Die Interaktion der verschiedenen Mechanismen wird in Abbildung 13 dargestellt.

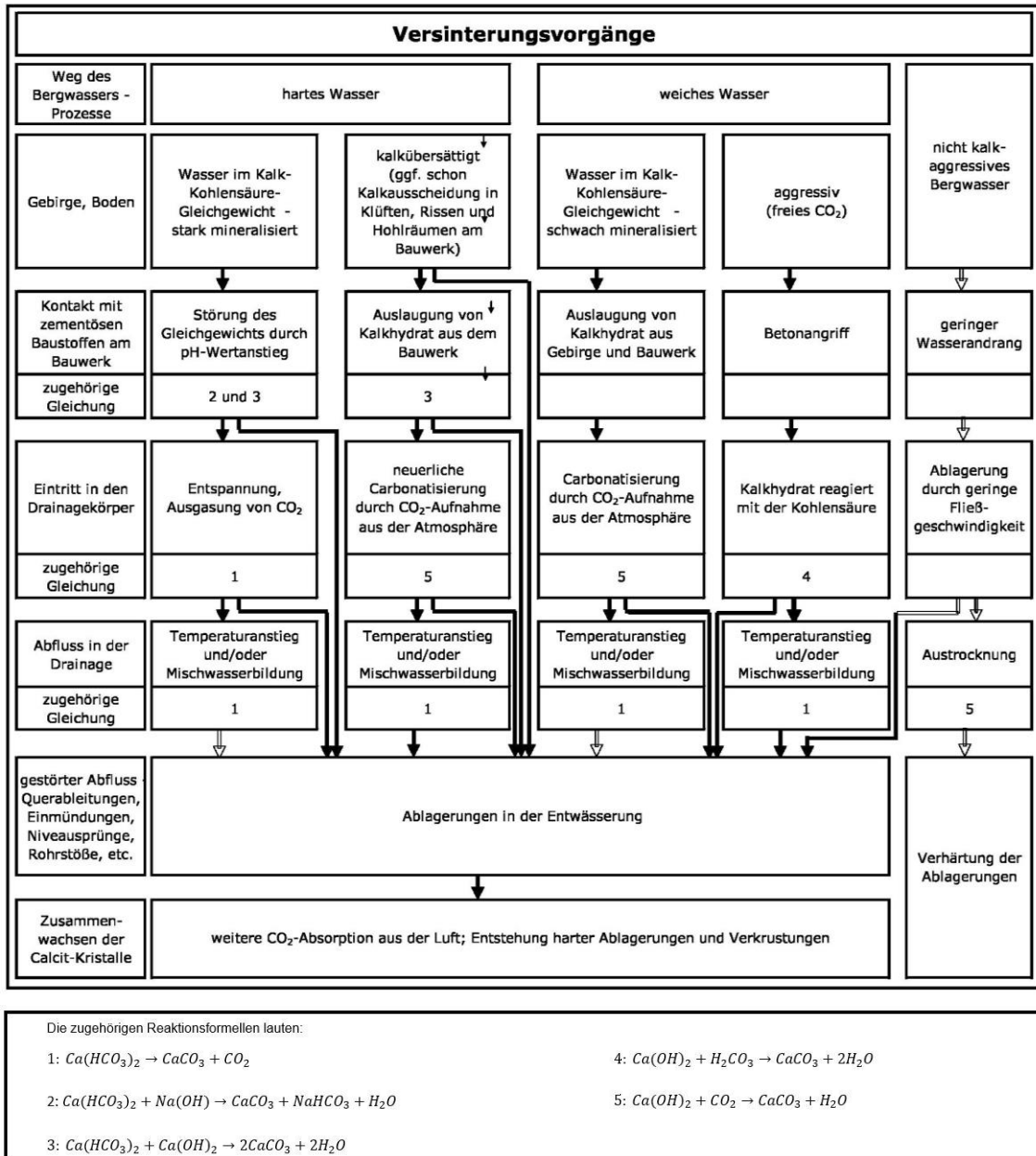


Abbildung 13 - Versinterungsvorgänge (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010)

Die 5 verschiedenen Versinterungsmechanismen lauten demnach wie folgt, und werden danach im Einzelnen genauer betrachtet:

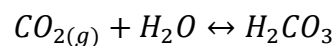
- Versinterung durch kalkübersättigtes Wasser (Abnahme des Kohlendioxidgehalts)
- Versinterung durch Erhöhung des pH—Werts des Bergwassers
- Versinterung durch kohlen-saures (kalkaggressive) Bergwasser

- Versinterung durch Kalkhydrat-Lösung
- Versinterung durch Vermischung chemisch unterschiedlicher Bergwässer

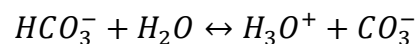
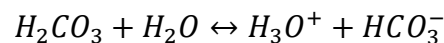
### 3.1.1 Kohlendioxidanreicherung im Wasser (Girmscheid et al., 2003):

Grundwässer reichern sich während des Sickerns im Boden mit Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) an. Man spricht von einem Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, welches für fast 80% der im Wasser gelösten Stoffe verantwortlich ist. Für dieses Gleichgewicht sind im Wesentlichen zwei **Säure-Basen-Reaktionen** verantwortlich:

**Die Lösung von Kohlendioxid im Wasser** und die Bildung von Kohlen-säure durch Hydratation. Dieser Prozess läuft sehr langsam ab, weshalb nur ca. 1% des im Wasser gelösten CO<sub>2</sub> Hydrats zu Kohlensäure hydratisiert:



Die nun im Wasser gelöste Kohlensäure dissoziiert sehr schnell in 2 Stufen zu einem **Hydrogencarbonat-Anion** und **Carbonat-Anion**

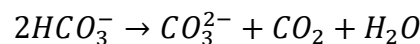


Alle 3 genannten Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen – laufen also in beide Richtungen gleich ab. Es ist jedoch zu beachten dass die Löslichkeit von Kohlendioxid (wie bei allen Gasen) sich mit steigendem Partialdruck erhöht. Mit steigender Tiefe steigt der Gesamtdruck und mit ihm ebenso der Partialdruck. In Folge wird mehr Kohlenstoff gelöst.

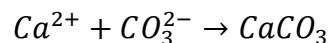
Während das Wasser Richtung Grundwasser bzw. Grundwasserleiter sickert löst es, aufgrund seines hohen Gehalts an Kohlensäure, Kalkstein auf (die Löslichkeit von Kalkstein steigt bei einem höheren Gehalt an Kohlensäure deutlich).

### 3.1.2 *Versinterung durch kalkübersättigtes Wasser*

Tritt das Grundwasser nun im Tunnel aus, ist dessen Partialdruck i.d.R. deutlich höher als jener der in der Atmosphäre des Tunnels herrscht. Der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck des Wassers ist nun geneigt sich an die Druckverhältnisse im Tunnel anzupassen. Um das Kohlendioxidissoziationsgleichgewicht dabei zu halten, dissoziiert das Hydrogencarbonat zu Kohlendioxid und Carbonat-Ionen. Im Zuge dieses Ausgleichs nimmt der  $\text{CO}_2$  Partialdruck der Lösung ab und der pH-Wert steigt:



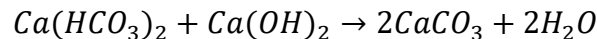
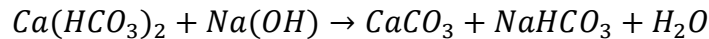
Dadurch nimmt der Anteil an Carbonat-Ionen in Relation zu dem restlichen gelösten anorganischen Kohlenstoff zu. Das Löslichkeitsprodukt von Kalziumkarbonat wird überschritten und es kommt zu einem Ausfällen von Kalzit Kristallen, welche sich in den Rohrleitungen ablagern:



Die Geschwindigkeit dieses Vorgangs ist im Wesentlichen vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Wassers im Drainagerohr abhängig. Befindet sich das Wasser in Ruhe, läuft der Vorgang relativ langsam ab. Problematisch sind hingegen turbulente Strömungen, da das  $\text{CO}_2$  immer an neue Grenzflächen gelangt und somit schneller entweichen kann. Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Effekt durch einen möglichst strömungsberuhigten Ausfluss, aus der Ulmendrainage in die Sammelleitung auszunutzen und somit die Versinterungen ein Stück weit zu minimieren.

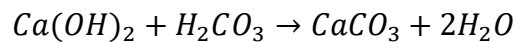
### 3.1.3 *Versinterung durch Erhöhung des pH—Werts des Bergwassers*

Diese Form der Versinterung tritt durch die Einwirkung von Natriumhydroxid und Kalkhydrat auf. Kommt carbonathartes Bergwasser in Kontakt mit zementgebundene Baustoffen steigt dessen pH-Wert. Bei der Neutralisation der Hydroxide im Entwässerungssystem fällt dann Kalk aus:



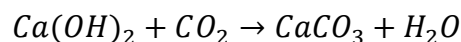
### 3.1.4 *Versinterung durch kohlensaures (kalkaggressive) Bergwasser*

Kommt stark kohlensaures Wasser in Kontakt mit zementgebunden Baustoffen löst es verstärkt Kalkhydrat ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) aus und es bildet sich eine kalkübersättigte Lösung. Durch die Neutralisation der Kohlensäure mit dem Kalkhydrat kommt es in weiterer Folge zur Kalkausscheidung:



### 3.1.5 *Versinterung durch Kalkhydrat-Lösung*

Dieser Effekt wird auch Tropfsteineffekt genannt und tritt bei sehr langsamen Fließgeschwindigkeiten bzw. Verdunstung auf. Hierbei reagiert das im Wasser gelöste Kalkhydrat nicht mit der im Bergwasser gelösten Kohlensäure sondern mit dem Kohlendioxid aus der Luft.



### 3.1.6 *Versinterung durch Mischwasserbildung*

Wie bereits erwähnt müssen Drainageleitungen nicht nur an jenen Stellen gereinigt werden, an denen stark kalkabscheidende Wässer in das System eintreten sondern über die gesamte Länge. Dies ist unter anderem auf den hier beschriebenen Effekt zurückzuführen. Durch die ständige Durchmischung des bereits im Entwässerungssystem befindlichen Wassers und dem neu eintretenden, verändern sich der Mineralstoffhaushalt und damit der Kalzitsättigungsindex des Wassers ständig. Dadurch kann es in zuvor noch nicht Sinter bildenden Abflüssen plötzlich zum Ausfall großer Mengen an Kalkabscheidungen kommen.

### 3.1.7 Exkurs Zementgebundene Baustoffe

Bei der Hydratation von Zement entsteht Kalkhydrat. Dessen Anteil kann bei einer Vollständigen Hydratation bis zu 20% des Zementklinkers betragen. Daraus folgt, dass aus allen zementgebunden Baustoffen beim Kontakt mit Wasser Kalkhydrat ausgewaschen werden kann.

Die Menge kann dabei, abhängig von der Zusammensetzung von Baustoff und Wasser, nicht unerheblich sein, und durchaus zur vollständigen Versinterung eines Drainagerohrs führen. Besonders in der ersten Phase nach dem Bau ist mit erheblichen Mengen an ausgewaschenem Kalkhydrat zu rechnen, was bei der Planung der ersten Reinigungsintervalle berücksichtigt werden sollte. Abhängig vom Bergwasser nimmt die Nachfuhr an Kalkhydrat aus den Baustoffinneren mit der Zeit langsamer ab (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010).

Die Menge an auslaugbarem Kalkhydrat kann durch die richtige Baustoffwahl entsprechend reduziert werden. In ersten Linie betreffen die Maßnahmen die Auswahl des Bindemittels:

- Bindemittel mit geringem Klinkeranteil
- Zement mit geringem Klinkeranteil
- Einsatz von Zusatzstoffen Typ II, bevorzugt AHWZ (aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309) oder Silikatstaub

Trotz der teilweise bereits guten Ergebnisse die mit diesen Maßnahmen erzielt werden konnten, zeigt sich ein enormer Unterschied an freigesetztem Kalzium abhängig vom der Art des zementgebundenen Baustoffs. So konnte bei Laborversuchen (Saxer und Draschitz, 2010) mit dem jeweils bestmöglichen Bindemittel nach 28 Tagen für Spritzbeton eine Menge von 0,1 kg/t freigesetztes Kalzium gemessen werden. Der niedrigste Wert für Injektionszement jedoch lag bei 0,55 kg/t. Jener für Anker Mörtel sogar beim 8-fachen dessen von Spritzbeton (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010).

## 3.2 Gegenmaßnahmen

Im Allgemeinen sind 2 Arten von Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verringerung von Versinterungseffekten sinnvoll:

- Materialwahl und Drainagedesign
- Härtestabilisatoren (Inhibitoren)

### 3.2.1 Materialauswahl und Drainagedesign

Materialauswahl bezieht sich in erster Linie auf die bereits besprochene Wahl der Bindemittel und Betonzusatzstoffe. Zusätzlich sorgen Materialien bzw. Bauteile mit geringer Porosität für eine Reduktion des löslichen Kalkhydrats.

Von großer Bedeutung kann die Abstimmung des Designs der Tunnelentwässerung hinsichtlich der Minimierung von Turbulenz und einer guten Zugänglichkeit für Spüleinrichtungen sein. Die *Richtlinie Tunnelentwässerung (2010)* gibt hier folgendes vor:

- Einfache und klare Konzeption des Entwässerungssystems mit gut ausgeformten Fließwegen und möglichst wenigen Achssprüngen bzw. Ausleitungen.
- Ableitung mit zügiger Strömung in gut gefüllten Rohren mit möglichst geringen Verwirbelungen und ohne Fallstrecken.
- Prioritäres Ableiten der Tunnelwässer in der Ulmendrainage. Diese ist so groß wie möglich zu wählen.
- Bergwasserzutritte deren chemische Eigenschaften sich stark voneinander unterscheiden sind nach Möglichkeit getrennt abzuführen. Bei Mischwässern kann die Versinterungsneigung stark zunehmen.
- Überschreiten die Bergwassermengen 50% der möglichen Abflussleistung der Ulmendrainagen sind Sammelleitungen einzuplanen.

- Querausleitungen dürfen erst bei entsprechender Abflussmenge anspringen und müssen genügend Wasser in der durchlaufenden Ulmendrainage belassen.
- Leichte Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten jeglicher Art.

### 3.2.2 *Härtestabilisatoren*

Die Anreicherung des Bergwassers mit Kalzit inhibierender und biologisch abbaubarer Polyasparaginsäure (PAS) ist ein mittlerweile häufig eingesetztes Mittel zur Härtestabilisierung. Die Zugabe kann dabei entweder über Tabletten oder in flüssiger Form mittels Dosierpumpen erfolgen. Tabletten haben den Vorteil, dass sie nur PAS an das Wasser abgeben wenn dieses auch zur Härtestabilisierung benötigt wird. Sie können direkt in die Sickerpackung bzw. in den Drainagekörper eingebaut werden. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass diese, wenn einmal verbraucht, dort nicht erneuert werden können. Zumindest die ersten Spitzen der Versinterung können somit jedoch ausgezeichnet abgedeckt werden.

Der Zugabe in flüssiger Form muss eine genaue Untersuchung hinsichtlich des Chemismus des Wassers vorausgehen. Die PAS kann dann in Tanks in den Wartungsschächten vorgehalten und die jeweils nötige Menge mittels Dosierpumpen dem Wasser beigemischt werden. Diese Art der Zugabe erfordert ständiges Monitoring, da bei zu hoher Zugabe die Konzentration an Chemikalien sehr hoch sein kann. Bei zu geringer Zugabe wird die Bildung von Ablagerungen jedoch nicht verhindert und der positive Effekt geht verloren (Sellner et al., 2008).

Die Anwendung von Härtestabilisatoren kann den wasserrechtlichen Tatbestand des Einleitens von Stoffen in Gewässern erfüllen, wird jedoch in den meisten Fällen genehmigungspflichtig sein (Westhoff, 2008).

## 4. Entwässerung Semmering-Basistunnel

Wie bereits in den einleitenden Kapiteln erwähnt, besteht zwischen den beiden Tunnelportalen Gloggnitz und Mürzzuschlag ein Höhenunterschied von 228,5 m. Aus konstruktiven sowie trassenbedingten Gründen und um die Steigungen entlang der Strecke minimal zu halten, entwässert der Tunnel über die gesamten 27,3 km in Richtung des tiefer liegenden Tunnelportals Gloggnitz. Somit ergibt sich eine konstante Steigung von 8,4 ‰.

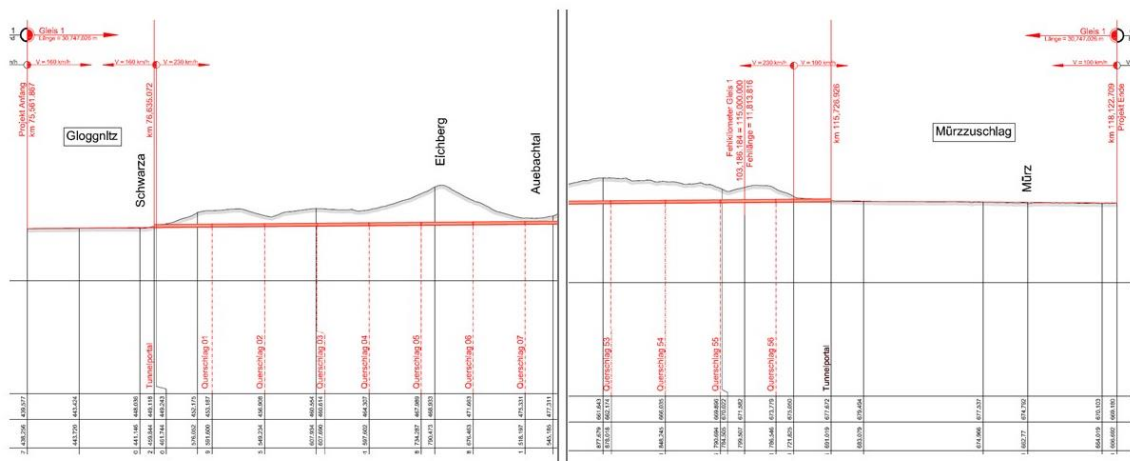


Abbildung 14 - Ausschnitt aus dem Übersichtslängenschnitt Gleis 1  
(Plan Nr.: 5510-EB-0100AL-05-0501-F01)

Die Entwässerung des Semmering-Basistunnels erfolgt drucklos nach dem sogenannten „Regenschirmprinzip“. Dabei wird das ankommende Sicker- und Kluftwasser mittels einer Abdichtungsschicht, zwischen Spritzbeton und Innenschale, entlang der Tunnelwand zu einer gebundenen Sickerpackung, welche die Ulmendrainage umgibt, geführt. Die Ausführung der Abdichtung kann dabei an den lokal vorhandenen Wasserzustrom angepasst werden. Die Entnahme erfolgt in diesem Sinne also konstant über die gesamte Länge der Ulmendrainagen (Abbildung 15 und Abbildung 16).

*Diese Arbeit und darin abgebildete Skizzen und Pläne beruhen auf der Planung für Bereiche mit zyklischen Vortrieb. Die Aussagen gelten aber sinngemäß auch für Bereiche mit kontinuierlichen Vortrieb.*



Das bedeutet sehr lange Fließzeiten des Wassers im Entwässerungssystem des Tunnels bei gleichsam sehr unterschiedlichen Wasserzutritten über die Längsentwicklung des Tunnels. Dadurch erhöht sich ebenfalls das Versinterungspotenzial, da das Wasser relativ oft über Streichwehre aus der Ulmendrainage entnommen und in den Sammelkanal umgeleitet werden muss. Diese Ausleitungen sind planmäßig alle 250 m angeordnet (ergibt über 400 Ausleitungen im gesamten Tunnel). Bei großen Wasserzutritten kann es jedoch zur Anordnung zusätzlicher Ausleitungen in den dazwischenliegenden Putzschächten kommen. Damit kann sich der Abstand der Ausleitungen auf 125 m reduzieren, was teils zu erheblichen Beunruhigungen im Wasserablauf führen kann (siehe Abbildung 17).

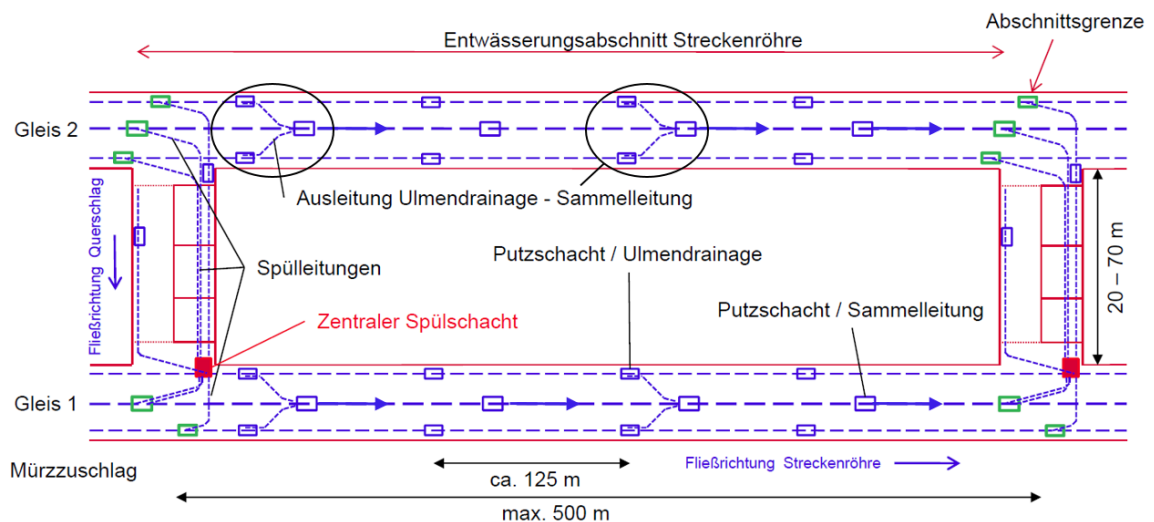


Abbildung 17 - Schema der Grundwasser-Entwässerung  
(Besprechungsprotokoll MA-SBT vom 14.07.2016)

Spülschächte für Instandhaltungsarbeiten werden alle 500 m in den Querschlägen angeordnet. Der Abstand zwischen dem Putzschacht in der Ulmendrainage und jenem im Sammelschacht ergibt sich aus den Blocklängen der Innenschale. Laut Plan ergibt sich daraus ein Abstand von ca. 6,4 m zwischen den jeweiligen Schachtachsen. Den Vorgaben nach könnte die Ableitung auch über 2 Blöcke erfolgen, eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Schächten bringt jedoch kaum Vorteile. Für das in der Ausschreibungsplanung angedachte System spricht neben nur geringer Änderungen der Ausschreibung auch der baupraktisch günstige kurze Verschneidungsbereich mit anderen Bauteilen.

#### **4.1 Ausleitung Ulmendrainage**

Wie in Abbildung 17 ersichtlich, erfolgt eine Ausleitung aus der Ulmendrainage in den Sammelkanal dem Entwässerungskonzept nach alle 250 m. Die Putzschächte der Ulmendrainage weisen ein Innenmaß von 60 x 140 cm auf. Die Entnahme aus der Ulmendrainage (DN/OD 250) erfolgt dabei mittels Streichwehr über die gesamte Länge des Schachts. Die gesamte Entnahmeeinrichtung wird als Fertigteil-Kunststoffgerinne ausgeführt. Das heißt, es kann im gesamten System mit den gleichen Rauigkeiten gerechnet werden. Im Ausschreibungsprojekt weist das Streichwehr eine Wehrhöckerhöhe von 10 cm auf – die Untersuchung einer eventuelle Erhöhung oder Absenkung ist Teil der gegenständlichen Arbeit.

Die Ausleitung aus dem Putzschacht Ulmendrainage in Richtung Sammelleitung erfolgt mittels eines Rohres DN/OD 200.

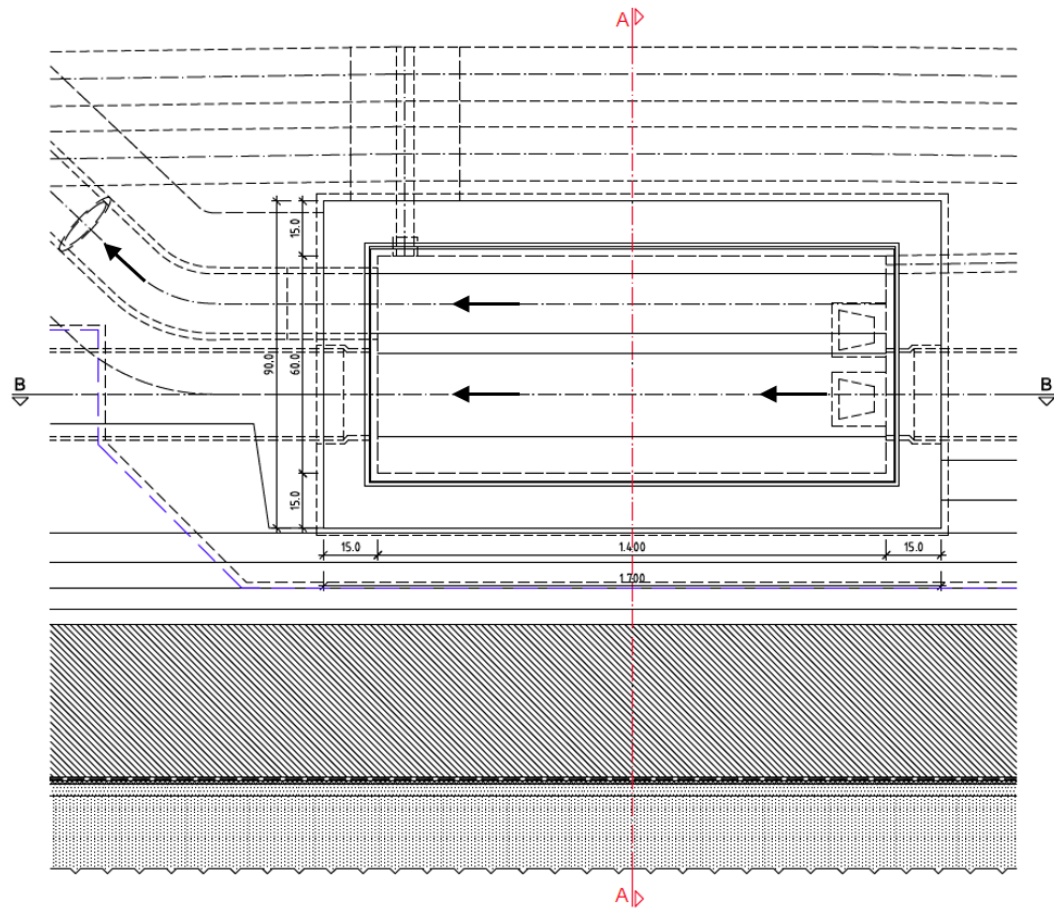


Abbildung 18 - Grundriss Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage laut Ausschreibungsplanung<sup>1</sup>

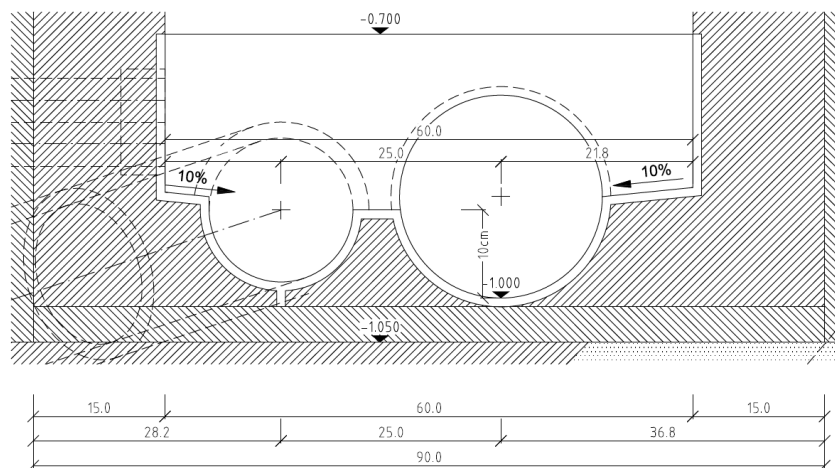


Abbildung 19 - Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage - Detail A<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bearbeiteter Ausschnitt der SBT Ausschreibungsplanung Plan Nr.: SBT3.1-AS-0800TU-03-0303-F01

## 4.2 Einleitung Sammelkanal

Die Lage des Sammelschachts ist von der Gleisachse abhängig (Schachtdeckel muss mittig auf der Gleisplatte liegen) und verläuft daher versetzt zur Tunnelachse unter dem Oberbau. Der Höhenunterschied zwischen Sohle-Ulmen-drainage und Sohle-Sammelkanal beträgt 0,95 m. Wie bereits erwähnt, liegen die Putzschächte der Ulmendrainage und jene der Sammelleitung immer 6,4 m versetzt zueinander. Da die Einleitung der Wässer vor dem Putzschacht erfolgen soll und der Abfluss im besten Fall in diesem bereits wieder so laminar als möglich fließen sollte, ergibt sich für die Führung der Einleitungsrohre nur ein sehr geringer Spielraum betreffend Einleitungshöhe und Winkel.

Die Putzschächte des Sammelkanals weisen eine lichte Weite von 140x100 cm auf. Der Durchmesser des Sammelkanals ist mit DN/OD 500 wesentlich größer als jener der Ulmendrainage.



### 4.3 Vorgaben für hydraulische Optimierung der Querausleitung

Diese Vorgaben wurden im Vorfeld mit dem Projektpartner ÖBB definiert und dienen als Randbedingungen für die gegenständliche Arbeit (Besprechungsprotokoll MA SBT vom 14.07.2016):

- Das System aus Putzschächten und Querausleitungen soll innerhalb von 2 Blocklängen der Innenschale (jeweils à 12,5m) Platz finden.
- Die zu entwerfende Querausleitung soll hydraulisch optimale Bedingungen bei den möglichen Wassermengen des SBT (aufgrund von Variationen sowohl in der Lage der Querausleitungen im Tunnelbauwerk als auch in der Prognoseunsicherheit über die Menge der Wasserzutritte) bieten. Für den gesamten Tunnel soll ein einheitliches System entwickelt werden.
- Generell ist auf die bestehenden Bauverträge Rücksicht zu nehmen. Technische Änderungen dazu sind nur möglich wenn der Nutzen größer ist als die Mehrkosten.
- Das System muss wartungsarm und einfach zu bedienen sein. D.h. es sind keine mechanischen Teile oder Sensoren für den Betrieb des Systems erwünscht.
- Kreisgeometrie der Rohre ist fix, Durchmesser nur in begründeten Fällen änderbar.
- Die Gerinnegeometrie des Kunststofffertigteils im Putzschacht (mit Überfallwehr) ist veränderbar.
- Die Formstücke sind nur bedingt anpassbar. Nicht handelsübliche Formstücke sollen nur in begründeten Fällen eingesetzt werden.
- In den regelmäßigen Abstimmungsgesprächen wurde als zusätzliches Kriterium ein möglicher Abfluss in den Sammelkanal von mind. 10 l/s eingeführt.

## 5. Berechnungstools für die Untersuchung

Ziel dieser Arbeit ist es, für die Ausleitung der Tunnelwässer von der Ulmen-drainage in den Sammelkanal mittels 3D-numerischer Simulationen eine hydraulisch möglichst günstige Lösung zu entwickeln. Dabei sind die durch die Ausschreibung und technischen Richtlinien der ÖBB gegebenen Rahmenbedingungen einzuhalten. Ebenso sind die über die Tunnellängen variierenden Abflüsse zu beachten.

### 5.1 Erstellung der Geometrie: Rhino 5.0

Zur Durchführung von 3D-numerischen Strömungssimulationen ist es nötig die geometrische Struktur aus der 2D-Planung in ein 3D-Modell zu übertragen. Dies ist deshalb nötig, da im späteren „Pre-Processing“ (=Eingabe der Daten in ein Programm welches diese für die Bearbeitung durch ein anderes Programm vorbereitet) die Geometrie als Solid (=dreidimensionaler Festkörper beschrieben mittels mathematischer Methoden) eingelesen werden muss. Die Produktpalette an 3D-Design Programmen ist mittlerweile kaum überschaubar. In vielen technischen Disziplinen hat sich in den letzten Jahren das Programm *Rhinoceros 3D* der Firma *Robert McNeel & Associates* durchgesetzt. Es ist mittlerweile in der Version 5.0 erhältlich und besticht nicht nur durch die Möglichkeit, komplexe mehrfach gekrümmte Flächen zu erzeugen, sondern ebenfalls durch die große Anzahl an Dateiformaten welche ein- und ausgelesen werden können. Als Ausgabeformate für Strömungssimulationen werden häufig STEP oder ACIS verwendet. Für diese Arbeit wurde für das Preprocessing das Programm Ansys Workbench 17.1 verwendet. Diese Software unterstützt bereits das Rhino 5.0-Dateiformat, womit Dateien also direkt aus Rhino in Ansys 17.1 übertragen werden können.

### 5.2 Pre-processing, CFD-Solver und Post-processing: Ansys Workbench 17.1 und Ansys CFX 17.1

Ansys ist eine Finite-Elemente-Software zur Lösung von linearen und nichtlinearen Problemen in der Fluidmechanik, Strukturmechanik, Thermodynamik und

Akustik. Es weist eine Vielzahl unterschiedlicher Elementtypen für 1D, 2D und 3D-Berechnungen auf.

Das Pre-Processing erfolgte in Ansys Workbench 17.1 welches den Vorteil einer sehr modernen graphischen Benutzeroberfläche aufweist. Dies ermöglicht übersichtliche Verknüpfungen der einzelnen Solids zu großen Gesamtmodellen.

Zur eigentlichen CFD-Berechnung wurde in dieser Arbeit Ansys CFX gewählt.

### Vorteile von Ansys 17.1

- Direktes Einlesen von .3dm-Dateiformaten aus Rhino 5.0 ist möglich.
- Stabile automatische Netzerstellung mit einfachen Verfeinerungsmöglichkeiten.
- Stabile Solver (CFX, wie auch Fluent).
- Einfaches Monitoring verschiedener Parameter auch während der Berechnung möglich.
- Post-Processor mit einer ansprechenden grafischen Ausgabe.

### **5.3 Exkurs CFD-Simulationen**

Computational Fluid Dynamics, kurz CFD, beschreibt die numerische Untersuchung von Strömungen. Dabei wird, wie bei allen Problemen der klassischen Mechanik, auf die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie zurückgegriffen (Schwarze, 2013).

Heute werden CFD-Berechnungen in einem weiten Feld der Natur- und Ingenieurwissenschaften eingesetzt:

- Umströmung von Flugzeugen, Schiffen, Autos etc.
- Innenströmungen von Gebäuden (z.B. zur Optimierung von Wohnraumlüftungen)
- Strömungen in Gewässern und Rohrleitungen

- Luftströmungen für die Wettervorhersage etc.

Als Grundlage für diese Berechnungen dient das CFD-Modell. Dabei handelt es sich um eine mathematische Beschreibung einer Strömung, wobei das Modellgebiet zeitlich und räumlich diskretisiert wird. Es werden folgende Angaben benötigt (Schwarze, 2013):

- Rechengitter (auch Netz oder Mesh): Dient zur geometrischen Diskretisierung des Strömungsgebiets.
- Mathematisches Modell der Strömung: beschreibt die Grundgleichungen der in der Strömung stattfindenden Prozesse. Dazu gehören die strömungsphysikalische Grundgleichung, die Erhaltungssätze für Impuls, Masse und Energie für ein Fluid und weitere Modellgleichungen, womit beispielsweise Turbulenzen oder das Vermischen verschiedener Phasen näherungsweise berechnet werden können.
- Stoffwerte: Angabe aller Stoffwerte wie Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Viskosität
- Randbedingungen: Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsbedingungen eines Modells. Dabei stehen in Ansys CFX, neben der Definition als Wand (mit und ohne Reibung) zur Begrenzung der Strömungsgeometrie, für die Ein- und Auslässe drei physikalische Größen zur Eingabe zur Verfügung:
  - Durchflussrate [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
  - Geschwindigkeit [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
  - Druck [Pa]
- Diskretisierungsverfahren: Festlegung des einzusetzenden numerischen Verfahrens und der Algorithmen zur Überleitung der Differentialgleichungen in Differenzgleichungen. Diese Differenzgleichungen werden in dem vom Mesh definierten Punkten iterativ gelöst. Die Angabe des iterativen Verfahrens schließt die Modellbildung ab.

Zur Lösung von Strömungsproblemen braucht es also ein mathematisches Modell. Die Grundlage hierzu bilden die Navier-Stokes-Gleichungen (NSG). Sie bilden die Strömungsmechanischen Grundgleichungen und beschreiben die Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie. Mit NSG können theoretisch alle Strömungen Newtonscher Fluide abgebildet werden (laminare, turbulente und 2-Phasen Strömungen). Aufgrund der Komplexität und Größenordnung dieser Vorgänge ist eine 3D-numerische Simulation für Zivilingenieursaufgaben, in absehbarer Zukunft jedoch nur für einige wenige Sonderfälle möglich, da die Turbulenzen aus vielen sich ungeordnet bewegender, wirbelartiger Strukturen unterschiedlicher Größe bestehen und sich dabei zusätzlich noch ständig verändern. Dies erzeugt enorme Datenmengen und Rechenzeiten, weshalb solche Vorgänge zur Berechnung vereinfacht modelliert werden. Im Ingenieursbereich hat sich hierfür die Vereinfachung mittels Reynolds-Gleichungen unter der zu Hilfenahme von Turbulenzmodellen als zielführend erwiesen. Man spricht von sogenannten „*Reynolds Averaged Navier Stokes*“-Gleichungen, kurz RANS. Hierbei handelt es sich um eine statistische Modellierungsvariante. Die Turbulenzmodelle, welche auf der Vereinfachung durch die RANS-Gleichungen basieren, werden auch Wirbelviskositätsmodelle genannt. Sie teilen sich wie folgt auf (Laurien und Oertel, 2009):

- Nullgleichungsmodelle
- Eingleichungsmodelle
- Zweigleichungsmodelle
  - Standard  $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell
  - Nichtlineares  $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell
  - V2F – Modell
  - $k$ - $\omega$ -Turbulenzmodell
  - $k$ - $\omega$ -SST Turbulenzmodell (Shear Stress Transport)

Zusätzlich gibt es noch eine Vielzahl weiterer Modelle, welche nicht direkt oder nur teilweise auf den RANS-Gleichungen basieren, wie zum Beispiel die Large Eddy Simulation. Sie wird hauptsächlich bei Berechnungen von Strömungen mit großen Reynolds-Zahlen verwendet, wie das etwa in der Meteorologie der Fall ist.

### 5.3.1 *k- $\omega$ -SST Turbulenzmodell (Shear Stress Transport)*

Bei der Berechnung der Modelle in dieser Arbeit wurde zum größten Teil auf das SST-Turbulenzmodell zurückgegriffen. Einerseits weil dieses Modell die Vorteile von  $k-\omega$ -Turbulenzmodell im wandnahen Bereich und die Vorteile von  $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodellen in wandfernen Gebieten kombiniert. Dadurch greift der Solver immer auf das für diesen Bereich optimale Strömungsmodell zurück. Andererseits auch, weil mit diesem Modell die stabilsten Berechnungen bei vertretbaren Rechenzeiten möglich waren (Autodesk Inc. Help, 2017).

## 6. Modellaufbau

In diesem Abschnitt der Arbeit wird der Aufbau der für diese Arbeit erstellten CFD-Modelle beschrieben. Als Anschauungsbeispiel dient dabei das Gesamtmodell bestehend aus einem optimierten Ulmenauslauf und der Einleitung in den Sammelkanal. Zusätzlich wird die Wahl der Randbedingungen erläutert.

### 6.1 Modelaufteilung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Auslauf aus der Ulme sowie den Einlauf in den Sammelkanal zu optimieren. Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde das Modell deshalb in 2 Teile zerlegt:

- Wasserefassung der Ulmenausleitung
- Einlauf in den Sammelkanal

Um die die Korrelation zwischen Auslauf und Einlauf lückenlos zu dokumentieren wurde im letzten Schritt ein Gesamtmodell der sich in der Arbeit als optimal erwiesenen Lösung erstellt.

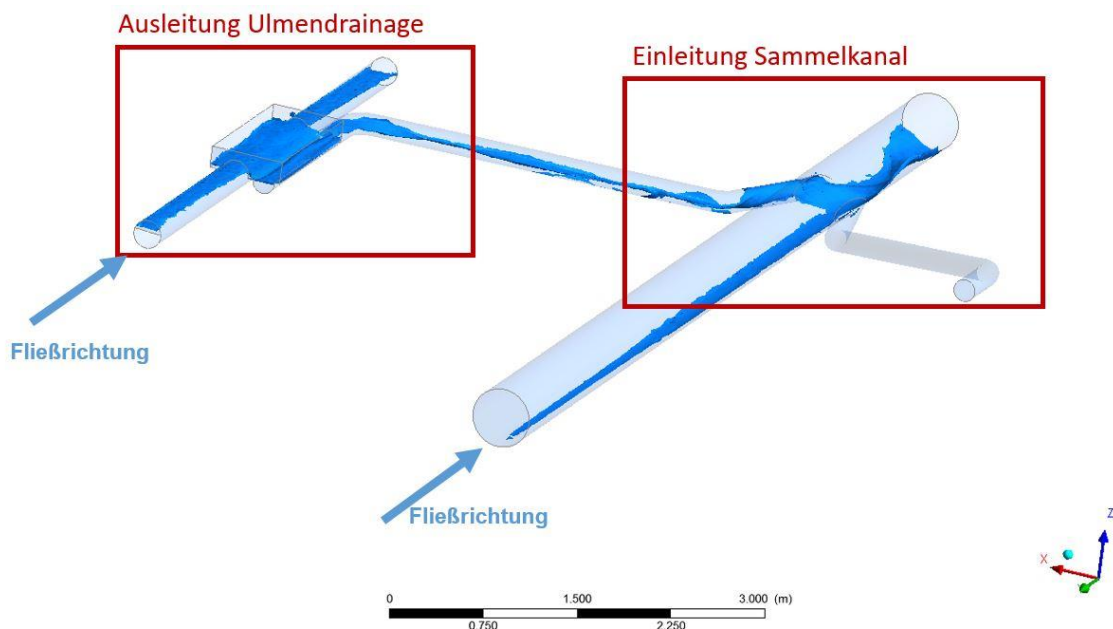


Abbildung 22 - Aufteilung der Berechnungsmodelle

## 6.2 Allgemeine Arbeitsschritte

Wie bereits in der Programmbeschreibung erörtert, weist Ansys Workbench 17.1 eine sehr übersichtliche Benutzeroberfläche auf. Zusätzlich vereint das Programm alle für die CFD-Berechnung nötigen Tools in dieser einen Oberfläche. Damit lassen sich sehr einfach nachzuvollziehende Verknüpfungen zwischen den einzelnen Solids, Berechnungsnetzen und CFD-Analysen erstellen. Der Vorteil dieses Aufbaus liegt darin, dass kleine Anpassungen in der Geometrie oder dem Berechnungsnetz automatisch für alle verknüpften CFD-Berechnungsvarianten übernommen werden (eine erneute Definition der physikalischen Bedingungen oder der Berechnungsmethodik ist also nicht nötig). Zeitgleich können in Pre-Processing von Ansys CFX 17.1 aber auch beliebig viele Kombinationen der Solids miteinander verknüpft werden.

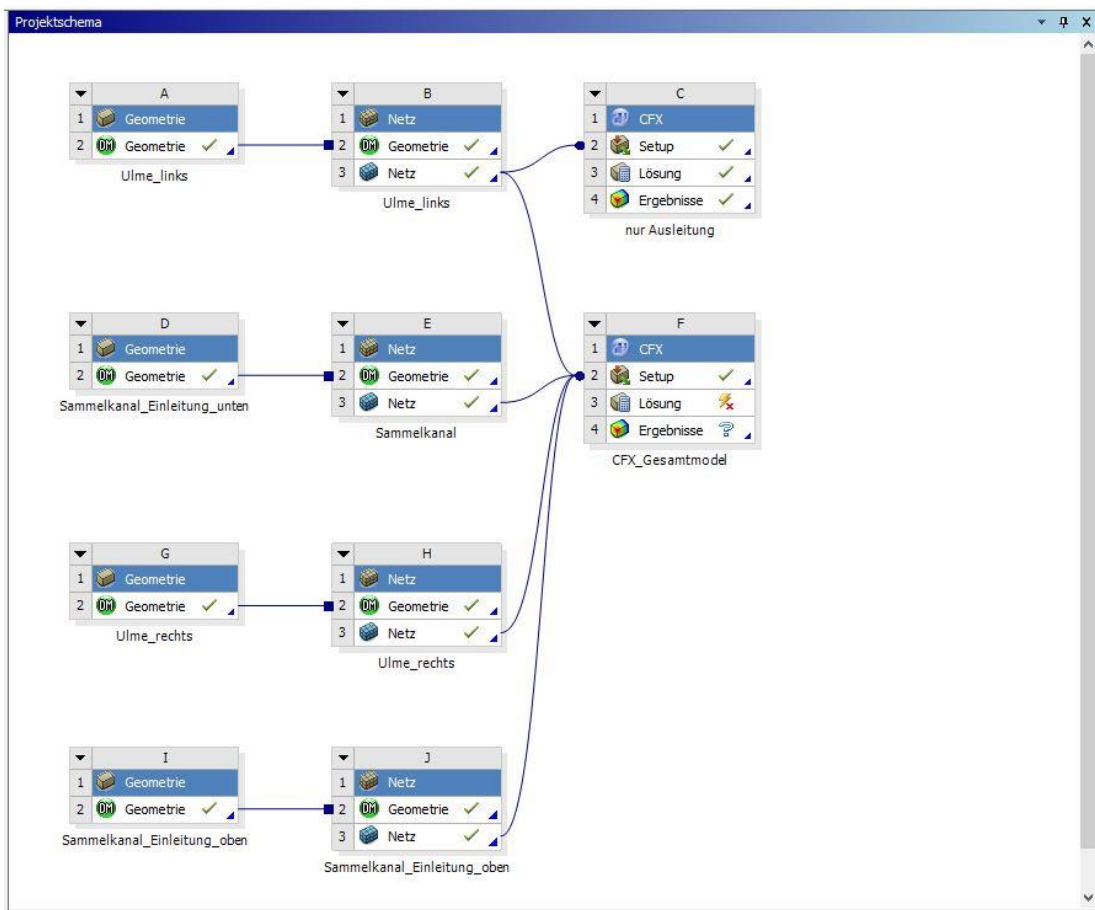


Abbildung 23 - Projektschema Ansys Workbench 17.1

Abbildung 23 zeigt die Oberfläche von Ansys Workbench 17.1 für die Erstellung des Gesamtmodells. Das Modell besteht aus 4 verschiedenen Volumenkörpern welche je nach Berechnungsanforderung unterschiedlich kombiniert werden:

- Ulmenausleitung (orografisch) links
- Ulmenausleitung rechts
- Einleitung der Bergwässer im oberen Bereich der Sammelleitung
- Einleitung der Bergwässer im unteren Bereich der Sammelleitung

Ziel dieses Modells ist es neben der Ermittlung des maximalen Abflusses über das Streichwehr in der Ulme auch herauszufinden ob es sinnvoll sein kann die Wässer aus der Ulme ab einem bestimmten Abfluss in der Sammelleitung in der oberer Rohrhälfte einzuleiten. Dafür wurden beide Solids mit den jeweiligen Ulmenausleitungen verknüpft und zu einer CFX-Datei kombiniert. Wie bereits erwähnt ergibt sich daraus jener Vorteil, dass alle Daten im Pre-processing nur einmal eingegeben werden müssen.

Abbildung 24 zeigt den Ablauf der Modellerstellung einer CFD-Analyse von der Erstellung der Geometrie bis zur Auswertung (Post-processing):

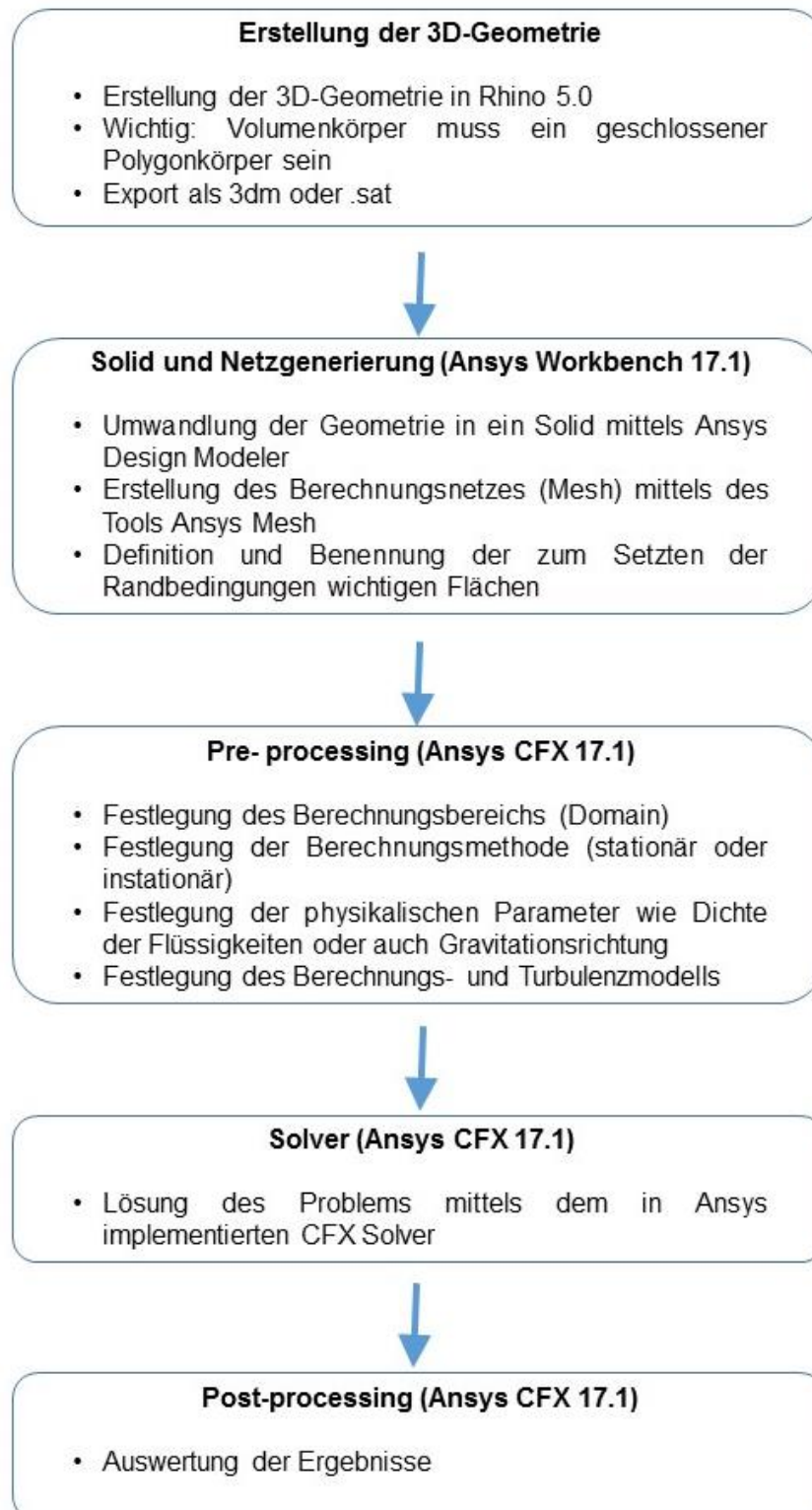


Abbildung 24 - Ablauf Modellerstellung für CFD-Analysen

### 6.2.1 Erstellung der 3D-Geometrie

Die richtige Erstellung der Geometrie ist bereits der erste wichtige Einflussfaktor auf die spätere Qualität des Berechnungsnetzes. Die Vermeidung von spitzen Winkel, kleinen kantigen Details oder jeglicher Art von Unstetigkeit kann bei der Erstellung des Berechnungsnetzes zu Problemen führen. Im Zug des Projekts hat sich gezeigt, dass viele kleine zusammengesetzte Flächenelemente fast immer für unstetige Bereiche im späteren Modell führen. Ein guter Hinweis auf die Eignung des Modells zur Übertragung in ein Solid ist die Möglichkeit, bereits im Programm Rhino 5.0, einen geschlossenen Polygonkörper zu erstellen und diesen in Ansys einzulesen.

In Abbildung 25 ist ein Gesamtmodell bestehend aus 3 Volumskörpern abgebildet. Diese werden einzeln aus Rhino 5.0 ausgelesen und erst im CFX Pre-processing wieder miteinander modelliert.

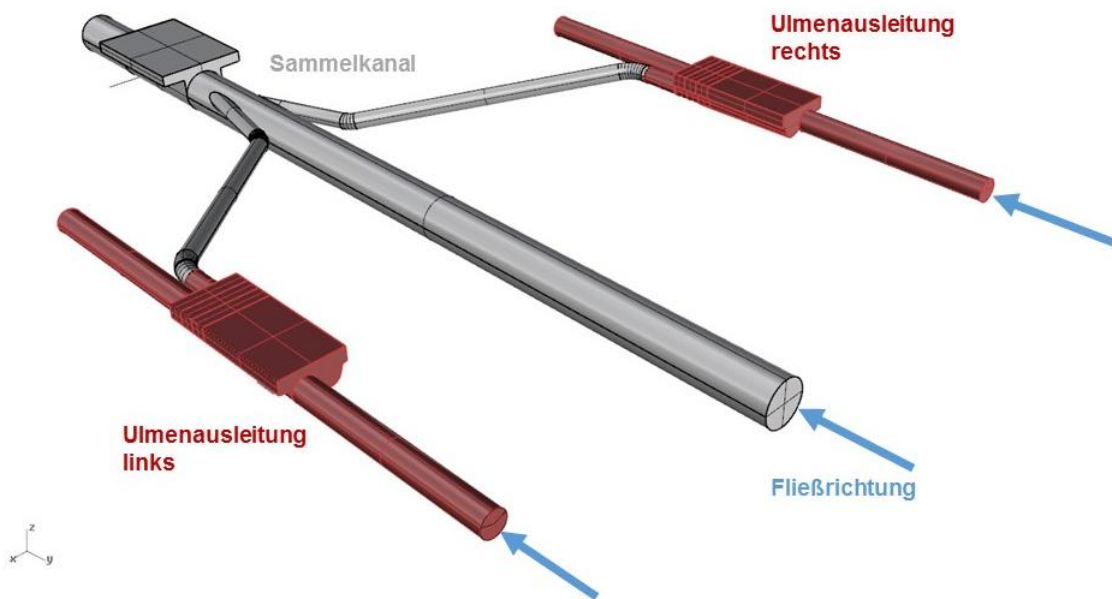


Abbildung 25 - Erstellung der 3D-Geometrien in Rhino 5.0

### 6.2.2 Solid und Netzgenerierung

Zur Erstellung eines Solids wird der in Rhino erstellte Volumenkörper als .sat oder .3dm eingelesen. Das Einlesen des Rhinoceros file formats .3dm ist erst ab Ansys V 17.1 möglich, hat sich aber trotzdem als sehr stabil erwiesen. Besonders

wenn mehrere Volumenkörper gleichzeitig eingelesen werden sollten, oder es zusätzlich erwünscht ist, gewisse Konstruktionslinien in den, im Programm implementierten, *Ansys DesignModeler* zu übernehmen.

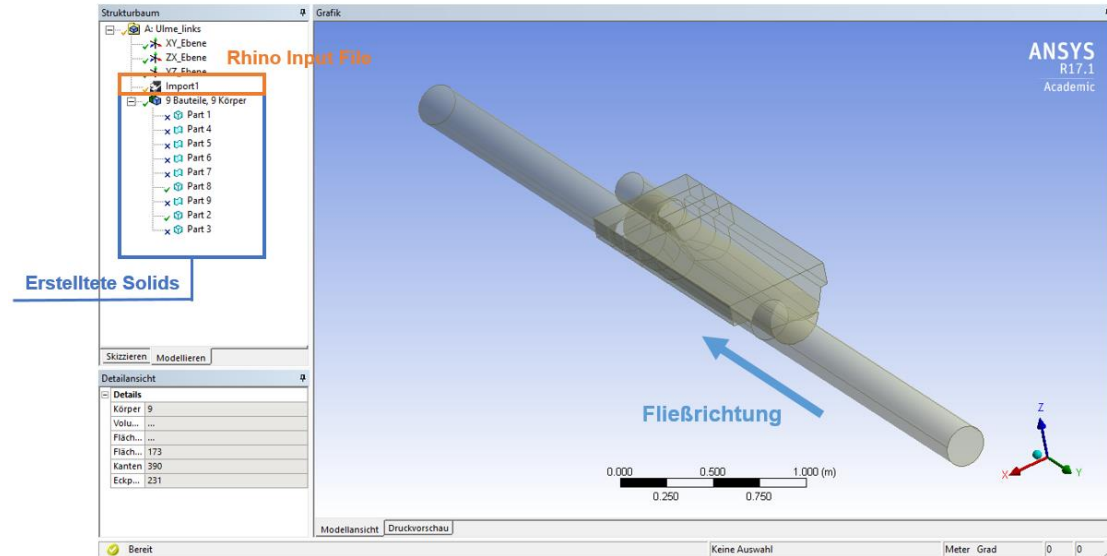


Abbildung 26 - Erstellung der Solids im Ansys DesignModeler (Querausleitung)

Der blau umrandete Bereich in Abbildung 26 zeigt die aus der .3dm-Datei erstellten Solids. Da für die weitere Bearbeitung nicht alle erstellten Solids benötigt werden, können sie deaktiviert werden (wird durch ein blaues Kreuz angezeigt). In diesem Fall wurde die linke Ulmenausleitung inkl. eines Körpers zur Hilfestellung bei der Netzverdichtung eingelesen. Die spätere Fließrichtung verläuft negativ zur y-Richtung. Grundsätzlich kann die Geometrie im *Ansys DesignModeler* noch verändert oder auch zur Gänze in diesem erstellt werden. Das Modellieren in *Rhino 5.0* erweist sich jedoch als wesentlich einfacher und effizienter.

Im nächsten Schritt wird die Schaltfläche *Geometrie* in der Ansys Workbench mit der Schaltfläche *Netz* verknüpft und das Solid im Tool „Meshing“ geöffnet. Aufgrund der enormen Bandbreite an Berechnungsmöglichkeiten sind die korrekten Einstellungen bei der Erstellung des Berechnungsnetzes von großer Bedeutung. Bei richtiger Wahl der Netzgenerierungsparameter erweist sich die automatische Netzgenerierung der Software als sehr zuverlässig. Es ist zu beachten dass bereits jetzt zwischen den Solvern Ansys Fluent oder Ansys CFX entschieden werden kann. Für die im Rahmen dieser Arbeit gestellten Probleme hat sich der CFX-Solver als zielführend erwiesen.

Des Weiteren ermöglicht das Meshing-Tool ein sehr einfaches Bearbeiten des Berechnungsnetzes. Die Erzeugung von Prismenschichten (einer Inflation) ist leicht möglich. Ebenso kann mittels zuvor eingelesen Solids ein Netzverfeinerungsbereich angegeben werden.

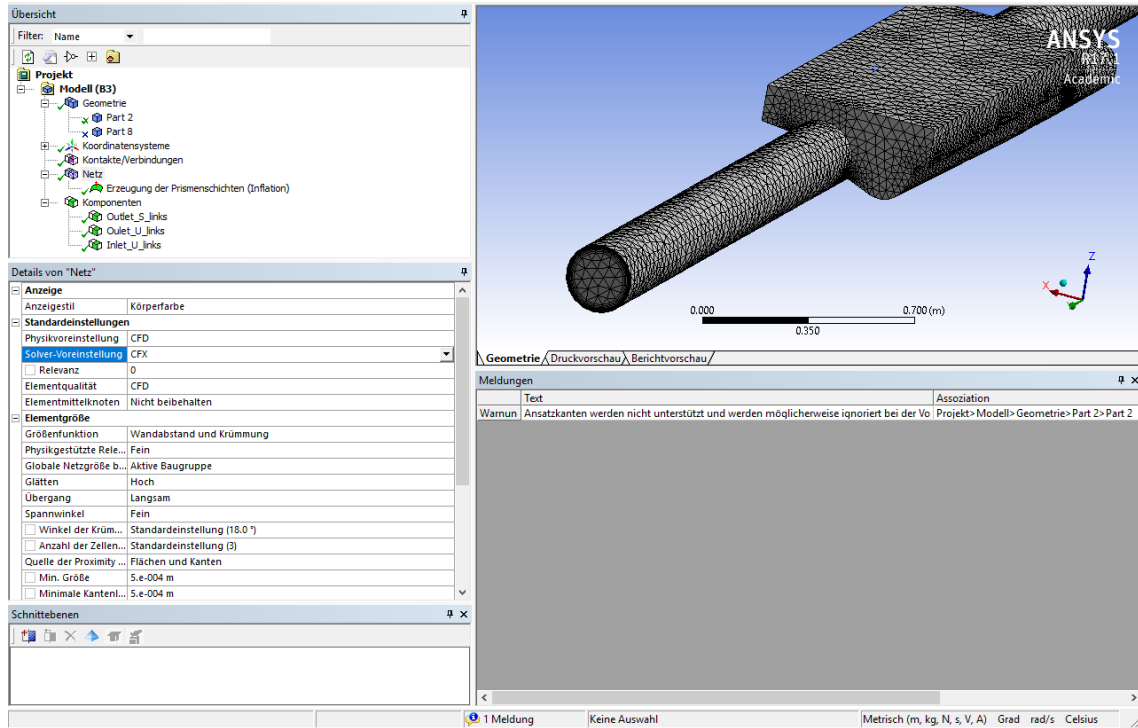


Abbildung 27 - Benutzeroberfläche Ansys Meshing

Eine wichtige Funktion ist die Möglichkeit der Benennung einzelner Flächen (Komponenten). Dies vereinfacht das spätere Zuweisen von physikalischen Eigenschaften/Randbedingungen im Pre-Processing. In dem in Abbildung 27 gezeigten Ausschnitt wurden beispielsweise der Einlauf (Inlet\_U\_Links), sowie die beiden Ausläufe (Outlet\_U\_links, und Outlet\_S\_links) definiert.

### 6.2.3 Pre-processing

Im Pre-Processing werden dem erstellten Berechnungsnetz die physikalischen Eigenschaften sowie alle nötigen Randbedingungen zugewiesen. Das beinhaltet die Art der Berechnung (stationär/instationär), die Randbedingungen für Ein- und Auslass und die Art der Fluide. Ebenso können wie bereits erwähnt mehrere Solids über die Schaltfläche „Interface“ miteinander verbunden werden. Zusätzlich können diese Flächen zur Beobachtung (Monitoring) bestimmter physikalischer Parameter über die Zeit benutzt werden.

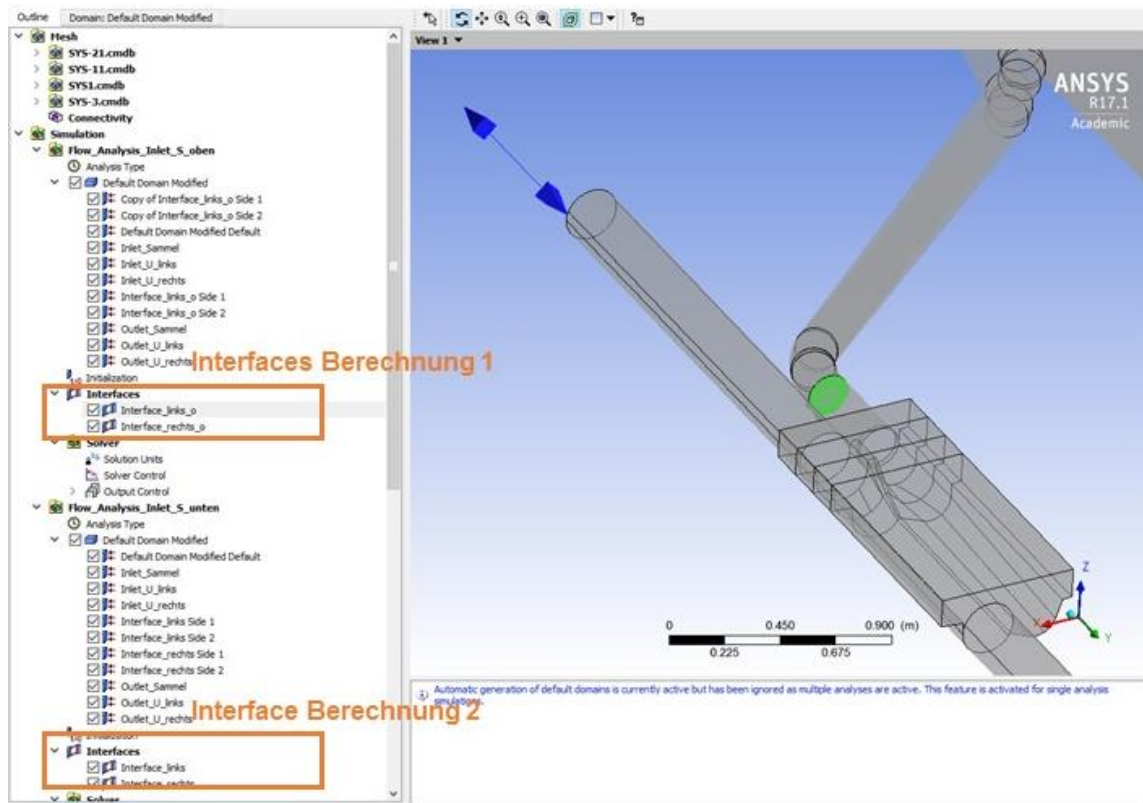


Abbildung 28 - Verknüpfung zweier Solids mittels Interface

Abbildung 28 zeigt die Verknüpfung des Solids Ulme\_links mit einer der beiden Sammelkanalvariationen. In der zweiten Berechnung wird das Solid Ulme\_links mit der zweiten Sammelkanalvariante verknüpft. Die physikalischen Eigenschaften, die Randbedingungen für Zu- und Abfluss sowie die Flächen zur Beobachtung des Abflusses (*Monitoring*) und sämtliche dazu nötigen Ausdrücke (*Expressions*) müssen nur einmal eingegeben werden.

## 7. Randbedingungen

Die physikalischen Bedingungen sowie die Randbedingung für die Simulationen werden für alle im Zuge der Arbeit berechneten Modelle gleich angenommen. Diese werden im folgenden Kapitel erläutert.

### 7.1 Beschreibung der Berechnung

Da in vielen Berechnungen die Randbedingungen über die Zeit veränderlich sind, werden alle wesentlichen Berechnungen instationär durchgeführt. Der Betrachtungszeitraum liegt meist zwischen 15 und 100 s, abhängig von der Größe des Modells. Die gewählte Größe der Zeitschritte variiert zwischen 0,1 und 0,25 s, was sich als ausreichend detailliert gezeigt hat.

### 7.2 Modell und Fluideinstellungen

Alle Rechnungen dieser Masterarbeit werden als Freispiegelabfluss unter Berücksichtigung der **Gravitation** ausgeführt. Die Gravitation wirkt dabei immer in negative Richtung der z-Achse (**-9,81 m\*s<sup>-2</sup>**).

Bei allen Modellen wurden zwei Fluide berücksichtigt: Wasser und Luft. Da die Temperatur in den Berechnungen vernachlässigt wurde, werden hier vereinfacht die Dichten bei 20°C angenommen.

Zu Beginn der Berechnung ist das Modell immer frei von Wasser und ausschließlich mit Luft gefüllt. Der **Referenzdruck** im Modell beträgt zu Beginn **1 atm**.

Wie bereits in Kapitel 5.3 - Exkurs CFD-Simulationen erläutert, wurde für alle Berechnungen das Shear-Stress-Transport Turbulenzmodell verwendet. Als Free Surface Modell steht in Ansys CFX nur das Standard-Tool zur Auswahl.

Als letzte Randbedingung muss bei Freispiegelabflüssen noch die **Oberflächen-  
spannung** (Surface tension coefficient) gesetzt werden. Diese beträgt für Wasser **0.072 N\*m<sup>-1</sup>** (bei 20°C).

### 7.3 Randbedingungen bei Ein- und Auslaufelemente

Als Eingabeparameter für die Einläufe (Inlets) kann im Wesentlichen zwischen Druck, Geschwindigkeit oder Durchfluss gewählt werden. Da für die spätere Analyse im Wesentlichen der Abfluss bei jeweiligem Füllstand von Bedeutung ist, wurden alle Berechnungen mit Eingabe des Durchflusses durchgeführt. Hierbei verwendet Ansys die Einheit  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Als Faktor für die Umrechnung zwischen  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$  wurde vereinfacht 1 angenommen.

Für die einfache Korrelation zwischen Abfluss und Abflusshöhe wurde eine Exceltabelle erstellt (Abbildung 29). Diese zeigt für einen gegebenen Wasserstand (Abflusshöhe) in der Ulmendrainage die sich dabei einstellende Fließgeschwindigkeit sowie den zugehörigen Abfluss.

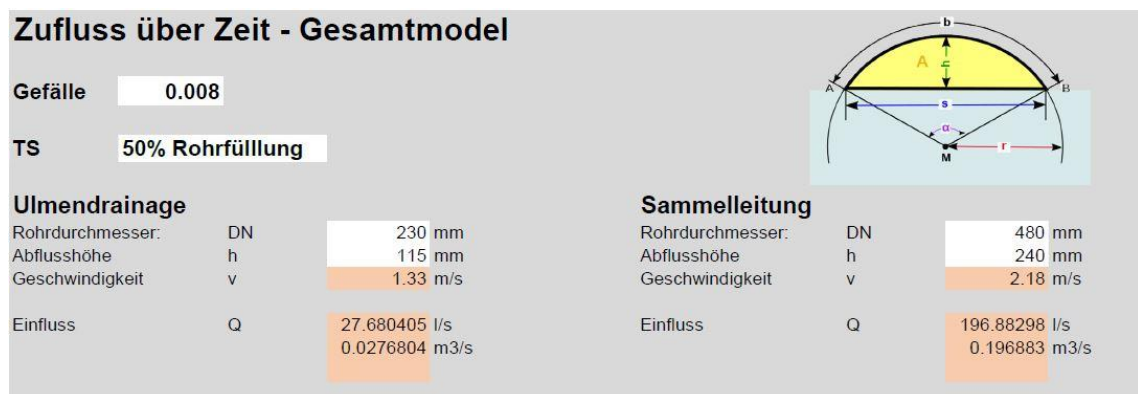


Abbildung 29 - Abflüsse bei Halbfüllung Ulmendrainage und Sammelkanal

Da das Modell bei allen Berechnungen zu Simulationsbeginn nicht mit Wasser gefüllt ist, können die Ausläufe (Outlets) als einfache Öffnungen (Openings) definiert werden. Als Druck zur Startzeit wird 0 Pa angesetzt.

## 8. Ergebnisse der CFD-Simulation

Im folgenden Kapitel finden sich die Ergebnisse der im Rahmen des Projektes durchgeführten CFD-Berechnungen. Sollten Randbedingungen oder physikalische Eigenschaften nicht gesondert angeführt sein so gelten die in Kapitel 7 definierten Einstellungen. Angeführt werden die Erkenntnisse zu den folgenden vier vom Auftraggeber definierten Fragestellungen:

- Hydraulische Optimierungen der Ulmenausleitung
- Hydraulische Optimierung der Einleitung in den Sammelkanal
- Einfluss der Drainageschlitzte auf den Abfluss

*Alle Berechnungen und Zwischenschritte sind am beigelegten Datenträger gespeichert und können diesem entnommen werden.*

### 8.1 Hydraulische Optimierung der Ulmenausleitung

Eine Analyse der Planung des Streichwehrs zeigt die Ausgangssituation mit den beidseits scharfkantigen Abschlüssen.

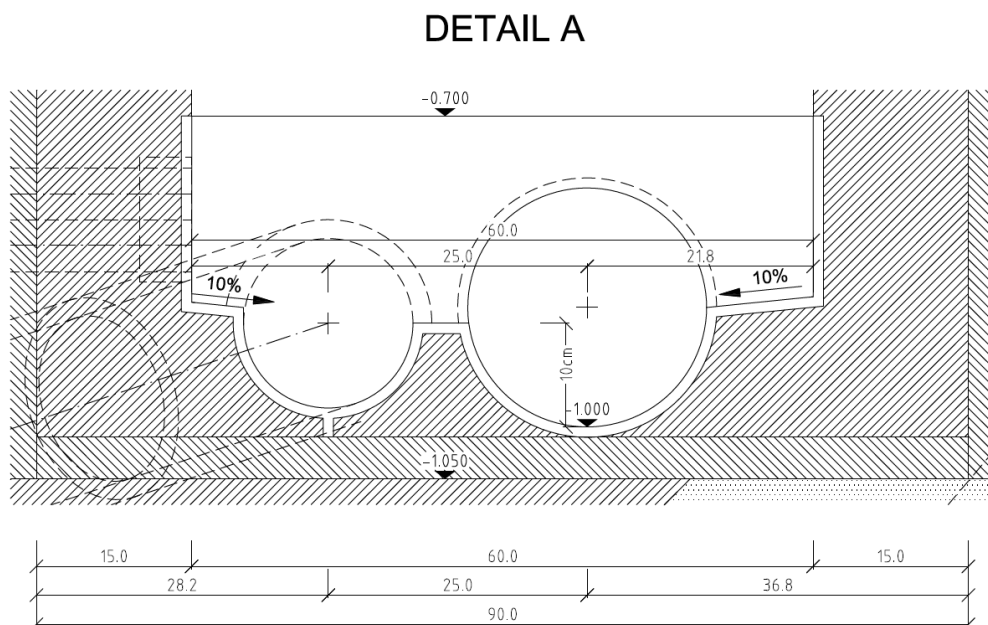


Abbildung 30 - Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage  
Plan Nr.: SBT3.1-AS-0800TU-03-0303-F01

In einem ersten Schritt wird deshalb versucht diesen Überfall sowie die Ableitung des Wassers aus dem Schacht zu optimieren. Ziel ist es hierbei einen möglichst laminaren Abfluss zu erreichen, sowie den Einfluss der Wasserentnahme durch das Streichwehr auf den Abfluss in der Ulmendrainage zu minimieren. Wie bereits mehrfach erwähnt, ist die Optimieren der Drainage auf einen bestimmten Wasserstand im System nicht möglich, da im Verlauf des Tunnels mit großen Schwankungen hinsichtlich des Wasserandrangs zu rechnen ist. Zur Vereinfachung werden die ersten Variantenstudien mit einem Zulauf von 27,7 l/s berechnet (entspricht Halbfüllung der Ulmendrainage – Innendurchmesser 230 mm im Modell und laut Plan) und hierbei versucht eine Entnahme von 10 l/s durch das Wehr zu erreichen.

Der Betrachtung möglicher Streichwehr-Varianten geht eine Berechnung des Abflusses in der Ulmendrainage selbst voraus:

$$v = k_{ST} * I^{\frac{1}{2}} * R^{\frac{2}{3}} = 100 * 0,008^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{0,0208}{0,361}\right)^{\frac{2}{3}} = 1,33 \text{ m/s} \quad (8.1)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * t}} = \frac{1,33}{\sqrt{9,81 * 0,115}} = 1,25 \quad (8.2)$$

Bei gewähltem Abfluss stellt sich nach der Fließformel von Strickler eine Fließgeschwindigkeit von 1,33 m/s ein (Annahme  $k_{st} = 100 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  da PVC-Rohre der Rauigkeit nach mit Stahlrohren vergleichbar sind). Demnach ergibt sich eine Froudezahl von 1,25 [-] (schießender Abfluss). Das bedeutet, dass mit einem Wechselsprung nur bei einer Querschnittsaufweitung bzw. bei Reduktion der Fließgeschwindigkeit zu rechnen ist. Dies sollte, bei der Variation der Wehrhöhe und bei eventueller Aufweitung des Querschnitts, berücksichtigt werden.

### 8.1.1 Geometrievariation Streichwehr

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Berechnung des Fließzustandes werden in Folge mehrere Geometrievariationen mittels Ansys 17.1 simuliert und einander gegenübergestellt. Abbildung 31 zeigt anhand der Variante 1 die drei wesentlichen Optimierungspunkte der Ausleitung aus der Ulmendrainage. An der Stelle 1 fließt das Wasser aufgrund der niedrigen Seitenwand nach links ab. Aufgrund dieser Querschnittsaufweitung kommt es zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit. Je höher der Abfluss umso stärker sind die Auswirkungen dieser Problemstelle. An der Stelle 2 kommt es zu einer starken Durchlüftung des Wassers, da das bereits abgelaufene Wasser nicht schnell genug abrinnt und an Stelle 3 fließt das Wasser direkt gegen die senkrechte, den Schacht abschließende Wand.

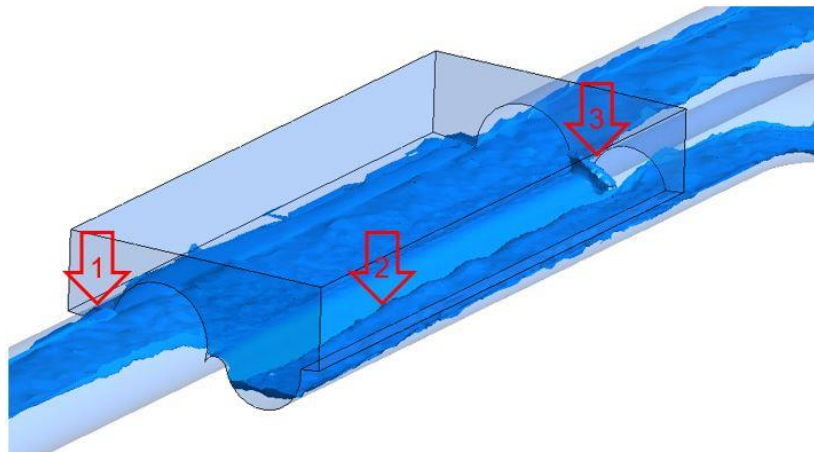


Abbildung 31 - 3 Optimierungsstellen an der Ulmenausleitung

Abbildung 33 bis 38 zeigen die Veränderung der Sohlengeometrie (PVC Fertigteil). Zusätzlich werden die einzelnen Veränderungen kurz beschrieben. Die Blickrichtung der Ansicht bleibt dabei immer wie in Abbildung 32 dargestellt:

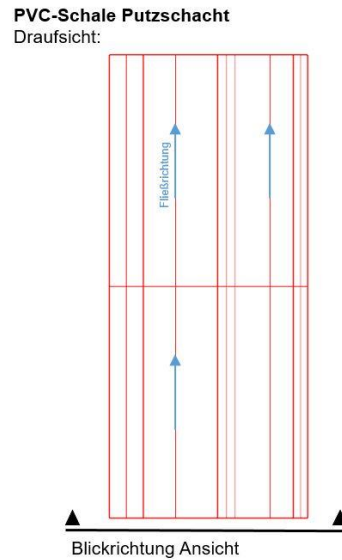
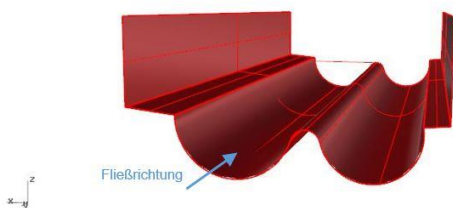


Abbildung 32 - Draufsicht PVC-Sohlelement Putzschacht (Variante 1)

- Variante 1 und 1B: Als erste Modifikation des Ist-Zustandes wird der Wehrhöcker abgerundet sowie bei Variante 1B die Außenwand erhöht. Dies dient vor allem dazu den Fließquerschnitt so kompakt als möglich zu halten und eine größere Reduktion der Geschwindigkeit im Schacht zu vermeiden.

Perspektive:



Ansicht in Fließrichtung:

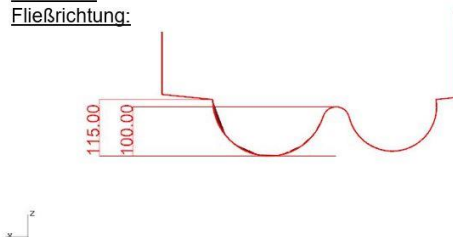
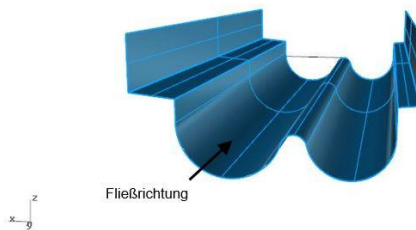


Abbildung 33 - Variante 1

Perspektive:



Ansicht in Fließrichtung:

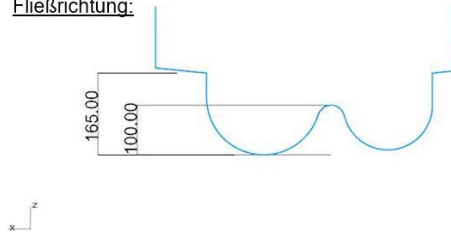
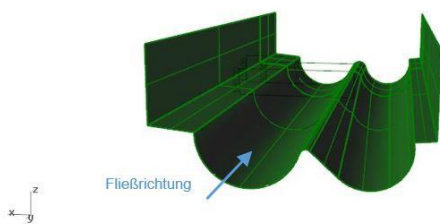


Abbildung 34 - Variante 1B

- Variante 2: Um das anströmende Wasser besser abzuleiten wird der Radius des Wehrhöckers reduziert. Zusätzlich steigt die Höhe des Wehres in Fließrichtung leicht an, um die Wasserströme schon vor der Wand zu trennen.
- Variante 3: Um das Wasser schneller in Richtung Ausleitungsöffnung zu leiten, wird das Gefälle in der Ausleitungsrinne leicht erhöht.

Perspektive:



Ansicht in  
Fließrichtung:

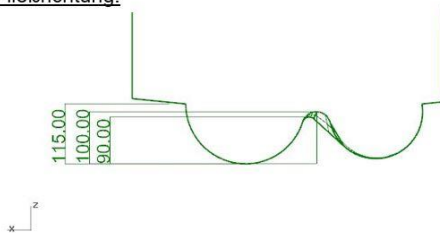
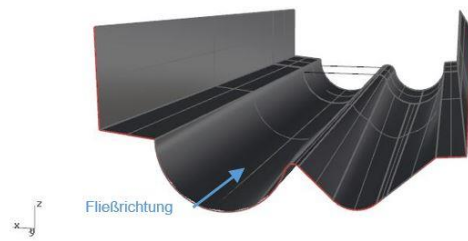


Abbildung 35 - Variante 2

Perspektive:



Ansicht in  
Fließrichtung:

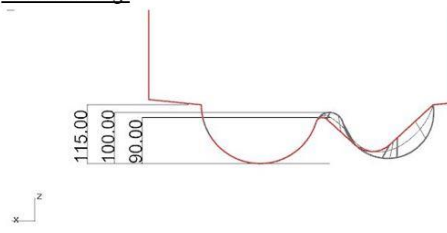
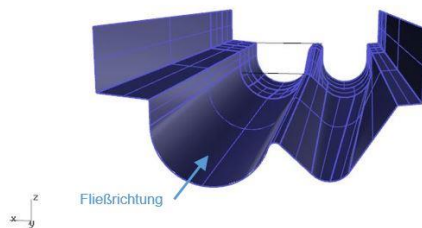


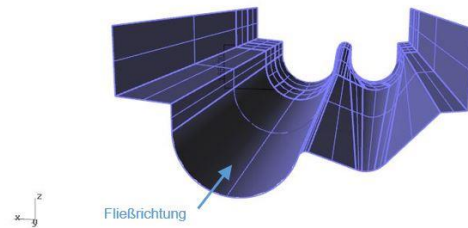
Abbildung 36 - Variante 3

- Variante 4: Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten reicht eine leichte Erhöhung des Wehrs nicht aus, weshalb der Wehrhöcker am Ende des Schachts, ähnlich einem Brückenpfeiler, auf die Höhe der Außenwände angehoben wird.
- Variante 5: Um das Wasser beim Überlauf in die Ablaufrinne nicht so sehr zu beschleunigen wird die Neigung des Wehrrückens reduziert. Dies soll vor allem bei kleinen Entnahmen für ruhigere Abflüsse sorgen.

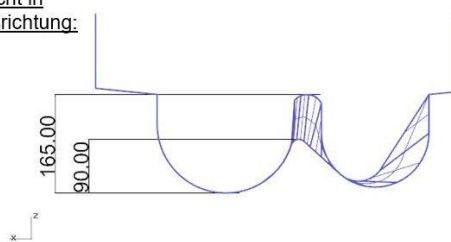
Perspektive:



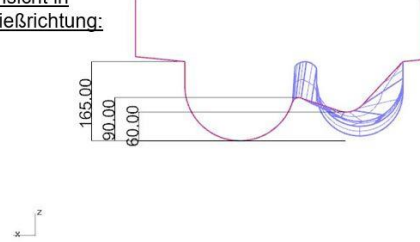
Perspektive:



Ansicht in  
Fließrichtung:



Ansicht in  
Fließrichtung:



*Abbildung 37 - Variante 4*

*Abbildung 38 - Variante 5*

Um die Veränderung in der Abflusssituation anschaulich darzustellen zeigen die folgenden Abbildungen den Vergleich zwischen Variante 1 (Ausgangssituation mit abgerundetem Wehrhöcker) und Variante 5.

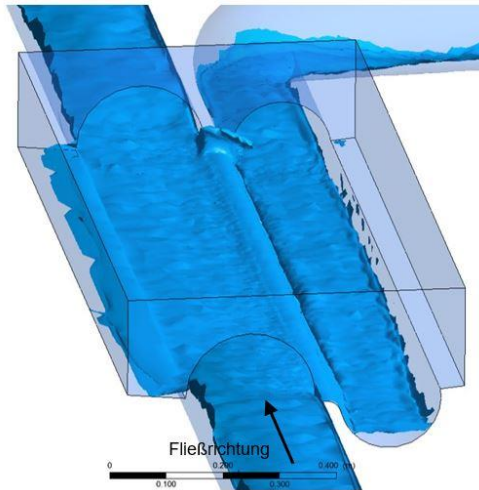


Abbildung 39 - Wasseroberfläche Variante 1

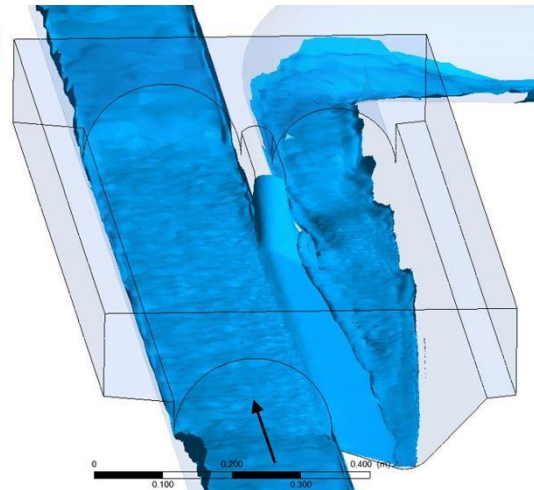


Abbildung 40 - Variante 5

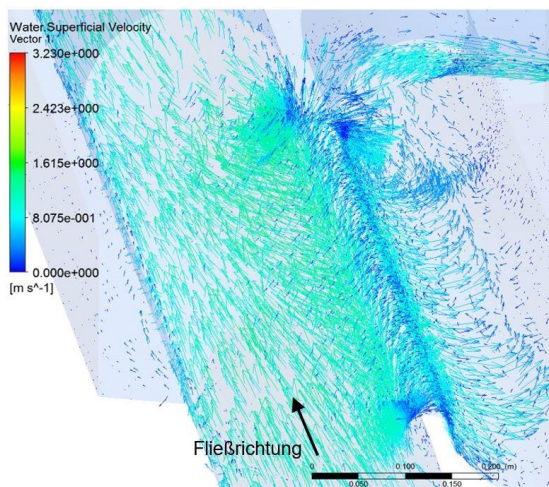


Abbildung 41 - Geschwindigkeitsvektoren Variante 1

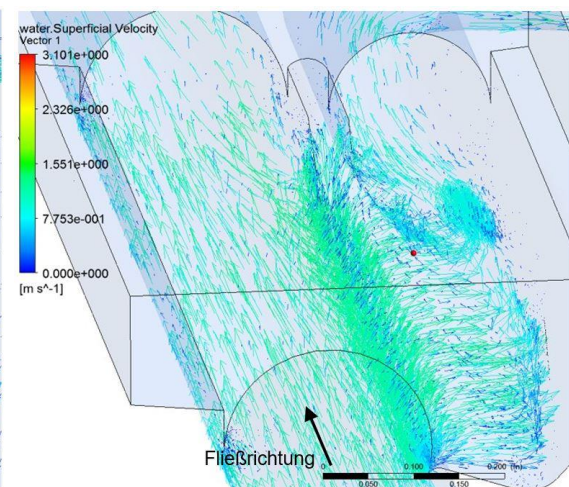


Abbildung 42 – Variante 5

Im Vergleich ist deutlich erkennbar, dass durch die Anhebung der Ausleitungssohle das Wasser schneller in Richtung der Ausleitung gelenkt wird und ein Aufstau vermieden wird. Die Strömung in der Ulmendrainage selbst wird ebenfalls kaum beeinflusst. Verbesserungspotenzial wäre noch im Übergangsbereich zwischen Schachtgerinne und Rohrleitung vorhanden. Hier bildet sich aufgrund des Knicks in der Sohle eine Verwirbelung, welche für zusätzliche unerwünschte Belüftung des Drainagewassers sorgt. Die Ausbildung dieser Verwirbelung ist stark

vom vorhandenen Wasserandrang abhängig – konnte jedoch in dem im Folgenden empfohlen Ausführungsvorschlag (8.1.3 - Optimierung Variante 5 der Ulmenausleitung) stark reduziert werden.

### 8.1.2 Höhenanpassung Streichwehr

Nach sorgfältiger Analyse der angepassten Ulmenschachtgeometrie zeigt sich, dass das angestrebte Ziel einer Ausleitung von 10 l/s mittels Streichwehr bei einer Wehrhöhe von 9-10 cm nicht bzw. nur schwer zu erreichen ist. Zusätzlich ist zu beachten, dass aufgrund der Geometrie des Teilsickerrohres (220°-Schlitze) ein niedrigerer Grundabfluss erstrebenswert ist (siehe dazu auch Kapitel 8.3 - Einfluss der Drainageschlitze auf den Abfluss). Die Untersuchung verschiedener Wehrhöckerhöhen zeigt, dass eine Absenkung des Wehrs auf 6 cm nicht nur Vorteile hinsichtlich der ableitbaren Wassermenge bietet, sondern ebenfalls noch eine ausreichende Geschwindigkeit garantiert, um Ablagerungen zu vermeiden. Bei einer Abflusshöhe von 6 cm beträgt die Fließgeschwindigkeit des Wassers 0,96 m/s. Dem Hjulström-Diagramm nach bedeutet dies für alle in Tunnel drainagen relevanten Korngrößen erodierende bzw. zumindest transportierende Abflussverhältnisse.

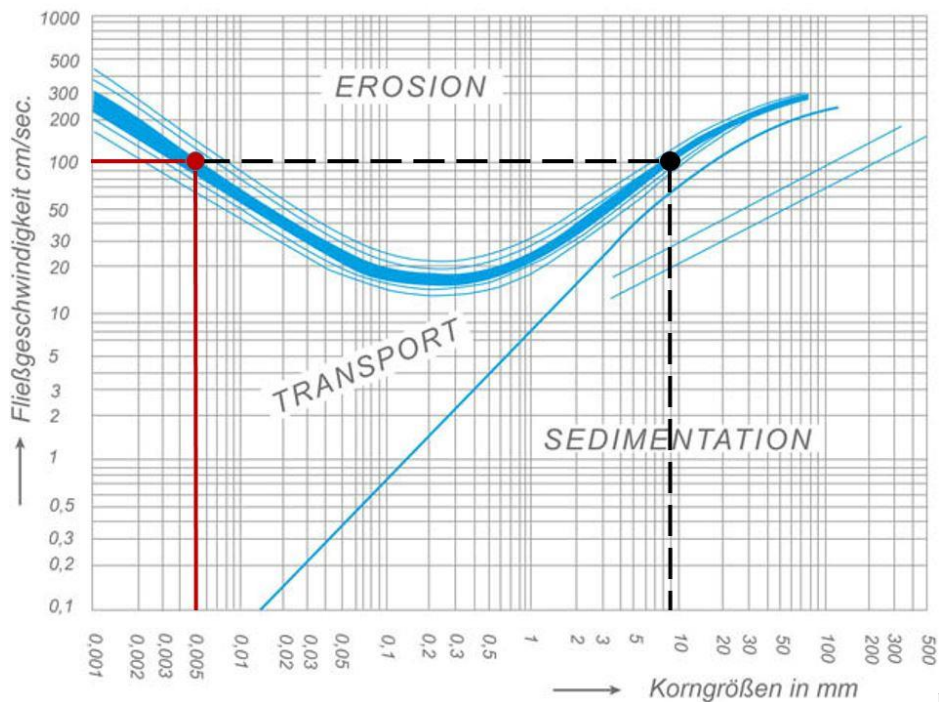


Abbildung 43 - Hjulström Diagramm (Bollrich, 2013)

Tabelle 1 und Abbildung 44 zeigen das Abflussverhalten für verschiedene Wasserstände in der Ulme – einmal für Halbfüllung (Wasserstand 115 mm entspricht 27,6 l/s) und einmal für einen Wasserstand von 90mm (17,9 l/s). In beiden Fällen kann das geforderte Ziel von 10 l/s nicht erreicht werden, zusätzlich ist aus der Tabelle ersichtlich, dass sich das Wasser an der Ausleitung geringfügig aufstaut, da der Abfluss leicht unter dem Wert des Zuflusses liegt.

Tabelle 1 - Abflüsse Variante 5 abhängig vom Wasserstand in der Ulme [l/s]

Model	Q Ulme	Q Sammel	Q Gesamt
V5 (115mm)	18,83 (93mm)	7,43	26,26
V5 (90mm)	12,33 (73mm)	3,13	15,46

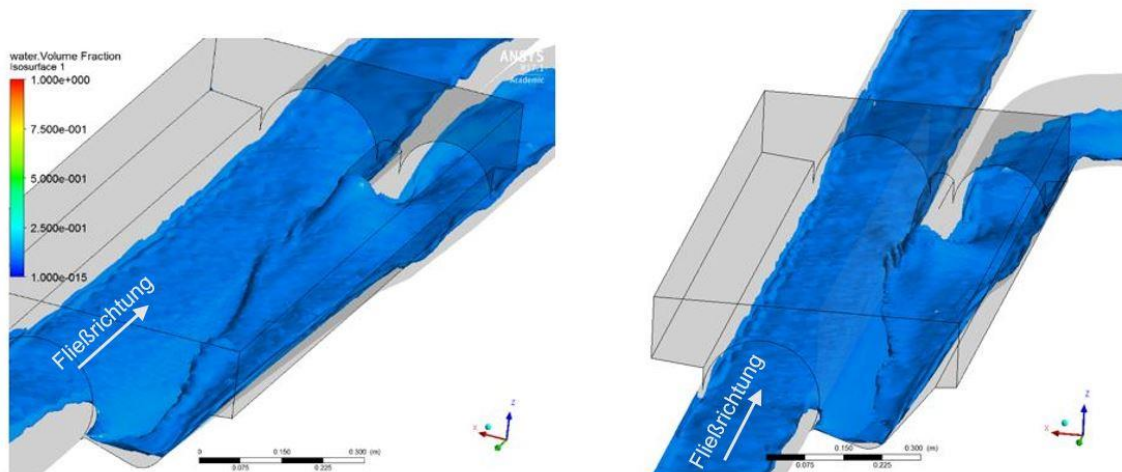


Abbildung 44 – Abflussszenarien für Wehrhöcker 60 mm: 27,6 l/s (links) und 17,9 l/s (rechts)

### 8.1.3 *Optimierung Variante 5 der Ulmenausleitung*

Um den Abfluss nach der Ausleitung in Richtung Sammelkanal zu optimieren und das Aufstauen der Ableitungswässer zu vermeiden, werden zwei Anpassungen der Variante 5 untersucht. Die Ergebnisse werden zum Vergleich der Ausgangsvariante 1 (abgerundeter Wehrhöcker) gegenübergestellt.

Um das Problem des rückstauenden Wassers zu minimieren und gleichzeitig die Förderfähigkeit des Abflusses zu erhöhen, werden zwei Lösungsansätze untersucht. Bei Variante 5B wird der Querschnitt der Ausleitung erhöht, um dem Wasser mehr Platz zu bieten und den Übergang in das Ableitungsrohr noch gleichmäßiger zu gestalten. Bei Variante 5C wird der Querschnitt am Beginn der Ausleitung verengt und angehoben. Zusätzlich wird die Sohle der Ausleitung näher an die Ulmendrainagerinne herangezogen, was einen deutlich kürzeren Wehrrücken erzeugt.

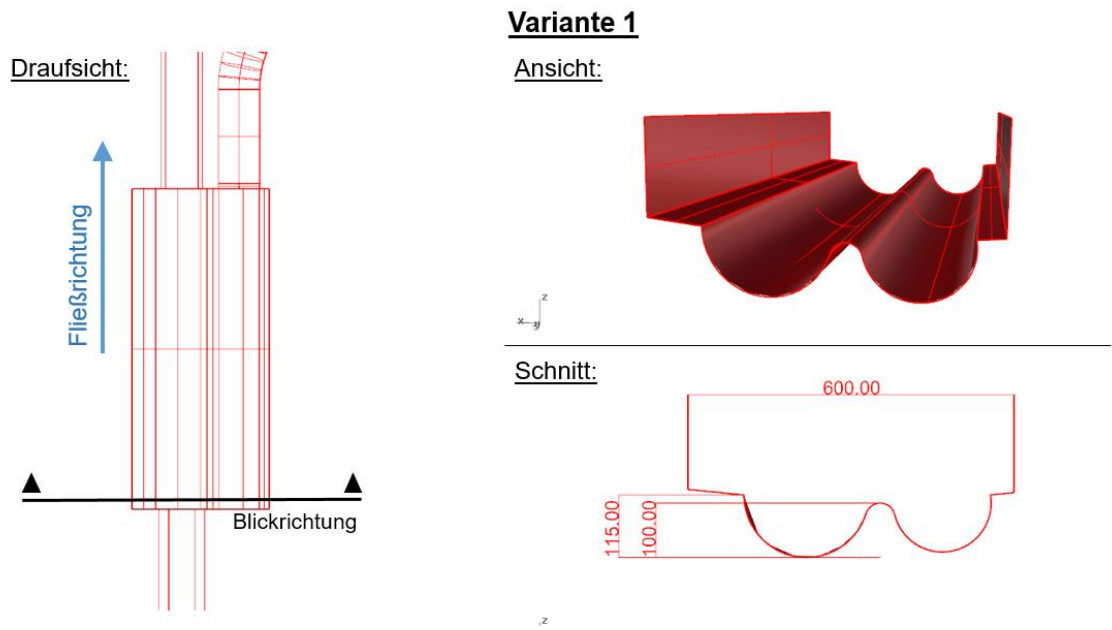


Abbildung 45- Variantenvergleich Übersicht und Variante 1

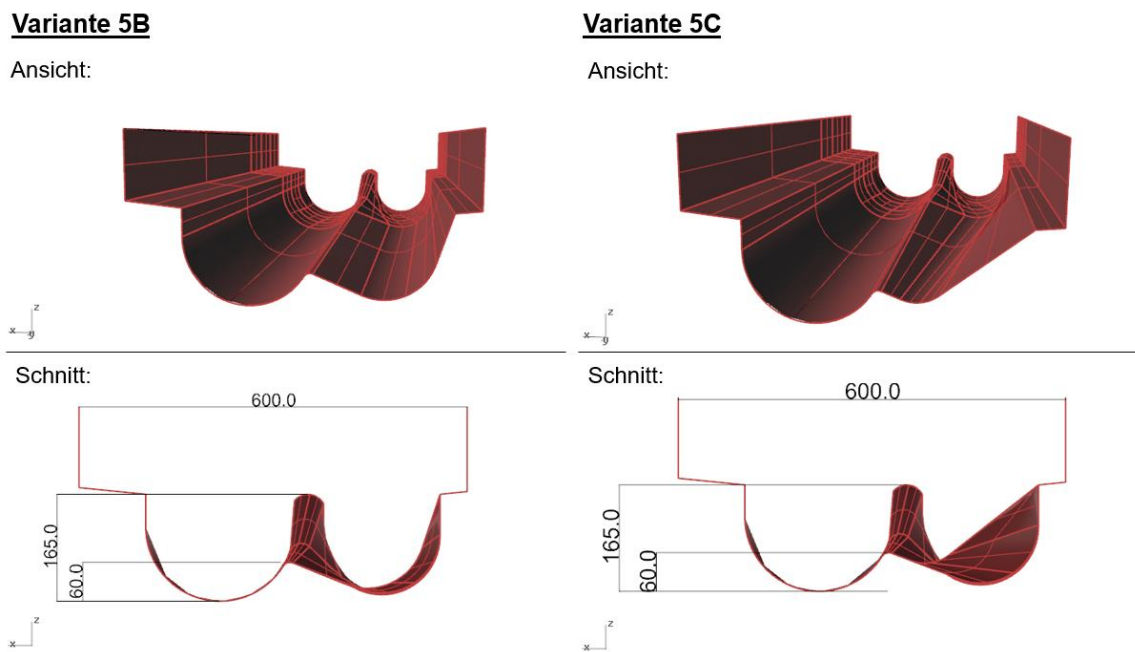


Abbildung 46 - Variantenvergleich Variante 5B und 5C

Diese drei Varianten werden für mehrere Lastfälle untersucht, indem die Menge des zufließenden Wassers schrittweise erhöht wird. Abbildung 47 zeigt die deutliche Verbesserung der Abflüsse gegenüber der planungsnahen Ausleitungssituation. Gleichzeitig ist gut erkennbar, dass der gewünschte Abfluss von 10 l/s jetzt bereits kurz nach Halbfüllung der Ulmendrainage erreicht wird.

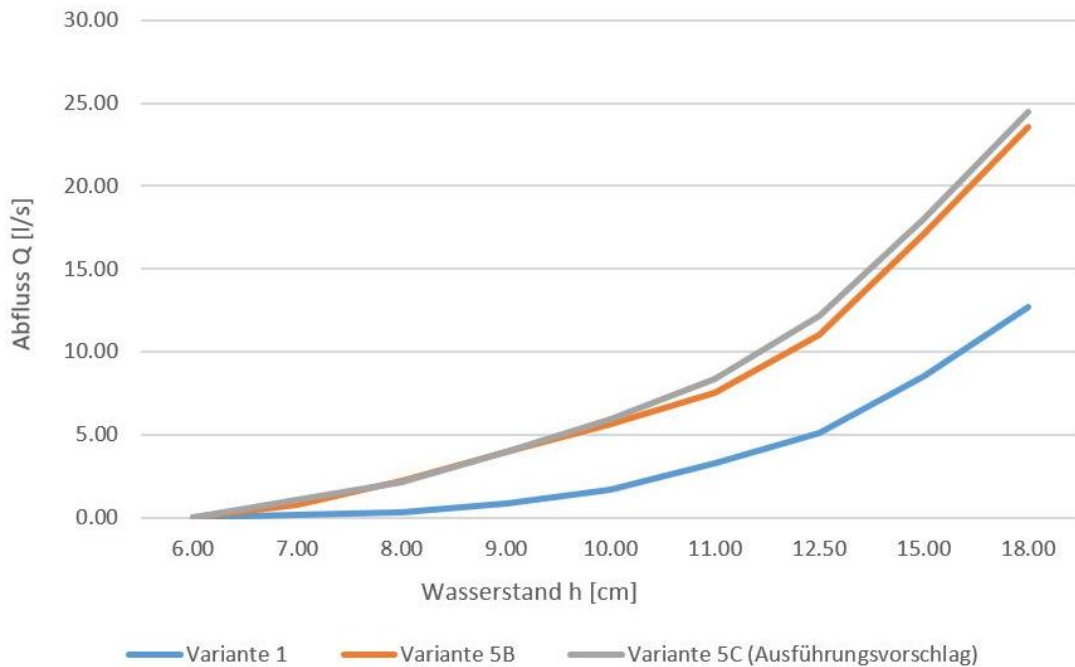


Abbildung 47 - generierte Abflüsse über das Streichwehr

Tabelle 2 - Lastfälle Abflussuntersuchung und erreichte Ausleitungsmengen

Time-step	Time [s]	Zufluss Inlet [l/s]	Wasserstand [cm]	Variante 1 Abfluss zu SK [l/s]	Variante B Abfluss zu SK [l/s]	Variante C Abfluss zu SK [l/s]
30.00	7.25	8.5	6.00	0.03	0.06	0.07
43.00	10.50	11.10	7.00	0.15	0.82	1.07
65	16	14.30	8.00	0.37	2.22	2.14
93	23	18.00	9.00	0.87	3.95	3.96
121	30	21.70	10.00	1.73	5.62	5.96
149	37	25.65	11.00	3.31	7.59	8.41
177	44	31.80	12.50	5.10	11.02	12.22
201	50	42.00	15.00	8.55	17.09	18.02
225	56	52.90	18.00	12.74	23.52	24.45

Exemplarisch für die verbesserte Ausleitungssituation werden in Abbildung 48 Variante 1 und Variante 5C einander gegenübergestellt. In Variante 1 ist deutlich ersichtlich dass die Geschwindigkeitsvektoren nicht, wie gewünscht, in Richtung Ausleitung (Fließrichtung Ulmendrainage) zeigen, sondern im rechten Winkel dazu stehen. Dies führt einerseits zu einem Aufstau des Wassers im System und andererseits zu einer erhöhten Belüftung durch die dadurch entstehende Deckwalze. In Variante 5C hingegen kann durch die erhöhte Neigung der Ausleitung sowie der starken Verkürzung des Wehrrückens die Abflussrichtung leicht in die Fließrichtung gedreht werden, was zu einem gleichmäßigeren und zur Ausleitung hin gerichteten Abflussbild führt.

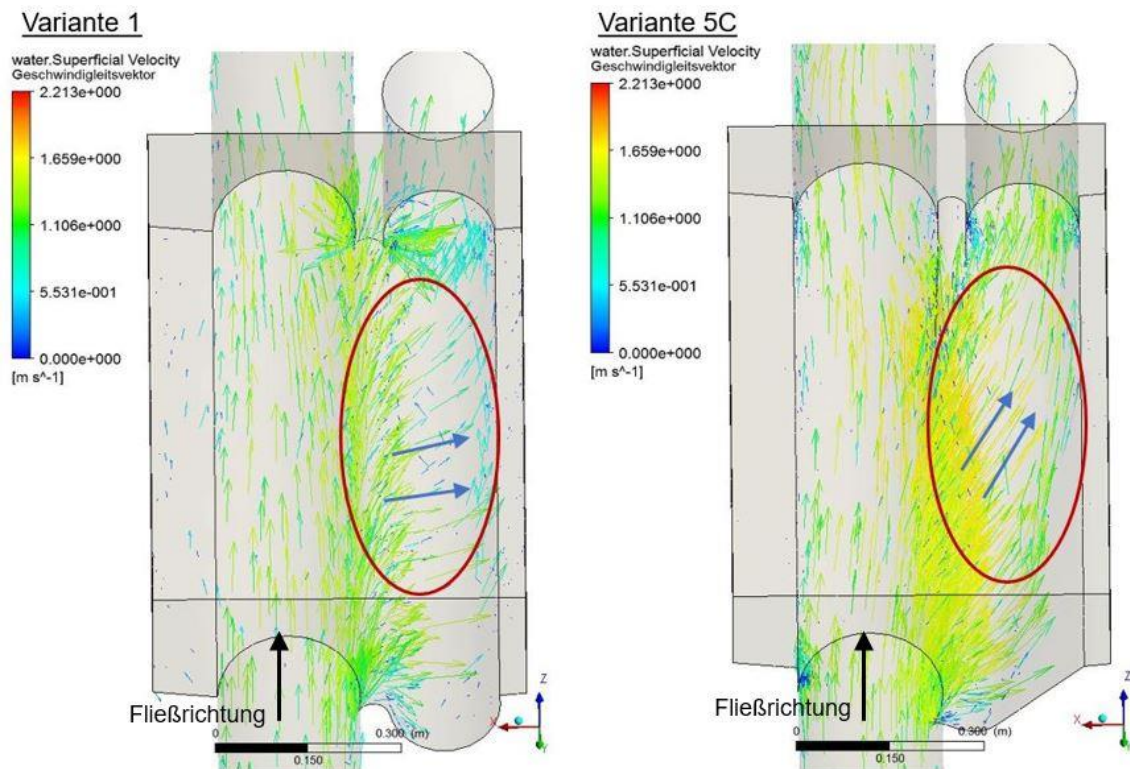


Abbildung 48 - Vergleich Geschwindigkeitsvektoren für Abfluss 31,8 l/s

Eine genaue Betrachtung der Strömungslinien (Abbildung 49) zeigt die Vorzüge von Variante 5C gegenüber Variante 5B. Aufgrund des längeren Wehrrückens beschleunigt das Wasser bei Variante 5B mehr in x-Richtung (normal zur Fließrichtung der Ulmendrainage). Dadurch bildet sich eine walzenähnliche Strömung, die das Wasser bei sehr großen Abflussmengen teils zurück in die Ulmendrainage strömen lässt. Eine geringere Abflussleistung sowie eine stärkere Belüftung des Drainagewassers sind die Folge. Variante 5C beeinflusst den Abfluss in der Ulmendrainage jedoch kaum und führt das ausgeleitete Wasser sehr gleichmäßig in Richtung der Ausleitung zum Sammelkanal. Zusätzlich kann durch den sanften Übergang zwischen Schachtsohle und Ableitungsrohr sowie dem zielgerichteten Ableiten ein Fließwechsel in diesem Bereich vermieden werden. Somit erfüllt Variante C alle geforderten Punkte und kann den numerischen Berechnungen nach eindeutig als die den Rahmenbedingungen und Richtlinien entsprechend optimale Verbesserungsvariante empfohlen werden.

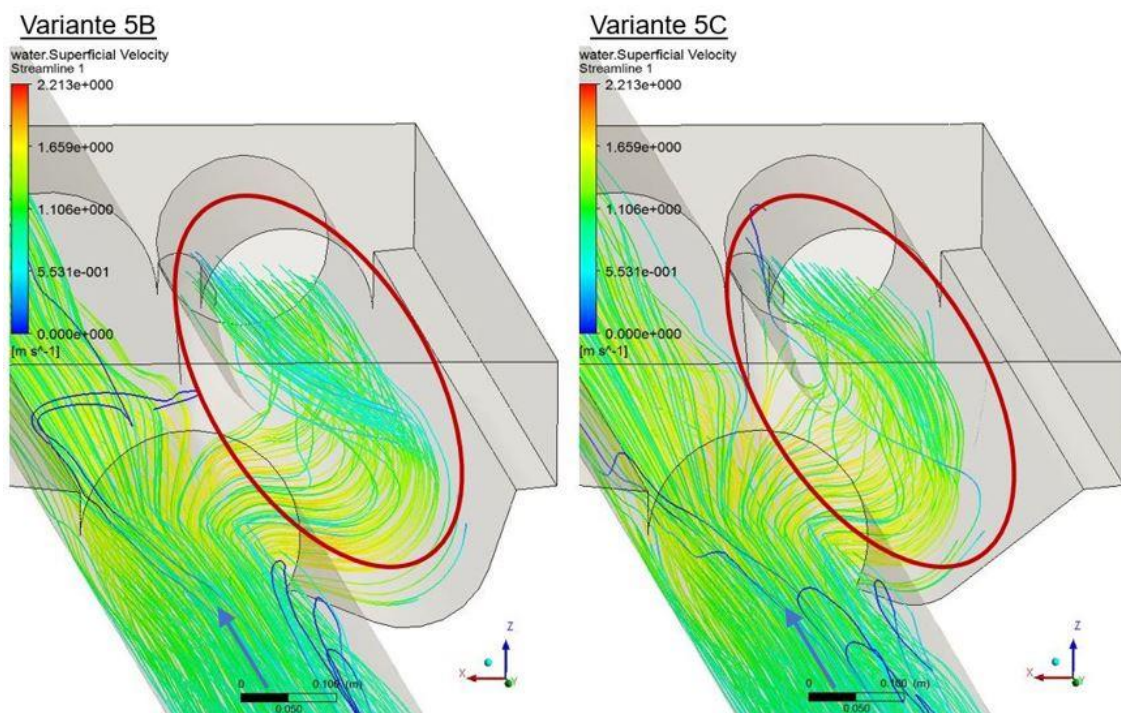


Abbildung 49 - Strömungslinien Variante 5B (links) und Variante 5C

## 8.2 Hydraulische Optimierung der Einleitung in den Sammelkanal

Aufgrund der festgesetzten Kriterien und der beengten Platzverhältnisse sind der hydraulischen Optimierung der Einlaufleitung in den Sammelkanal Grenzen gesetzt. Entscheidendes Kriterium bei der Einleitung ist die Fließgeschwindigkeit, welche sich aufgrund der starken Neigung in der Zuleitung einstellt (Höhenunterschied von 0,95 m). Da bevorzugt handelsübliche Formstücke eingesetzt werden sollten und die Vergrößerung des Bogenradius eher negative Effekte hätte scheidet dies aus. Eine Verringerung der Neigung ist aufgrund des Achsabstandes der jeweiligen Wartungsschächte kaum möglich. Ziel ist es durch die Einleitung der abgeleiteten Wässer die im Sammelkanal vorhandene Strömungssituation möglichst wenig zu beeinflussen.

Die genaue Ausführung der geplanten Variante wird kurz in *Kapitel 4.2 - Einleitung Sammelkanal* erläutert. Die detaillierte Ausschreibungsplanung kann dem Anhang entnommen werden. Im Rahmen dieser Studie werden neben der geplanten Einleitungsgeometrie zusätzlich noch vier weitere Varianten analysiert (Abbildung 50):

- Variante 1: Einleitung im oberen Rohrabschnitt
- Variante 2: Direkte Einleitung in den oberen Rohrabschnitt – Verzicht auf 15°-Bogenstück am Ende der Ableitung.
- Variante 3: Direkte Einleitung in den unterer Rohrabschnitt – Verzicht auf 15°-Bogenstück am Ende der Ableitung.
- Variante 4: Anordnung einer Drossel, welche das Wasser in der Ableitung staut und eine definierte Menge in den Sammelkanal einleitet.

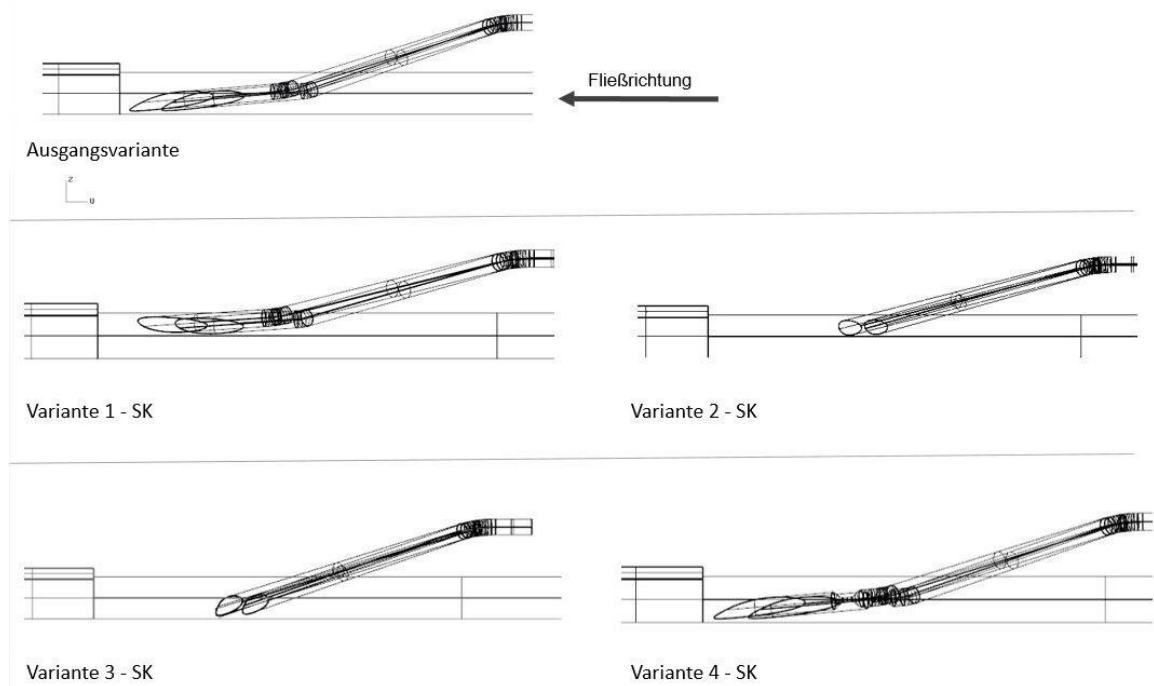


Abbildung 50 - Varianten Einleitung Sammelkanal

Durch den in Kapitel 4.2 erwähnten leichten Versatz des Sammelkanals zur Tunnelachse (150 mm) entsteht bei der Einleitung eine leichte Asymmetrie. Da in den meisten Fällen der Zulauf aus linker und rechter Ulme variiert, ist eine Anpassung der Einleitung auf exakt gleiche Einbindeposition (linke und rechte Seite) zwar möglich, würde jedoch den Aufwand bzw. die Anwendung eines Sonderformstückes nicht rechtfertigen. Der Grund hierfür liegt darin, dass hydraulische Vorteile nur dann zu erwarten wären, würden beide Einleitungen immer gleich stark dotiert sein. Da dies über den Verlauf des Tunnels kaum zu erwarten ist, stellt die leichte Asymmetrie keinen nennenswerten Nachteil dar.

### 8.2.1 Analyse der Varianten - Einleitung Sammelkanal

Bei der Berechnung der Varianten zeigt sich sehr klar, dass vor allem der Geschwindigkeitszuwachs in der Ableitung ein Problem darstellt (Geschwindigkeiten bis zu 3.5 m/s). Durch den 15°-Knick vor der Einleitung wird bei den Modellen Ausgangssituation sowie Variante 1-SK die Geschwindigkeit in diesem abgebaut. Das abgeleitete Wasser prallt gegen die Rohrwand und erfährt dabei eine Rotation. Durch diese baut sich Energie sowie Geschwindigkeit ab und das Wasser wird relativ beruhigt eingeleitet. Abhängig vom Wasserstand im Sammelkanal fällt das Wasser bei Variante 1 in den Kanal, was zu einer zusätzlichen Belüftung und einer Störung des Abflusses durch zusätzliche Turbulenzen führt. Es zeigt sich also recht deutlich, dass vor allem bei niedrigen Abflüssen eine Einleitung im Sohlenbereich des Sammelkanals von Vorteil ist (Abbildung 51 bis 53).

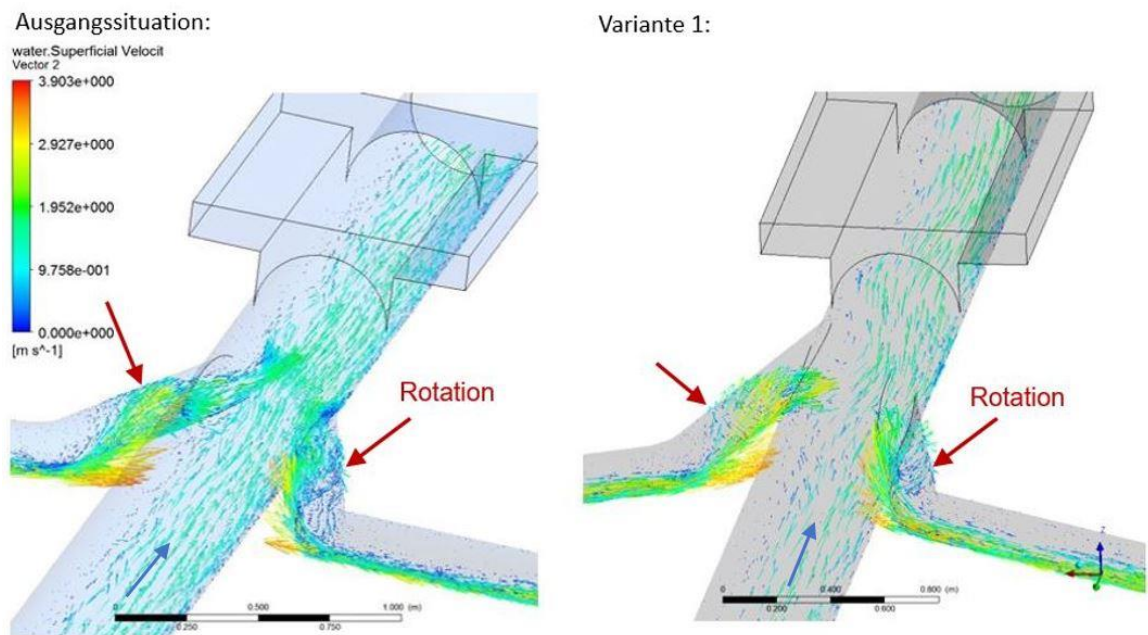


Abbildung 51 - Plot Geschwindigkeitsvektoren

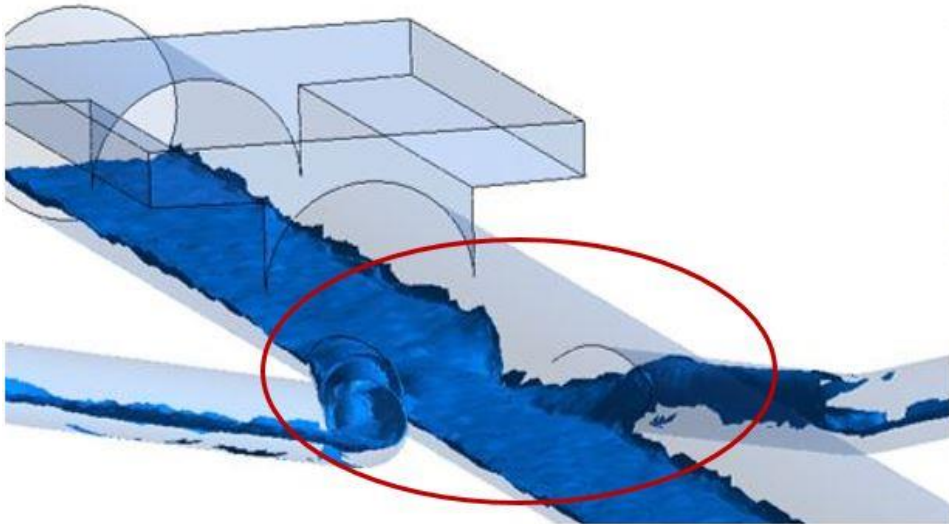


Abbildung 52 - Wasseroberfläche Ausgangssituation SK

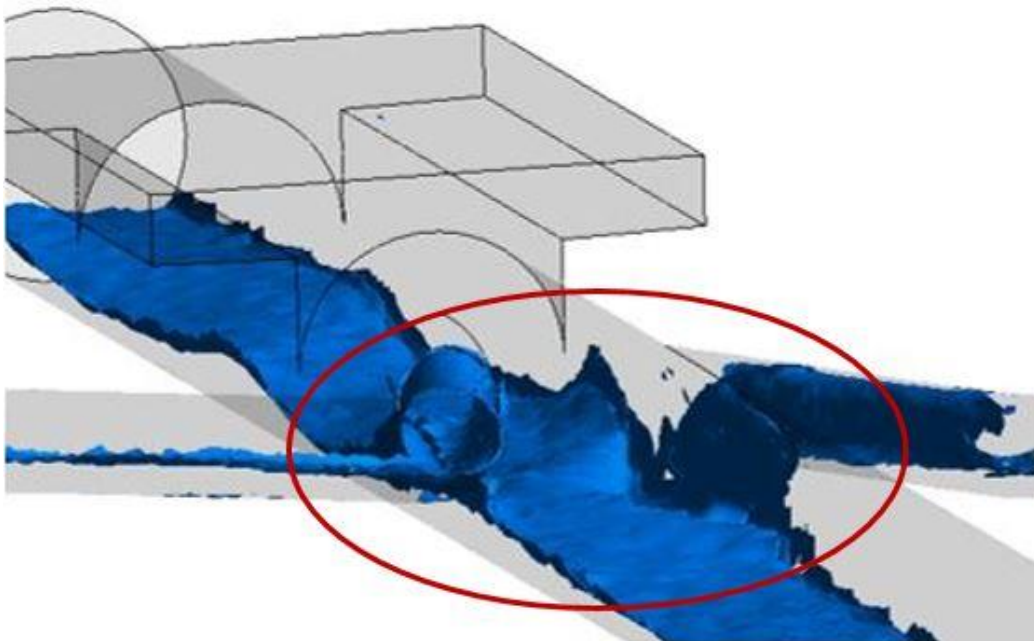


Abbildung 53 - Wasseroberfläche Variante 1-SK

Die weniger schleifende Einleitung in den Sammelkanal, wie sie in Variante 2 und Variante 3 angedacht ist, hat vor allem den Nachteil, dass der Abfluss im Sammelkanal gestört wird. Aufgrund der begrenzten Manövrierbarkeit der Spülsonde sorgt ein steilerer Einleitungswinkel für zusätzliche Probleme bei späteren Spülvorgängen. Aus diesen Gründen werden die beiden Varianten nicht näher erläutert (Abbildung 54)

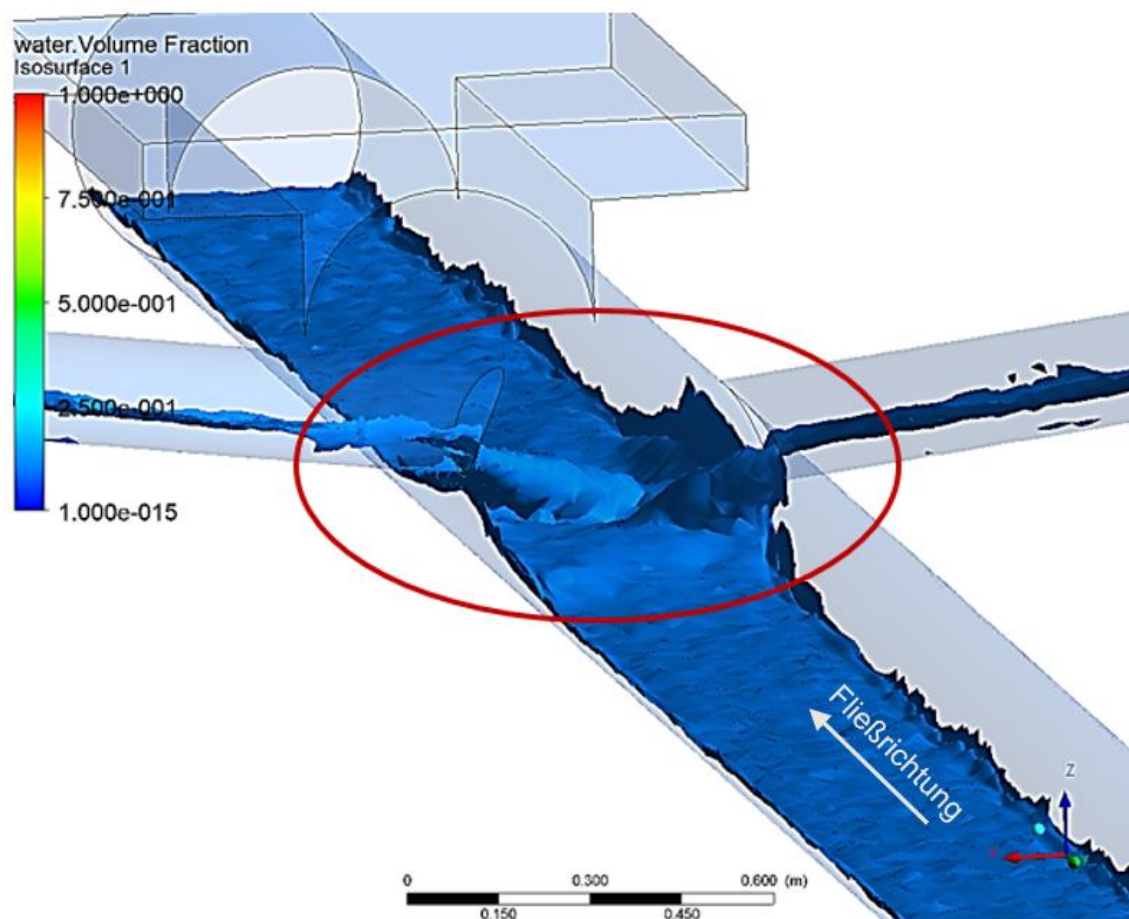


Abbildung 54 - Wasseroberfläche Variante 2

Ebenfalls untersucht wird die Möglichkeit das anfallende Wasser in der Zuleitung mit einer Drossel aufzustauen und kontrolliert durch diese abzugeben. Abbildung 55 zeigt zwar, dass der Einfluss des eingeleiteten Wassers auf den Abfluss im Sammelkanal dadurch minimiert werden kann, jedoch ist eine Dimensionierung der Drossel auf die im Verlauf des Tunnels stark variierenden Abflussmengen nicht möglich. Bei größerem Aufstau vor der Drossel verursacht die hohe Geschwindigkeit mit der das Wasser aus dieser Austritt für starke Turbulenzen welche bis in den Wartungsschacht des Sammelkanals reichen.

Zusätzlich erschwert eine Drossel das Spülen der Leitungen enorm, da Zuleitungen in den Sammelkanal dann nur aus dem Wartungsschacht der Ulmen-drainage heraus gespült werden können. In Addition besteht die Möglichkeit, dass größere gelöste Sinterablagerungen die Drossel verlegen.

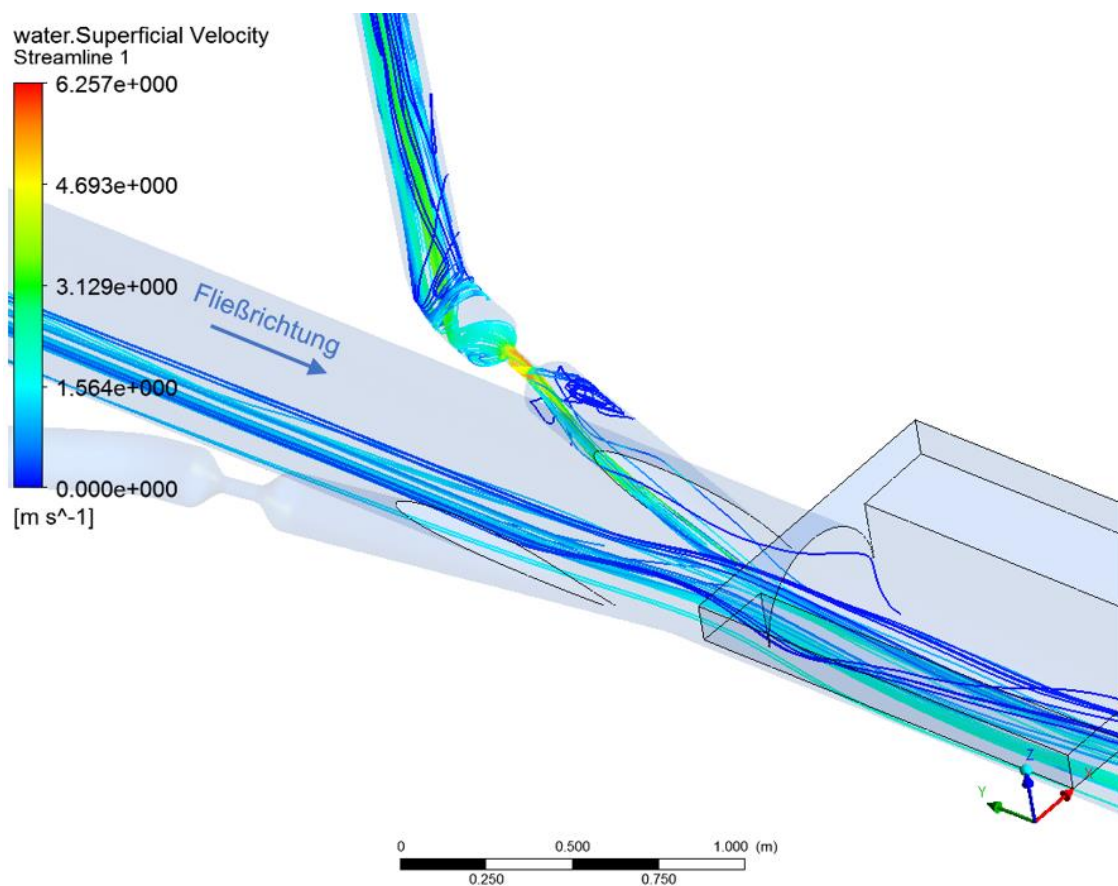


Abbildung 55 - Variante 4 - gedrosselter Zulauf

Die Berechnungen zeigen, dass eine Einleitung, wie bereits in der Ausschreibungsplanung vorgesehen, vor allem in Bezug auf die unterschiedlichen Abflussszenarien die hydraulisch und auch betrieblich sinnvollste Variante darstellt. Eine Anhebung der Einleitung bei größeren Abflüssen im Sammelkanal wurde untersucht, bringt jedoch keine Vorteile. Der Rückstau des Wassers in die Zuleitung sorgt sogar für den Vorteil einer geringeren Beeinflussung der zugeleiteten Wasser auf den Sammelkanal, da sich die Energiehöhe bereits in der Zuleitung auf das Niveau im Sammelkanal angleicht.

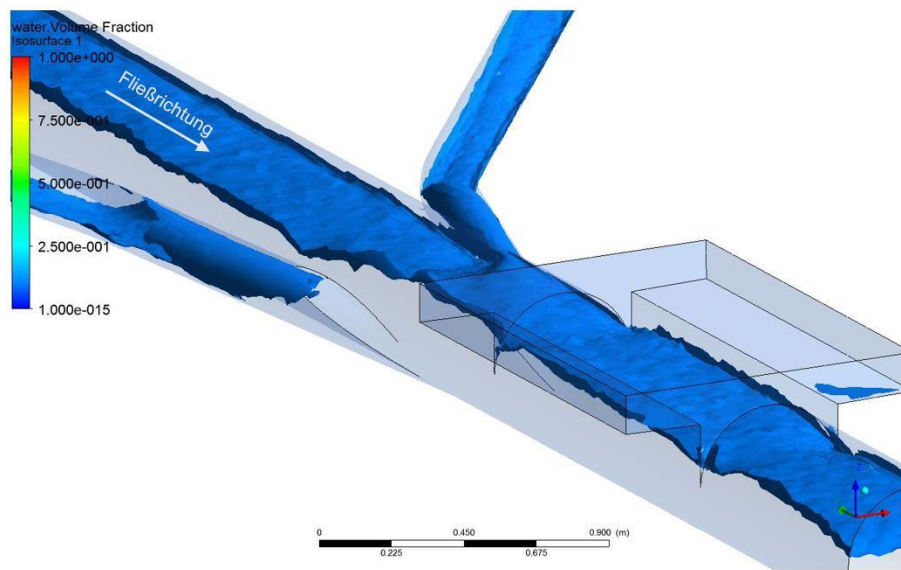


Abbildung 56 – Ausgangsvariante bei  $\frac{3}{4}$  gefülltem Sammelkanal

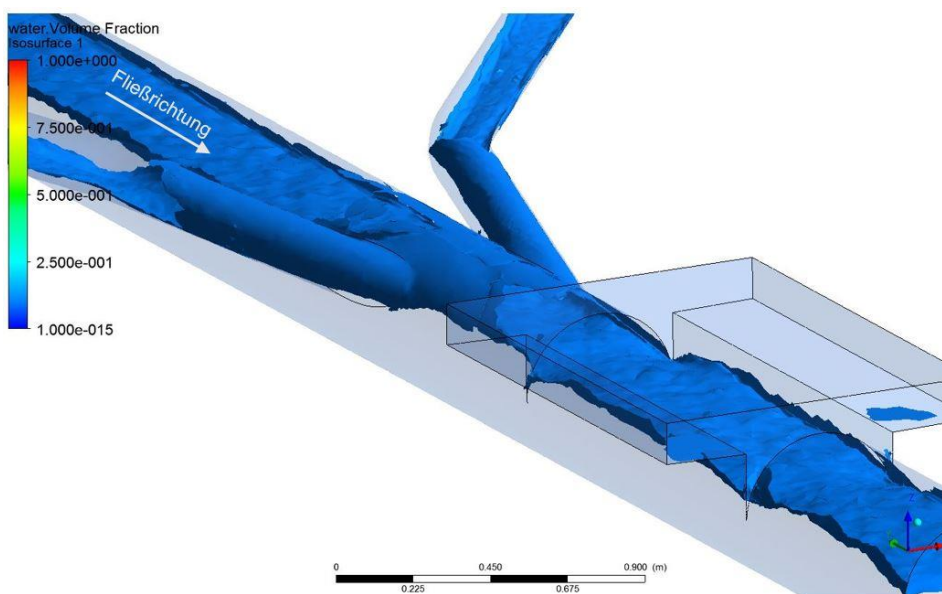


Abbildung 57 - Variante 1-SK bei  $\frac{3}{4}$  gefülltem Sammelkanal

### 8.3 Einfluss der Drainageschlitzte auf den Abfluss

Im Zuge der Bearbeitung des Projekts stellte sich die Frage nach dem Einfluss der Drainageschlitzte der Ulmendrainage (Teilsickerrohre) auf das Abflussverhalten. Dabei ist die Geometrie der Rohre wesentlich. Drainagerohre im Tunnelbau weisen nicht wie im Hochbau um das gesamte Rohr Schlitzte auf sondern, werden nur in einem  $220^\circ$ -Winkel geschlitzt (Teilsickerrohre). Zum Einsatz kommen teils Fertigteilrohre, teilweise werden die Schlitzte jedoch auch mittels Flex vor Ort in handelsübliche Vollmantelrohre eingearbeitet. In beiden Fällen muss mit sehr scharfen Kanten gerechnet werden, die das Abflussverhalten durchaus beeinflussen. Begründet ist dies dadurch, dass jede Unebenheit/Erhebung an der Rohrrinnenwand für mikroskopisch kleine Verwirbelungen sorgt. Diese führen infolge innerer Reibung zu Energieverlusten. Um diesen Effekt in den Berechnungen zu berücksichtigen, werden für verschiedenste Materialien die Sandrauheit  $k_s$  bzw. die technische Rauheit  $k$  angegeben. Die Sandrauheit bezieht sich auf die Rauheit, welche Sand einheitlicher Korngröße hervorrufen würde (=äquivalente Sandrauheit). Da die Unebenheiten in der Realität jedoch in unterschiedlichen Höhen vorkommen, wird oft auf die technische Rauheit zurückgegriffen, welche diesen Effekt beschreibt. Bei der Berechnung von Reibungsverlusten besteht zwischen den beiden Faktoren jedoch kein Unterschied.

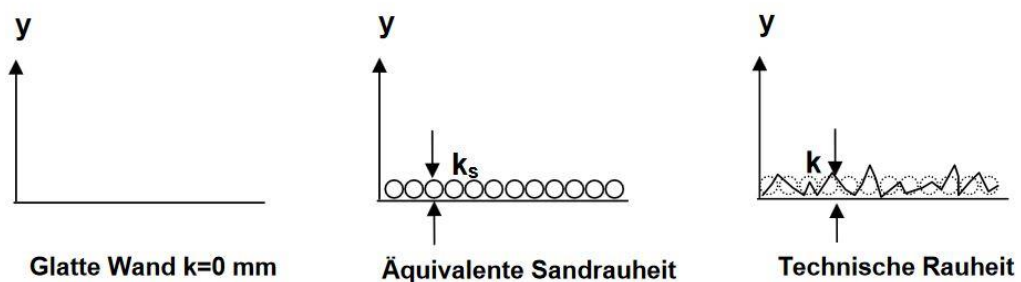


Abbildung 58 - Modellvorstellung der unterschiedlichen Rauheitsbeschreibungen  
(Eisenhauer, 2017)

### 8.3.1 Berechnungsansatz

Da die Anzahl und das Flächenmaß der Schlitze nicht exakt vorgegeben ist und hauptsächlich von der Rohrstatik und der Menge an anfallendem Bergwasser abhängt, wurde die Anordnung und Größe der Schlitze an die Mindestanforderungen der *Richtlinie Tunnelentwässerung* angelehnt. Diese schreibt vor:

*Die Rohrform ist ... kreisrund mit glatter Innenwandung und dichten Muffen zu wählen. Bevorzugt sind geschlitzte Rohre zu verwenden. Die Schlitze müssen eine Öffnungsweite  $\geq 5 \text{ mm}$  bis  $\leq 10 \text{ mm}$ , die Bohrungen einen Durchmesser  $\geq 10 \text{ mm}$  bis  $\leq 15 \text{ mm}$  aufweisen. Die Wassereintrittsfläche (ca.  $220^\circ$  bei Teilsickerrohr und ca.  $120^\circ$  bei Mehrzweckrohr) muss beim Teilsickerrohr mindestens  $200 \text{ cm}^2/\text{m}$  geschlitztes/gebohrtes Rohr und beim Mehrzweckrohr mindestens  $100 \text{ cm}^2/\text{m}$  betragen (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010).*

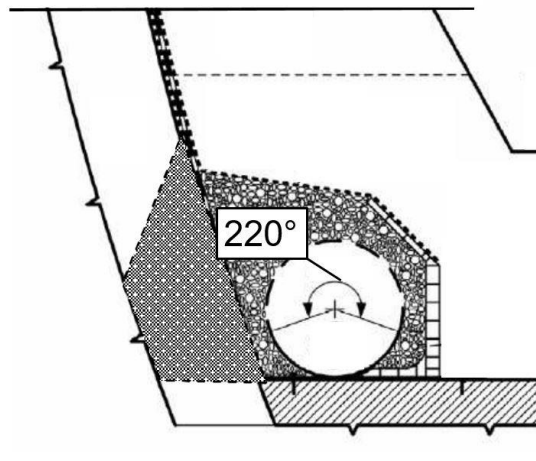


Abbildung 59 - Beispiel Einbau Ulmendrainage - geschlitzte Seite nach oben  
(SBB CFF FFS, 2010)

Die Ulmendrainage im Semmering-Basistunnel weist einen Innendurchmesser von 240 mm auf. Angenommen wurde eine Schlitzbreite von 7,5 mm bei einer über  $220^\circ$  durchgehenden Schlitzung. Bei einem Schlitzabstand von 12,5 cm ergibt sich also eine Schlitzfläche von  $275 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

Zur Berechnung der technischen Rauheit wurde ein 3 Meter langes Rohr mit 240 mm Durchmesser mit rundumlaufenden Schlitzen modelliert. Die Schlitze weisen eine Tiefe von 5mm auf (Stärke der Rohrwand). Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Schlitze dicht sind, d.h. kein Wasser vom Rohrrinneren nach außen transportiert wird (und umgekehrt). Der Durchfluss durch dieses Rohr bei Vollfüllung wird stationär mittels Ansys simuliert.

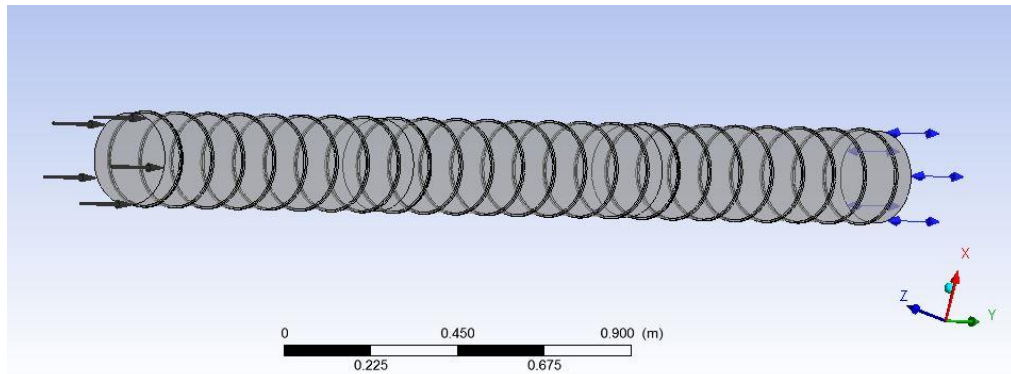


Abbildung 60 - Berechnungsmodell zur Bestimmung von  $k$

### 8.3.2 Ergebnis

Die stationäre Berechnung des Modells ergibt neben Anfangs- und Enddruck auch die beiden Geschwindigkeiten. Zusammen mit den Höhen lässt sich daraus mittels Bernoulli-Gleichung die Verlusthöhe  $h_f$  aufgrund der Rohrreibung berechnen. Damit lässt sich sehr einfach die Rohrreibungszahl  $\lambda$  bestimmen. Mittels Rohrreibungszahl und Reynoldszahl lässt sich dann aus dem Moodydiagramm die Rauheit  $k$  bestimmen.

Tabelle 3 - Ergebnisse Berechnung Drainagerohr

<b><u>Ergebnis der Simulation:</u></b>					
<i>velocity Inlet</i> $v_1$	1.37	[m/s]	<i>velocity Outlet</i> $v_2$	1.37	[m/s]
<i>pressure Inlet</i> $p_1$	312.77	[Pa]	<i>pressure Outlet</i> $p_2$	2.00	[Pa]
<i>Höhenunterschied</i>	24	[mm]			
<b>daraus folgt:</b>	<b><math>\Delta p</math></b>	<b>310.77</b>	<b>[Pa]</b>	<b><math>\Delta v</math></b>	<b>0.00</b>
					<b>[m/s]</b>

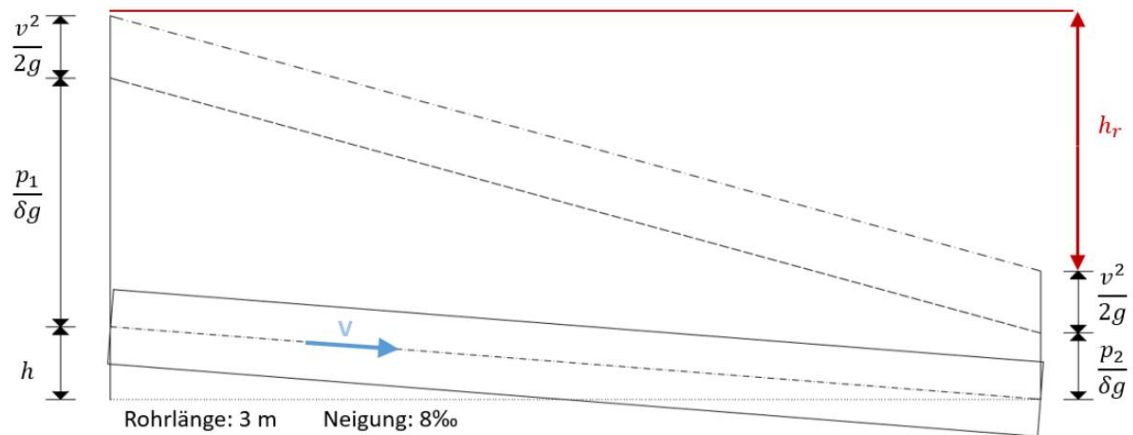


Abbildung 61 - Skizze zur Berechnung der Rohrreibung

Eingesetzt in die Bernoulli-Gleichung ergibt sich:

$$h_r = h + \frac{\Delta p}{\delta * g} = 0,056 \text{ m} \quad (8.3)$$

Die Rohrreibungszahl folgt aus:

$$h_r = 0,056 = \lambda * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2g} = \lambda * \frac{3}{0,24} * \frac{1,37^2}{2g} \rightarrow \lambda = 0,046 \quad (8.4)$$

Durch Bestimmung der Reynoldszahl, welche in diesem Fall  $2,5 \cdot 10^5$  beträgt, kann man im Moody-Diagramm den Faktor  $k/d$  ablesen aus dem sich ein  $k$  von **~ 4 mm** ergibt.

$$Re = \frac{v * D}{\vartheta} = \frac{1,37 * 0,24}{1,31 * 10^{-6}} = 2,5 * 10^5 [-] \quad (8.5)$$

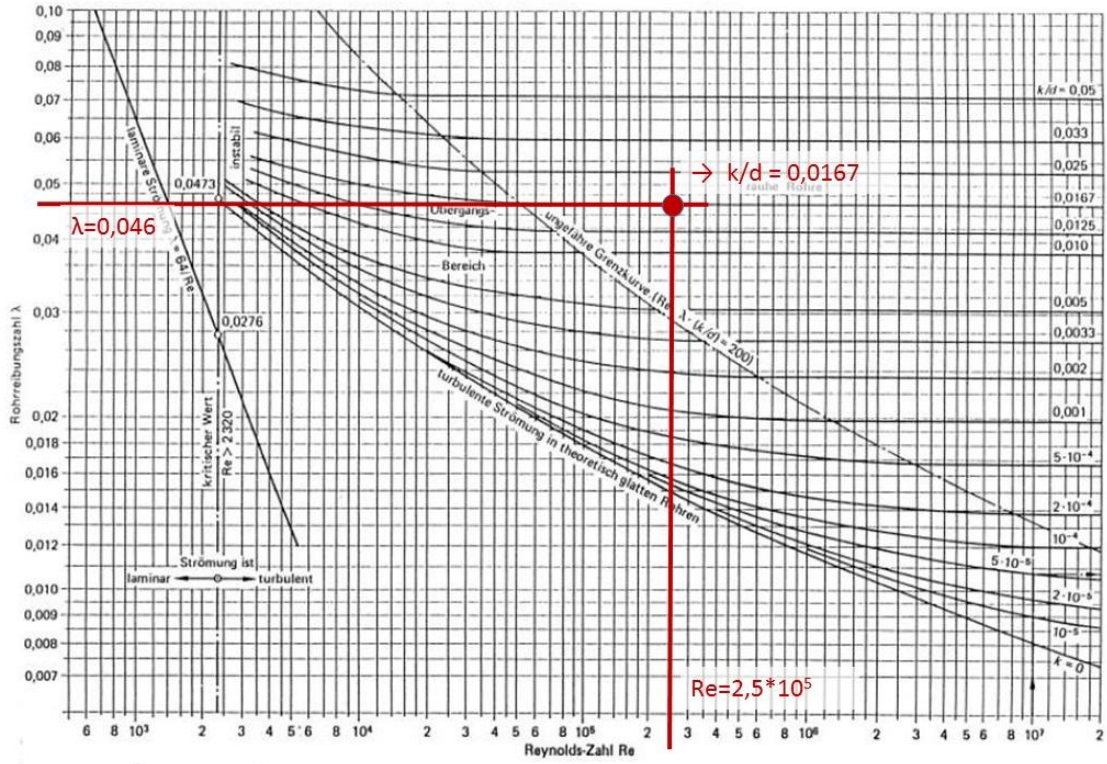


Abbildung 62 - Moody-Diagramm (Bollrich, 2013)

Abbildung 63 zeigt die Druckabnahme sowie die Veränderung in der Fließgeschwindigkeit. Das Wasser wird am Inlet mit über den Querschnitt konstanter Geschwindigkeit eingeleitet. Aufgrund der Verwirbelungen in den Schlitten wird das Wasser an der Wand verlangsamt. Zum Rohrinne hin steigt jedoch die Geschwindigkeit (Abbildung 64).

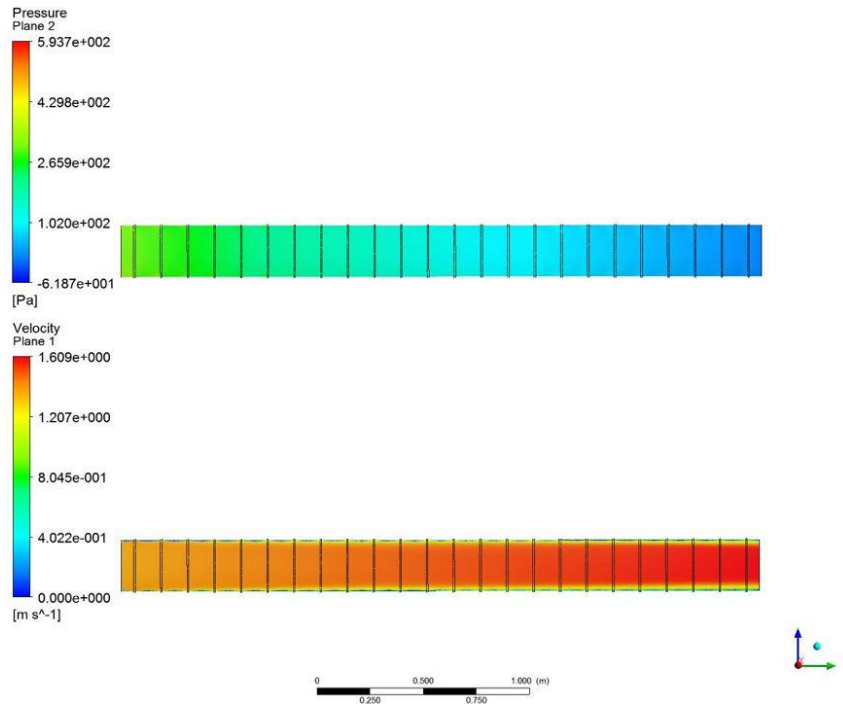


Abbildung 63 - Plot: Druck und Geschwindigkeitsverteilung

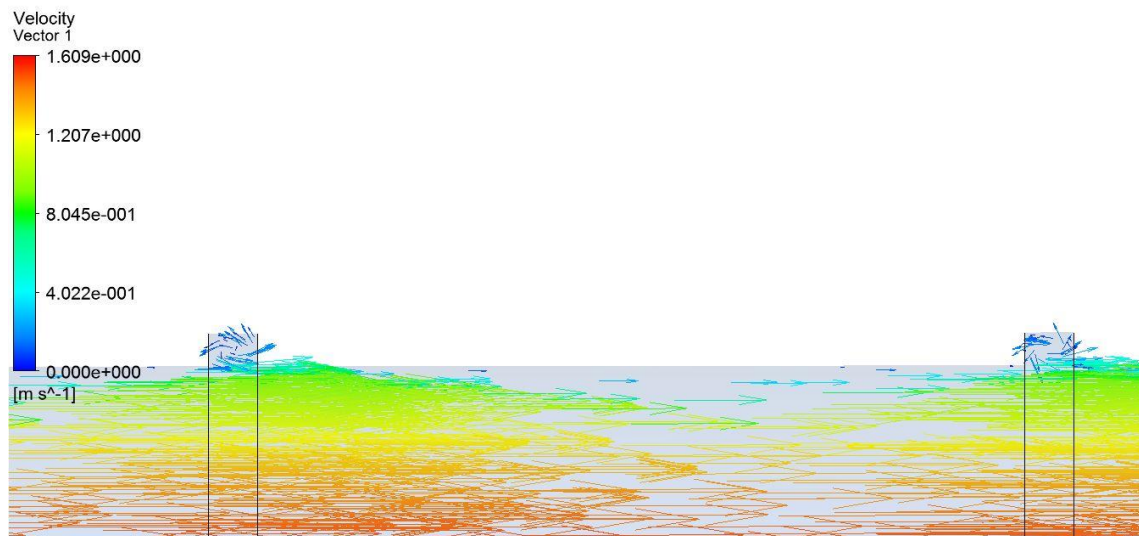


Abbildung 64 - Geschwindigkeitsvektoren in den Drainageschlitten

Für Drainagerohre bedeutet dies, dass durch die kleinen Verwirbelungen am Kontaktpunkt Wasseroberfläche-Schlitz einerseits der Abfluss gestört, aber auch vermehrt  $\text{CO}_2$  in das Wasser eingetragen wird. Die Folge ist eine verstärkte Sinterbildung auch direkt an den Schlitzen. Für die Planung der Drainage ergibt sich daraus die optimale Restwasserhöhe in der Ulmendrainage. Liegt der Abfluss unter dem Einflussbereich der Schlitzes wird er kaum gestört und Turbulenzen vermieden. Daraus ergibt sich auch die Wehrhöckerhöhe von 6 cm. Da die Schlitzes erst ab ca. 8 cm Abflusshöhe erreicht werden, kann bei mäßigem Bergwasserandrang dieses abgeführt werden, noch bevor die Strömung durch die Drainageschlitzes negativ beeinflusst wird.

## 9. Ausführungsvorschlag

### 9.1 Ulmenausleitung

Im Zuge dieser Masterarbeit hat sich Variante 5C als die, den numerischen Berechnungen nach, optimale Variante herausgestellt. Diese Variante generiert den erforderlichen Mindestabfluss von 10 l/s bei Halfüllung der Ulmendrainage und weist zusätzlich die geringsten Turbulenzen auf. Die folgenden Abbildungen 65 bis 67 bilden den Ausführungsvorschlag (Variante 5C) ab. Der maßstabsgetreue Plan kann dem Anhang entnommen werden. Das 3D-Modell befindet sich am beiliegenden Datenträger.

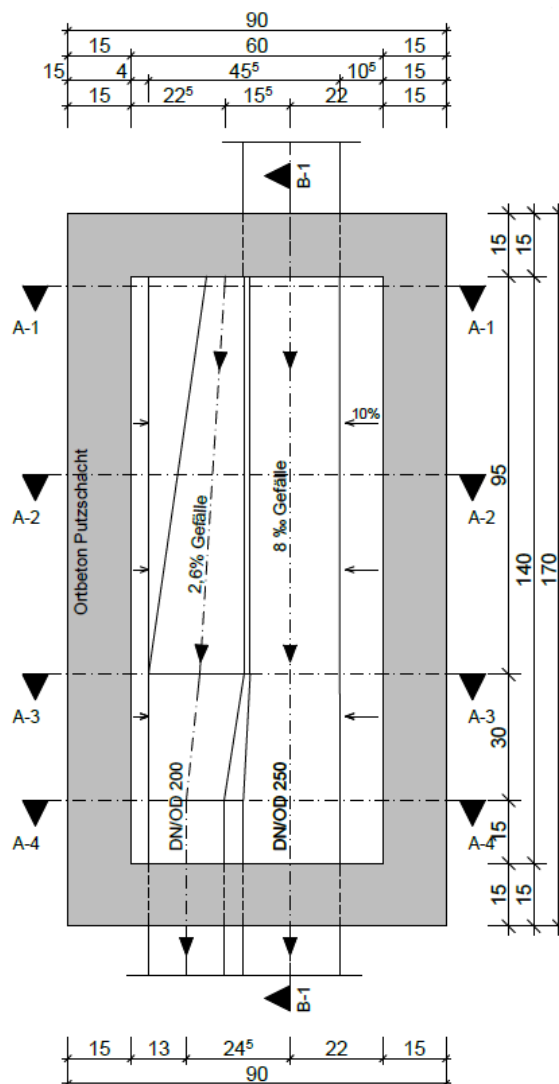


Abbildung 65 - Ausführungsvorschlag Grundriss (Variante 5C)

Die Höhenangaben in den Schnitten beziehen sich auf  $\pm 0,00 = \text{SOK}$ .

### Schnitt A-1

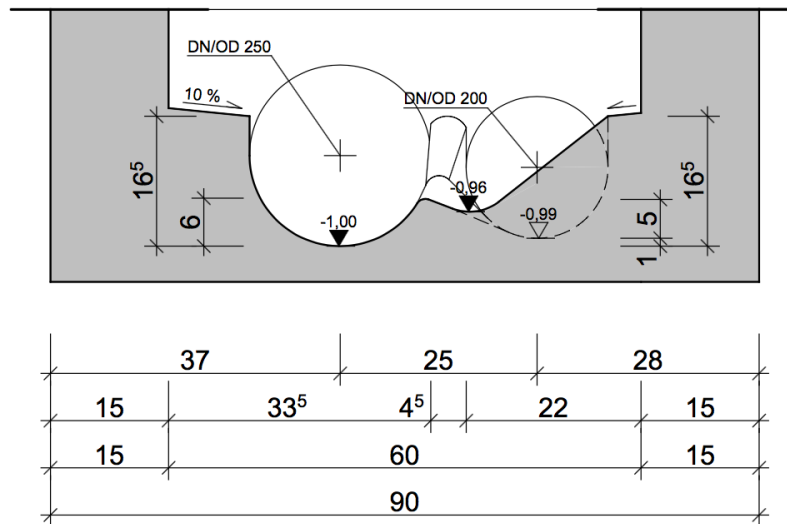


Abbildung 66 – Ausführungsvorschlag Schnitt A-1

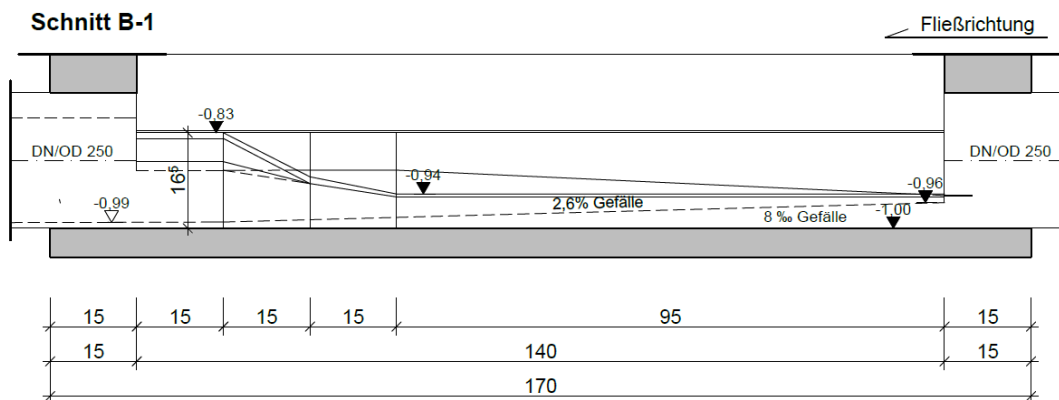


Abbildung 67 - Ausführungsvorschlag Schnitt B-1

Die Schnitte A-2, A-3 und A-4 befinden sich im Anhang B

## 9.2 Einleitung Sammelkanal

Bezüglich der Einleitung in den Sammelkanal wird eine Ausführung nach der Ausschreibungsplanung vorgeschlagen, weshalb keine zusätzlichen Pläne angeführt werden.

## 10. Schlussfolgerung

### 10.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Arbeit zeigt das Verbesserungspotenzial durch eine hydraulische Optimierung des Drainagesystems im Bereich der Ausleitung aus der Ulmendrainage. Eine Ausführung nach Ausgangsvariante wird den Berechnungen nach, bei größerem Bergwasserandrang sehr schnell überlastet sein. Durch eine technisch einfache Lösung – einsetzen eines speziell hergestellten Fertigteil PVC-Kunststoffgerinnes – kann die Abflussleistung des Streichwehrs erhöht werden und es stellen sich auch positive Auswirkungen auf das Abflussverhalten des Wassers ein. Das in der Ulmendrainage abfließende Wasser wird durch die Entnahmekaum beeinträchtigt und fließt dadurch sehr gleichförmig und ohne starke Vermischung durch etwaige Wechselsprünge durch den Wartungsschacht. Die abgeleiteten Wässer werden ebenfalls weniger belüftet und fließen vom Wehr zügig ohne aufzustauen in den Ableitungskanal. Im Vergleich zur Ausgangsvariante kann durch die Optimierung ein beruhigter Abfluss erzielt werden. Dadurch wird ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Versinterungen (die Ausgasung von  $\text{CO}_2$ ) vermindert und es kann von einem verringerten Ablagerungsaufkommen ausgegangen werden.

Die Reduktion der Regelabflusstiefe auf 60 mm in der Ulmendrainage führt zu keiner nennenswerten Verminderung des Sedimenttransports, da aufgrund des Gefälles und der Querschnittsführung recht hohe Abflussgeschwindigkeiten erreicht werden. Dadurch wird der Abfluss jedoch nicht negativ von den Drainageschlitzten beeinflusst und eine weniger turbulente Strömung stellt sich ein.

Im Bereich der Einleitung in den Sammelkanal ist aufgrund der engen Vorgaben bzw. des begrenzten Platzes eine hydraulische Verbesserung nur bedingt möglich. Die durchgeführten Berechnungen zeigen jedoch, dass bereits bei der ursprünglichen Variante die Abflussverhältnisse durch die Einleitung nur mäßig beeinflusst werden. Eine technisch aufwändige Lösung würde hier den Wartungsaufwand erhöhen und keine nennenswerte Verbesserung der Sinterproblematik mit sich bringen. Wirkliche Verbesserungen könnten hier nur durch geänderte

Randbedingungen erreicht werden, da aufgrund des großen Höhenunterschiedes zwischen Ulmendrainage und Sammelkanal das Wasser sehr steil und daher mit hoher Geschwindigkeit abgelenkt wird.

## 10.2 Ausblick

Die bereits sehr weit fortgeschrittenen Möglichkeiten, welche durch CFD-Analysen gegeben sind, stellen vor allem im Wasserbau eine gute Basis für Variantenuntersuchungen und Vergleiche dar. Anhand eines Prototyps können im Modellversuch neben verschiedensten Abflussszenarien auch Wartungsarbeiten oder bestimmte Störfälle überprüft werden. Der nächste logische Schritt in der hydraulischen Optimierung des Drainagesystems liegt demnach in einer Überprüfung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse mittels eines Prototyps im Labor. Der Aufbau dieses Versuchs hängt wesentlich von den daraus erhofften Erkenntnissen ab. Aufgrund der teils sehr geringen Zuflüsse und Abmessungen empfiehlt sich ein Versuchsaufbau in Originalgröße. Der Vorteil eines solchen Modells liegt einerseits darin, dass teilweise dieselben Materialien wie im späteren Bauzustand eingesetzt werden können und der Lufteintrag sowohl qualitativ als auch quantitativ beobachtet werden kann. Zusätzlich kann jedoch auch die generelle Servicierbarkeit und das Wartungsequipment in realitätsnahen Bedingungen getestet werden.

## Literaturverzeichnis

**Autodesk Inc. Help (2017):** SST-k-Omega-Turbulenzmodelle. <https://knowledge.autodesk.com/de/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloud-help/2015/DEU/SimCFD-Learning/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html> (29.04.2017).

**Bollrich G (2013):** Technische Hydromechanik 1. Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, 7. Aufl., s.l.

**Chabot J (2002):** Entwässerung bergmännischer Tunnel. Tunnel: 18–24.

**Dietzel M, Rinder T, Leis A, Reichl P, Sellner P, Draschitz C, Plank G, Klammer D, Schöfer H (2008):** Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems - Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action. Geomechanik und Tunnelbau 1: 271–278.

**Dietzl M, Rinder T, Niedermayer A, Köhler S, Leis A (2008):** Versinterung in Drainagesystemen von Tunnelbauten - Mechanismen, Monitoring und Prognosen. In: Gruppe Geotechnik Graz (Hrsg.), Drainagesysteme im Tunnelbau Design, Versinterung und Instandhaltung. Technische Universität Graz, Graz, 89–100.

**Döring M (2016):** Wasser für die Dekapolis. Römische Fernwasserleitung in Syrien und Jordanien. DWhG, Siegburg.

**Eisenhauer N (2017):** Beschreibung Rauheit. [http://www.ab.hs-karlsruhe.de/VAW/01\\_wissen/01\\_2\\_hydromechanik/01\\_2\\_stroemung\\_a/file.2007-10-04.8187185336](http://www.ab.hs-karlsruhe.de/VAW/01_wissen/01_2_hydromechanik/01_2_stroemung_a/file.2007-10-04.8187185336) (03.05.2017).

**Girmscheid G (2008):** Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. 2: Auflage. Ernst & Sohn, Berlin.

**Girmscheid G, Gamisch T, Klein T, Meinlschmidt A (2003):** Versinterung von Tunnel drainagen - Mechanismen der Versinterungsentstehung. In: Hegger J (Hrsg.), Bauingenieur. Die richtungswisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 292–300.

**Kusterle W, Pichler W, Saxer A (2011):** Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotenzials von Spritzbeton - Einflussfaktoren. Beton- und Stahlbetonbau 106: 847–852.

**Laurien E, Oertel H (2009):** Numerische Strömungsmechanik. Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit ; mit über 320 Wiederholungs- und Verständnisfragen. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden.

**(2017):** Lexikon der Geowissenschaften. Sinterstufe. <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/sinterstufe/15028> (28.04.2017).

**Maidl B, Thewes M, Maidl U, Sturge D (Hrsg.) (2014):** Handbook of tunnel engineering. Ernst/Wiley, Berlin.

**ÖBB-Infrastruktur AG (2016):** Semmering-Basistunnel. Die neue Dimension des Reisens.

**Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2010):** Richtlinie Tunnelentwässerung (27.04.2017).

**Saxer A, Draschitz C (2010):** Eluatverhalten von Tunnelbaustoffen. Schlussbericht des Forschungsvorhabens im Auftrag der ÖBB.

**SBB CFF FFS (2010):** Ausführungs- und Qualitätsvorschriften für die Tunnelentwässerung (26.04.2017).

**Schwarze R (2013):** CFD-Modellierung. Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen. Springer, Berlin, Heidelberg.

**Sellner P, Rinder T, Draschitz C, Bacher W (2008):** Versuch zur Versinterung und Härtestabilisierung im Koralmtunnel. Auswirkungen auf modifizierte Drainagesysteme. In: Gruppe Geotechnik Graz (Hrsg.), Drainagesysteme im Tunnelbau Design, Versinterung und Instandhaltung. Technische Universität Graz, Graz, 71–89.

**Thinkstock (2013):** Thermalquelle von Pamukkale. News 19.04.2013.  
<https://www.news.at/a/urlaubs-highlights-nat%C3%BCrliche-pools/4034789>  
(28.04.2017).

**Westhoff T (2008):** Wasserrechtliche und ökologische Aspekte bei der Härte-  
stabilisation. In: Gruppe Geotechnik Graz (Hrsg.), Drainagesysteme im Tunnel-  
bau Design, Versinterung und Instandhaltung. Technische Universität Graz,  
Graz, 163–170.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Verlauf der Trassenvariante Pfaffensattel mit Zwischenangriffen (ÖBB-Infrastruktur AG, 2016) .....	2
Abbildung 2 - Drainagesystem eines alten Eisenbahntunnels (Maidl et al., 2014) .....	4
Abbildung 3 – druckwasserhaltende Abdichtung (Maidl et al., 2014) .....	6
Abbildung 4 - druckregulierte Entwässerung (Maidl et al., 2014) .....	7
Abbildung 5 - Drainiert und Bergwasserdruck haltend .....	8
Abbildung 6 - Drainierter Tunnel mit drucklosen Abfluss (Maidl et al., 2014) .....	9
Abbildung 7 - Beispielhafte Skizze eines Drainagerohrs (SBB CFF FFS, 2010) .....	11
Abbildung 8 - Schematische Darstellung einer Sinterstufe (Spektrum Akademischer Verlag, 2017) .....	13
Abbildung 9 – Kalksinterterrassen in Pamukkale, Türkei (Thinkstock, 2013) ...	13
Abbildung 10 – (a) verputzter Schacht; (b) Wasserstandsbestimmung aufgrund der Sinterablagerungen (Döring, 2016) .....	14
Abbildung 11 - Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage inkl. der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Versinterung (Kusterle et al., 2011) .....	16
Abbildung 12 - Kalzitsinter in einer Drainageleitung des Koralmtunnels (Dietzel et al., 2008) .....	17
Abbildung 13 - Versinterungsvorgänge (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010) .....	18
Abbildung 14 - Ausschnitt aus dem Übersichtslängenschnitt Gleis 1 (Plan Nr.: 5510-EB-0100AL-05-0501-F01) .....	25
Abbildung 15 - Zufluss Bergwasser in Ulmendrainage (Plan Nr.: SBT3.1-AS-0800TU-03-0202-F03) .....	26
Abbildung 16 - Zufluss Bergwasser Detail A und B (Plan Nr.: SBT3.1-AS-0800TU-03-0202-F03) .....	26

Abbildung 17 - Schema der Grundwasser-Entwässerung (Besprechungsprotokoll MA-SBT vom 14.07.2016).....	27
Abbildung 18 - Grundriss Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage laut Ausschreibungsplanung.....	29
Abbildung 19 - Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage - Detail A.....	29
Abbildung 20 - Grundriss Ableitung in den Sammelkanal .....	31
Abbildung 21 - Längsschnitt C-C entlang der Ulmendrainage .....	31
Abbildung 22 - Aufteilung der Berechnungsmodelle .....	38
Abbildung 23 - Projektschema Ansys Workbench 17.1.....	39
Abbildung 24 - Ablauf Modellerstellung für CFD-Analysen .....	41
Abbildung 25 - Erstellung der 3D-Geometrien in Rhino 5.0 .....	42
Abbildung 26 - Erstellung der Solids im Ansys DesignModeler (Querausleitung) .....	43
Abbildung 27 - Benutzeroberfläche Ansys Meshing.....	44
Abbildung 28 - Verknüpfung zweier Solids mittels Interface .....	45
Abbildung 29 - Abflüsse bei Halbfüllung Ulmendrainage und Sammelkanal....	47
Abbildung 30 - Ausleitung Putzschacht Ulmendrainage Plan Nr.: SBT3.1-AS- 0800TU-03-0303-F01 .....	48
Abbildung 31 - 3 Optimierungsstellen an der Ulmenausleitug.....	50
Abbildung 32 - Draufsicht PVC-Sohlelement Putzschacht (Variante 1) .....	51
Abbildung 33 - Variante 1    Abbildung 34 - Variante 1B.....	51
Abbildung 35 - Variante 2    Abbildung 36 - Variante 3 .....	52
Abbildung 37 - Variante 4    Abbildung 38 - Variante 5 .....	53
Abbildung 39 -Wasseroberfläche Variante 1    Abbildung 40 - Variante 5 .....	54
Abbildung 41 - Geschwindigkeitsvektoren Variante 1    Abbildung 42 - Variante 5 .....	54
Abbildung 43 - Hjulström Diagramm (Bollrich, 2013) .....	55

Abbildung 44 – Abflussszenarien für Wehrhöcker 60 mm: 27,6 l/s (links) und 17,9 l/s (rechts).....	56
Abbildung 45- Variantenvergleich Übersicht und Variante 1 .....	58
Abbildung 46 - Variantenvergleich Variante 5B und 5C .....	58
Abbildung 47 - generierte Abflüsse über das Streichwehr .....	59
Abbildung 48 - Vergleich Geschwindigkeitsvektoren für Abfluss 31,8 l/s .....	60
Abbildung 49 - Strömungslinien Variante 5B (links) und Variante 5C .....	61
Abbildung 50 - Varianten Einleitung Sammelkanal .....	63
Abbildung 51 - Plot Geschwindigkeitsvektoren .....	64
Abbildung 52 - Wasseroberfläche Ausgangssituation SK .....	65
Abbildung 53 - Wasseroberfläche Variante 1-SK.....	65
Abbildung 54 - Wasseroberfläche Variante 2.....	66
Abbildung 55 - Variante 4 - gedrosselter Zulauf.....	67
Abbildung 56 – Ausgangsvariante bei $\frac{3}{4}$ gefülltem Sammelkanal.....	68
Abbildung 57 - Variante 1-SK bei $\frac{3}{4}$ gefülltem Sammelkanal.....	68
Abbildung 58 - Modellvorstellung der unterschiedlichen Rauheitsbeschreibungen (Eisenhauer, 2017) .....	69
Abbildung 59 - Beispiel Einbau Ulmendrainage - geschlitzte Seite nach oben (SBB CFF FFS, 2010).....	70
Abbildung 60 - Berechnungsmodell zur Bestimmung von k .....	71
Abbildung 61 - Skizze zur Berechnung der Rohrreibung .....	72
Abbildung 62 - Moody-Diagramm (Bollich, 2013).....	73
Abbildung 63 - Plot: Druck und Geschwindigkeitsverteilung .....	74
Abbildung 64 - Geschwindigkeitsvektoren in den Drainageschlitzten .....	74
Abbildung 65 - Ausführungsvorschlag Grundriss (Variante 5C).....	76
Abbildung 66 – Ausführungsvorschlag Schnitt A-1 .....	77
Abbildung 67 - Ausführungsvorschlag Schnitt B-1 .....	77

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 - Abflüsse Variante 5 abhängig vom Wasserstand in der Ulme [l/s] .	56
Tabelle 2 - Lastfälle Abflussuntersuchung und erreichte Ausleitungsmengen .	59
Tabelle 3 - Ergebnisse Berechnung Drainagerohr .....	71

## Anhang A

Darstellung von zwei ausgewählten CFX-Pre-files:

- Ausleitung Ulmendrainage (Variante 5C) – Ermittlung der Abflussleistung
- Sammelkanal Ausgangsvariante

Ausleitung Ulmendrainage (Variante 5C) Ermittlung der Abflussleistung	Sammelkanal Ausgangsvariante
<pre> LIBRARY: CEL: EXPRESSIONS:   QInletA = massFlow()@InletA   QInletB = massFlow()@InletB   QInletC = massFlow()@InletC   QOutletA1 = massFlow()@OutletA1   QOutletA2 = massFlow()@OutletA2   QOutletB1 = massFlow()@OutletB1   QOutletB2 = massFlow()@OutletB2   QOutletC1 = massFlow()@OutletC1   QOutletC2 = massFlow()@OutletC2   ZuflussUlme = Zufluss Ulme(t)/1 END FUNCTION: Zufluss Ulme   Argument Units = [s]   Option = Interpolation   Result Units = [kg s^-1] INTERPOLATION DATA:   Data Pairs = \ 0,8,5,5,11,1,10,11,1,11,14,3,16,14,3,17,18,23,18,24,21,7,30,21. 7,31,\ 25.65,37,25.65,38,31,8,44,31,8,45,42,50,42,51,52,9,56,52,9   Extend Max = No   Extend Min = No   Option = One Dimensional END END MATERIAL: Air Ideal Gas Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp) Material Group = Air Data, Calorically Perfect Ideal Gases Option = Pure Substance Thermodynamic State = Gas PROPERTIES:   Option = General Material EQUATION OF STATE:   Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]   Option = Ideal Gas </pre>	<pre> # State file created: 2017/05/21 21:25:43 # Build 17.1 2016.04.12-14.50-136032  LIBRARY: CEL: EXPRESSIONS:   Flow Rate = massFlow()@S_Outlet END END MATERIAL: Air Ideal Gas Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp) Material Group = Air Data, Calorically Perfect Ideal Gases Option = Pure Substance Thermodynamic State = Gas PROPERTIES:   Option = General Material EQUATION OF STATE:   Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]   Option = Ideal Gas END SPECIFIC HEAT CAPACITY:   Option = Value   Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]   Specific Heat Type = Constant Pressure END REFERENCE STATE:   Option = Specified Point   Reference Pressure = 1 [atm]   Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]   Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]   Reference Temperature = 25 [C] END DYNAMIC VISCOSITY:   Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]   Option = Value END THERMAL CONDUCTIVITY:   Option = Value   Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m^-1 K^-1] END ABSORPTION COEFFICIENT: </pre>

```

END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
  Option = Value
  Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
  Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
  Option = Specified Point
  Reference Pressure = 1 [atm]
  Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
  Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
  Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
  Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
  Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
  Option = Value
  Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
  Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
  Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
END
MATERIAL: Air at 25 C
  Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
  Material Group = Air Data, Constant Property Gases
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
  Option = General Material
EQUATION OF STATE:
  Density = 1.185 [kg m^-3]
  Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
  Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
  Option = Value
  Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
  Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
  Option = Specified Point
  Reference Pressure = 1 [atm]
  Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
  Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
  Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
  Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
  Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
  Option = Value
  Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
  Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
  Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
  Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
MATERIAL: Air at 25 C
  Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
  Material Group = Air Data, Constant Property Gases
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
  Option = General Material
EQUATION OF STATE:
  Density = 1.185 [kg m^-3]
  Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
  Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
  Option = Value
  Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
  Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
  Option = Specified Point
  Reference Pressure = 1 [atm]
  Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
  Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
  Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
  Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
  Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
  Option = Value
  Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
  Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
  Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
  Option = Value
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
  Option = Value
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END

```

```

Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
THERMAL EXPANSIVITY:
Option = Value
Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]
END
END
MATERIAL: Aluminium
Material Group = CHT Solids, Particle Solids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 2702 [kg m^-3]
Molar Mass = 26.98 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 9.03E+02 [J kg^-1 K^-1]
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 237 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: Copper
Material Group = CHT Solids, Particle Solids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 8933 [kg m^-3]
Molar Mass = 63.55 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 3.85E+02 [J kg^-1 K^-1]
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 401.0 [W m^-1 K^-1]

```

```

Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 8933 [kg m^-3]
Molar Mass = 63.55 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 3.85E+02 [J kg^-1 K^-1]
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 401.0 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: Soot
Material Group = Soot
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 2000 [kg m^-3]
Molar Mass = 12 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
REFERENCE STATE:
Option = Automatic
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 0 [m^-1]
Option = Value
END
END
MATERIAL: Steel
Material Group = CHT Solids, Particle Solids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 7854 [kg m^-3]
Molar Mass = 55.85 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 4.34E+02 [J kg^-1 K^-1]
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 60.5 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: Water
Material Description = Water (liquid)
Material Group = Water Data, Constant Property Liquids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Liquid
PROPERTIES:
Option = General Material

```

```

Option = Value
Specific Heat Capacity = 4.34E+02 [J kg^-1 K^-1]
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 60.5 [W m^-1 K^-1]
END
END
MATERIAL: Water
Material Description = Water (liquid)
Material Group = Water Data, Constant Property Liquids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Liquid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 997.0 [kg m^-3]
Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg^-1 K^-1]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 0.6069 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
THERMAL EXPANSIVITY:
Option = Value
Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K^-1]
END
END
MATERIAL: Water
Material Description = Water Vapour Ideal Gas (100 C and 1
atm)
Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases, Water Data
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
Option = Ideal Gas
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value

```

```

EQUATION OF STATE:
Density = 997.0 [kg m^-3]
Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg^-1 K^-1]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 0.6069 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
THERMAL EXPANSIVITY:
Option = Value
Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K^-1]
END
END
MATERIAL: Water Ideal Gas
Material Description = Water Vapour Ideal Gas (100 C and 1
atm)
Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases, Water Data
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
Option = Ideal Gas
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value

```

```

    Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
  END
  THERMAL EXPANSIVITY:
    Option = Value
    Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K^-1]
  END
  END
  END
  MATERIAL: Water Ideal Gas
  Material Description = Water Vapour Ideal Gas (100 C and 1
  atm)
  Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases, Water Data
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Gas
  PROPERTIES:
    Option = General Material
  EQUATION OF STATE:
    Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
    Option = Ideal Gas
  END
  SPECIFIC HEAT CAPACITY:
    Option = Value
    Specific Heat Capacity = 2080.1 [J kg^-1 K^-1]
    Specific Heat Type = Constant Pressure
  END
  REFERENCE STATE:
    Option = Specified Point
    Reference Pressure = 1.014 [bar]
    Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
    Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
    Reference Temperature = 100 [C]
  END
  DYNAMIC VISCOSITY:
    Dynamic Viscosity = 9.4E-06 [kg m^-1 s^-1]
    Option = Value
  END
  THERMAL CONDUCTIVITY:
    Option = Value
    Thermal Conductivity = 193E-04 [W m^-1 K^-1]
  END
  ABSORPTION COEFFICIENT:
    Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
    Option = Value
  END
  SCATTERING COEFFICIENT:
    Option = Value
    Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
  END
  REFRACTIVE INDEX:
    Option = Value
    Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
  END
  END
  END
  FLOW: IST_Test
  SOLUTION UNITS:
    Angle Units = [rad]
    Length Units = [m]
    Mass Units = [kg]
    Solid Angle Units = [sr]
    Temperature Units = [K]
    Time Units = [s]
  END
  ANALYSIS TYPE:
    Option = Transient
  EXTERNAL SOLVER COUPLING:
    Option = None
  END
  INITIAL TIME:
    Option = Automatic with Value
    Time = 0 [s]
  END
  TIME DURATION:
    Option = Total Time
    Total Time = 15 [s]
  END
  TIME STEPS:
    Option = Timesteps

```

```

Angle Units = [rad]
Length Units = [m]
Mass Units = [kg]
Solid Angle Units = [sr]
Temperature Units = [K]
Time Units = [s]
END
ANALYSIS TYPE:
Option = Transient
EXTERNAL SOLVER COUPLING:
Option = None
END
INITIAL TIME:
Option = Automatic with Value
Time = 0 [s]
END
TIME DURATION:
Option = Total Time
Total Time = 56 [s]
END
TIME STEPS:
Option = Timesteps
Timesteps = 0.25 [s]
END
DOMAIN: Default Domain Modified
Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Fluid
Location = B192
BOUNDARY: Default Domain Modified Default
Boundary Type = WALL
Location = \

F159.192,F160.192,F161.192,F162.192,F163.192,F164.192,F1
65.192,F166.19\

2,F167.192,F168.192,F169.192,F170.192,F171.192,F172.192,F
173.192,F176.\

192,F177.192,F178.192,F179.192,F180.192,F181.192,F182.19
2,F183.192,F18\

4.192,F185.192,F186.192,F187.192,F188.192,F189.192,F190.1
92,F193.192,F\

194.192,F195.192,F196.192,F197.192,F198.192,F199.192,F20
0.192,F201.192\

,F202.192,F203.192,F204.192,F205.192,F206.192,F207.192,F2
08.192,F209.1\

92,F210.192,F211.192,F212.192,F213.192,F214.192,F215.192,
F216.192,F217\

.192,F218.192,F219.192,F220.192,F221.192,F222.192,F223.19
2,F224.192,F2\

25.192,F226.192

Timesteps = 0.2 [s]
END
DOMAIN: Default Domain
Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Fluid
Location = B102
BOUNDARY: Default Domain Default
Boundary Type = WALL
Location = \

F103.102,F104.102,F105.102,F106.102,F107.102,F108.102,F10
9.102,F110.10\

2,F112.102,F113.102,F114.102,F115.102,F116.102,F117.102,F
118.102,F119.\

102,F120.102,F122.102,F124.102,F125.102,F126.102,F127.102
,F128.102,F13\

0.102,F131.102,F132.102,F133.102,F134.102,F135.102,F136.1
02,F137.102,F\

138.102,F139.102,F140.102,F141.102,F142.102,F143.102,F144
.102,F145.102\
,F146.102
BOUNDARY CONDITIONS:
MASS AND MOMENTUM:
Option = No Slip Wall
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
FLUID PAIR: Fluid 1 | water
BOUNDARY CONDITIONS:
WALL ADHESION:
Option = None
END
END
END
BOUNDARY: S_Inlet
Boundary Type = INLET
Location = S_Inlet
BOUNDARY CONDITIONS:
FLOW DIRECTION:
Option = Normal to Boundary Condition
END
FLOW REGIME:
Option = Subsonic
END
MASS AND MOMENTUM:
Mass Flow Rate = 30 [kg s^-1]
Option = Bulk Mass Flow Rate
END
TURBULENCE:

```

```

BOUNDARY CONDITIONS:
MASS AND MOMENTUM:
  Option = No Slip Wall
END
WALL ROUGHNESS:
  Option = Smooth Wall
END
END
FLUID PAIR: Fluid 1 | water
BOUNDARY CONDITIONS:
  WALL ADHESION:
    Option = None
  END
  END
  END
BOUNDARY: Inlet
  Boundary Type = INLET
  Location = InletC
BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Mass Flow Rate = ZuflussUlme
    Option = Bulk Mass Flow Rate
  END
  TURBULENCE:
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
  END
  FLUID: Fluid 1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 0
    END
  END
  END
  FLUID: water
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 1
    END
  END
  END
  BOUNDARY: Outlet
  Boundary Type = OPENING
  Location = OutletC1,OutletC2
BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
  END
  FLUID: Fluid 1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 0
    END
  END
  FLUID: water
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 1
    END
  END
  BOUNDARY: UL_Inlets
  Boundary Type = INLET

```

```

END
FLOW REGIME:
  Option = Subsonic
END
MASS AND MOMENTUM:
  Option = Opening Pressure and Direction
  Relative Pressure = 0 [Pa]
END
TURBULENCE:
  Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
FLUID: Fluid 1
BOUNDARY CONDITIONS:
  VOLUME FRACTION:
    Option = Value
    Volume Fraction = 1
  END
  END
END
FLUID: water
BOUNDARY CONDITIONS:
  VOLUME FRACTION:
    Option = Value
    Volume Fraction = 0
  END
  END
END
DOMAIN MODELS:
BUOYANCY MODEL:
  Buoyancy Reference Density = 1.2 [kg m^-3]
  Gravity X Component = 0 [m s^-2]
  Gravity Y Component = 0 [m s^-2]
  Gravity Z Component = -g
  Option = Buoyant
BUOYANCY REFERENCE LOCATION:
  Option = Automatic
  END
  END
DOMAIN MOTION:
  Option = Stationary
  END
MESH DEFORMATION:
  Option = None
  END
REFERENCE PRESSURE:
  Reference Pressure = 1 [atm]
  END
  END
FLUID DEFINITION: Fluid 1
  Material = Air at 25 C
  Option = Material Library
MORPHOLOGY:
  Option = Continuous Fluid
  END
  END
Location = UR_Inlet
BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Mass Flow Rate = 10 [kg s^-1]
    Option = Bulk Mass Flow Rate
  END
  TURBULENCE:
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
  END
FLUID: Fluid 1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 0
    END
    END
  END
  FLUID: water
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 1
    END
    END
  END
  END
  BOUNDARY: UR_Inlets
  Boundary Type = INLET
  Location = UL_Inlet
  BOUNDARY CONDITIONS:
    FLOW DIRECTION:
      Option = Normal to Boundary Condition
    END
    FLOW REGIME:
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Mass Flow Rate = 10 [kg s^-1]
      Option = Bulk Mass Flow Rate
    END
    TURBULENCE:
      Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
    END
    END
  FLUID: Fluid 1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 0
    END
    END

```

```

FLUID DEFINITION: water
  Material = Water
  Option = Material Library
MORPHOLOGY:
  Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
  Option = None
END
FLUID: Fluid 1
  FLUID BUOYANCY MODEL:
    Option = Density Difference
  END
END
FLUID: water
  FLUID BUOYANCY MODEL:
    Option = Density Difference
  END
END
HEAT TRANSFER MODEL:
  Homogeneous Model = Off
  Option = None
END
THERMAL RADIATION MODEL:
  Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
  Option = SST
  BUOYANCY TURBULENCE:
    Option = None
  END
END
TURBULENT WALL FUNCTIONS:
  Option = Automatic
END
END
FLUID PAIR: Fluid 1 | water
  Surface Tension Coefficient = 0.072 [N m^-1]
INTERPHASE TRANSFER MODEL:
  Option = Free Surface
END
MASS TRANSFER:
  Option = None
END
SURFACE TENSION MODEL:
  Option = Continuum Surface Force
  Primary Fluid = water
END
END
MULTIPHASE MODELS:
  Homogeneous Model = On
FREE SURFACE MODEL:
  Option = Standard
END
END
END
END
FLUID: water
  BOUNDARY CONDITIONS:
    VOLUME FRACTION:
      Option = Value
      Volume Fraction = 1
    END
  END
END
END
DOMAIN MODELS:
  BUOYANCY MODEL:
    Buoyancy Reference Density = 1.2 [kg m^-3]
    Gravity X Component = 0 [m s^-2]
    Gravity Y Component = 0 [m s^-2]
    Gravity Z Component = -g
    Option = Buoyant
  BUOYANCY REFERENCE LOCATION:
    Option = Automatic
  END
END
DOMAIN MOTION:
  Option = Stationary
END
MESH DEFORMATION:
  Option = None
END
REFERENCE PRESSURE:
  Reference Pressure = 1 [atm]
END
END
FLUID DEFINITION: Fluid 1
  Material = Air at 25 C
  Option = Material Library
MORPHOLOGY:
  Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID DEFINITION: water
  Material = Water
  Option = Material Library
MORPHOLOGY:
  Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
  Option = None
END
FLUID: Fluid 1
  FLUID BUOYANCY MODEL:
    Option = Density Difference
  END
END
FLUID: water
  FLUID BUOYANCY MODEL:

```

```

END
INITIALISATION:
Option = Automatic
FLUID: Fluid 1
INITIAL CONDITIONS:
VOLUME FRACTION:
Option = Automatic with Value
Volume Fraction = 1
END
END
END
FLUID: water
INITIAL CONDITIONS:
VOLUME FRACTION:
Option = Automatic with Value
Volume Fraction = 0
END
END
END
INITIAL CONDITIONS:
Velocity Type = Cartesian
CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
Option = Automatic with Value
U = 0 [m s^-1]
V = 0 [m s^-1]
W = 0 [m s^-1]
END
STATIC PRESSURE:
Option = Automatic with Value
Relative Pressure = 0 [Pa]
END
TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:
Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
OUTPUT CONTROL:
MONITOR OBJECTS:
MONITOR BALANCES:
Option = Full
END
MONITOR FORCES:
Option = Full
END
MONITOR PARTICLES:
Option = Full
END
MONITOR POINT: Inlet_Ulme
Coord Frame = Coord 0
Expression Value = QinletC
Option = Expression
END
MONITOR POINT: Outlet_Sammel
Coord Frame = Coord 0
Expression Value = QOutletC2
Option = Expression
END

```

```

Option = Density Difference
END
END
HEAT TRANSFER MODEL:
Homogeneous Model = Off
Option = None
END
THERMAL RADIATION MODEL:
Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
Option = SST
BUOYANCY TURBULENCE:
Option = None
END
END
TURBULENT WALL FUNCTIONS:
Option = Automatic
END
END
FLUID PAIR: Fluid 1 | water
Surface Tension Coefficient = 0.072 [N m^-1]
INTERPHASE TRANSFER MODEL:
Option = Free Surface
END
MASS TRANSFER:
Option = None
END
SURFACE TENSION MODEL:
Option = Continuum Surface Force
Primary Fluid = water
END
END
MULTIPHASE MODELS:
Homogeneous Model = On
FREE SURFACE MODEL:
Option = Standard
END
END
INITIALISATION:
Option = Automatic
FLUID: Fluid 1
INITIAL CONDITIONS:
VOLUME FRACTION:
Option = Automatic with Value
Volume Fraction = 1
END
END
END
FLUID: water
INITIAL CONDITIONS:
VOLUME FRACTION:
Option = Automatic with Value
Volume Fraction = 0
END
END

```

```

MONITOR POINT: Outlet_Ulme
  Coord Frame = Coord 0
  Expression Value = QOutletC1
  Option = Expression
END
MONITOR RESIDUALS:
  Option = Full
END
MONITOR TOTALS:
  Option = Full
END
END
RESULTS:
  File Compression Level = Default
  Option = Standard
END
TRANSIENT RESULTS: Transient Results 1
  File Compression Level = Default
  Option = Standard
OUTPUT FREQUENCY:
  Option = Time List
  Time List = 0.25 [s]
END
END
TRANSIENT RESULTS: Transient Results 2
  File Compression Level = Default
  Include Mesh = No
  Option = Selected Variables
  Output Variables List = Absolute Pressure,Fluid 1.Volume \
  Fraction,Pressure,Velocity,water.Superficial Velocity,wa-
ter.Volume \
  Fraction
OUTPUT FREQUENCY:
  Option = Timestep Interval
  Timestep Interval = 1
END
END
END
SOLVER CONTROL:
  Turbulence Numerics = First Order
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Maximum Number of Coefficient Loops = 10
  Minimum Number of Coefficient Loops = 1
  Timescale Control = Coefficient Loops
END
CONVERGENCE CRITERIA:
  Residual Target = 1.E-4
  Residual Type = RMS
END
TRANSIENT SCHEME:
  Option = Second Order Backward Euler
TIMESTEP INITIALISATION:
  Option = Automatic
END

```

```

END
INITIAL CONDITIONS:
  Velocity Type = Cartesian
CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
  Option = Automatic with Value
  U = 0 [m s^-1]
  V = 0 [m s^-1]
  W = 0 [m s^-1]
END
STATIC PRESSURE:
  Option = Automatic with Value
  Relative Pressure = 0 [Pa]
END
TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:
  Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
OUTPUT CONTROL:
MONITOR OBJECTS:
MONITOR BALANCES:
  Option = Full
END
MONITOR FORCES:
  Option = Full
END
MONITOR PARTICLES:
  Option = Full
END
MONITOR POINT: Mass Flow 1
  Coord Frame = Coord 0
  Expression Value = Flow Rate
  Option = Expression
END
MONITOR RESIDUALS:
  Option = Full
END
MONITOR TOTALS:
  Option = Full
END
END
RESULTS:
  File Compression Level = Default
  Option = Standard
END
TRANSIENT RESULTS: Transient Results 1
  File Compression Level = Default
  Option = Standard
OUTPUT FREQUENCY:
  Option = Time List
  Time List = 0.2 [s]
END
END
TRANSIENT RESULTS: Transient Results 2
  File Compression Level = Default
  Include Mesh = No
  Option = Selected Variables

```

```
END
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 17.1
END
```

```
Output Variables List = Absolute Pressure,Fluid 1.Volume \
  Fraction,Pressure,Velocity,water.Superficial Velocity,wa-
ter.Volume \
  Fraction
OUTPUT FREQUENCY:
  Option = Timestep Interval
  Timestep Interval = 1
END
END
END
SOLVER CONTROL:
  Turbulence Numerics = First Order
ADVECTION SCHEME:
  Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
  Maximum Number of Coefficient Loops = 10
  Minimum Number of Coefficient Loops = 1
  Timescale Control = Coefficient Loops
END
CONVERGENCE CRITERIA:
  Residual Target = 1.E-4
  Residual Type = RMS
END
TRANSIENT SCHEME:
  Option = Second Order Backward Euler
TIMESTEP INITIALISATION:
  Option = Automatic
END
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 17.1
END
```

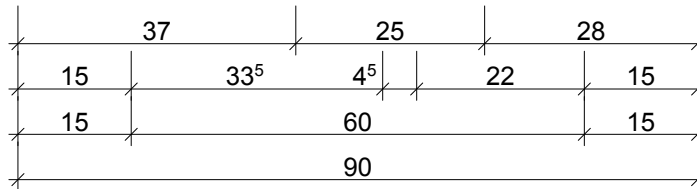
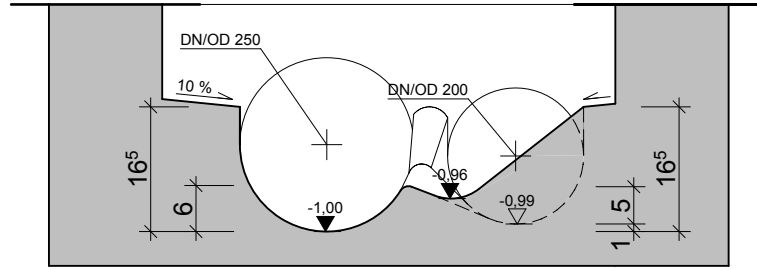
## Anhang B

Planliste für den Ausführungsvorschlag des Putzschachts der Ulmendrainagen bei Ausleitung in den Sammelkanal (Variante 5C):

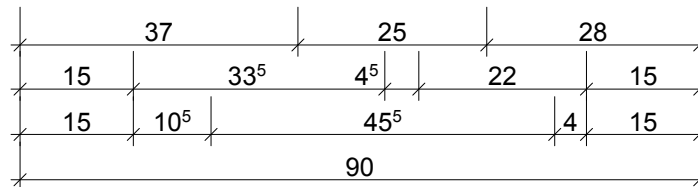
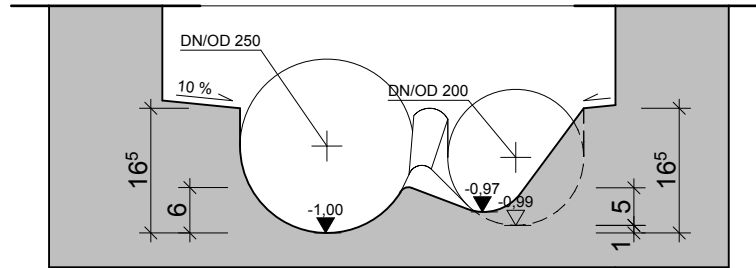
- Ausführungsvorschlag Putzschacht Ulmendrainage – Draufsicht
- Ausführungsvorschlag Putzschacht Ulmendrainage – Bauteilschnitt 1
- Ausführungsvorschlag Putzschacht Ulmendrainage – Bauteilschnitt 2



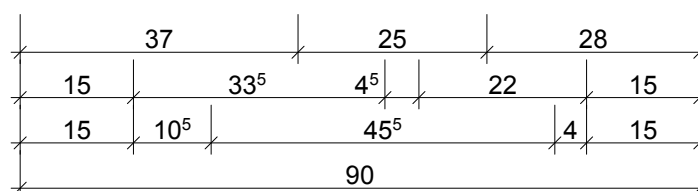
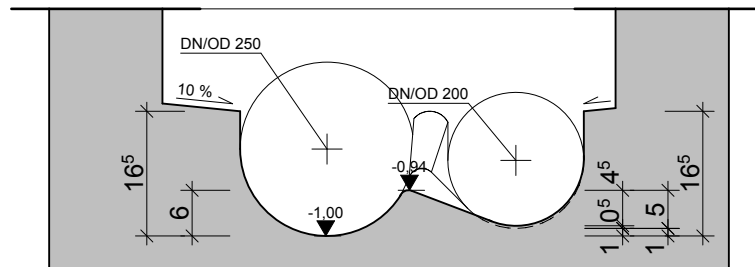
**Schnitt A-1**



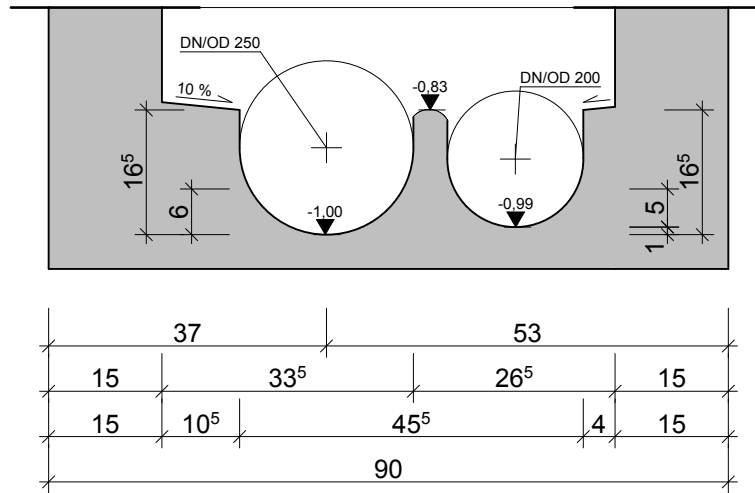
**Schnitt A-2**



**Schnitt A-3**



**Schnitt A-4**



**Schnitt B-1**

