

# **Entsorgungsmöglichkeiten des beim Innenausbau anfallenden Schlammes beim Bau des Gotthardbasistunnels**

Masterarbeit zum Erwerb des  
akademischen Titels Diplomingenieur der  
Studienrichtung Bauingenieurwesen

**Thomas Kuc**

Verfasst am Institut für  
Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau sowie am Institut  
für Baubetrieb und Bauwirtschaft  
der Technischen Universität Graz

Betreuer der Masterarbeit:  
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber  
Bmstr. Dipl. Ing. Dr.techn. Dieter Schlagbauer

Begutachter der Masterarbeit:  
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber

Graz, Mai 2012

## **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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

## **Statutory Declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am 25.05.2012



Thomas Kuc

## **Danksagung**

Mein Dank gilt den Consorzio TAT Mitarbeitern, die mich bei meinen Recherchearbeiten unterstützt haben. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Walter Reinger von der APE Umwelttechnik AG für seine Hilfe bedanken.

Aber auch Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau und Bmstr. Dipl. Ing. Dr.techn. Dieter Schlagbauer vom Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz haben mich von Anfang an umfassend unterstützt. Für die tolle Betreuung und die Begutachtung möchte ich ihnen meinen Dank aussprechen.

Doch vor allem will ich meinen Eltern für die Ermöglichung meines Studiums durch ihre Unterstützung danken.

## **Kurzfassung**

Beim Innenausbau eines Tunnels müssen betriebsbedingt anfallende Schlämme vor der Deponierung auf ihren Schadstoffgehalt hin untersucht werden. Je nach Höhe der Verunreinigungen werden diese Schlämme auf Inertstoff-, Reststoff- oder Reaktordeponien entsorgt. Die verhältnismäßig kleine Masse der auf Reststoff- oder Reaktordeponien abgelagerten Schlämme ist aufgrund des hohen Deponierungspreises für den Großteil der Transport- und Deponierungskosten verantwortlich. Eine Untersuchung des Materials beim Innenausbau des Gotthardbasistunnels hat gezeigt, dass dieses zum überwiegenden Teil aus Betonschlämmen mit einem Feuchtegehalt von ca. 50 % besteht. Bei einer Deponierung gilt es, diesen hohen Wassergehalt zu senken, weshalb auf der Baustelle Trocknungsversuche durchgeführt worden sind. Die dabei gewonnenen Ergebnisse flossen in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ein und zeigten die Rentabilität einer Trocknung. Des Weiteren wurden anhand einer Literaturrecherche alternative Entsorgungsmöglichkeiten aufgezeigt und miteinander verglichen. Der Vergleich verdeutlichte, dass mit Kohlenwasserstoffen hoch belastete Schlämme besser einem Zementwerk als Rohstoffersatzmaterial zugeführt werden sollten, anstatt auf Deponien entsorgt zu werden. Dazu sollten vom Bauherrn während der Ausschreibung für das Zementwerk entsprechende Anreize geschaffen werden, dieses Material bei der Zementherzeugung zu verwenden.

## **Abstract**

The sludge which is accumulated during the interior construction of a tunnel has to be examined regarding to the amount of its contamination with pollutants before it can be disposed. Depending on the contamination level the sludge is either disposed on landfills for inert material, for residue material or on bioreactor landfills. The generated amount of residue material and of material for bioreactor landfills is relatively low, but due to their high landfill costs, they account for the greater part of the transportation and landfill costs. An investigation of the generated material during the interior construction of the Gotthard Base Tunnel has shown that most of the sludge is concrete slurry with a moisture content of 50%. Before disposing the high moisture content should be reduced, that is why drying experiments were made on site. The results of these experiments were considered in the profitability analysis and have shown that the drying of concrete slurry is economically viable. On the base of a literature survey alternative disposal options were described and compared with each other. This comparison highlighted that with hydrocarbons highly contaminated sludge should not be disposed on landfills but should and can be used in the cement industry as a substitute for other raw materials. For that reason it is recommended that the client should create incentives for the cement industry to use this material for the cement production in the invitation to tender.

## **Gleichheitsgrundsatz**

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

<b>MOTIVATION, ZIELSETZUNG UND VORGANGSWEISE</b>	<b>12</b>
MOTIVATION	12
ZIELSETZUNG	12
VORGANGSWEISE	13
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>14</b>
1.1 HISTORISCHES	14
1.2 DIE „ALTE“ AKTUELLE GOTTHARDBAHN	15
1.2.1 ÜBERBLICK	15
1.2.2 DIE EISENBAHNBAULICHE PIONIERLEISTUNG IM 19. JAHRHUNDERT	16
1.2.3 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG DER GOTTHARDBAHN	17
1.3 DIE NEAT (NEUE EISENBAHN ALPEN TRANSVERSALE)	19
1.3.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE NEAT	19
1.3.2 FINANZIERUNG UND KOSTEN	20
1.3.3 DIE NEAT ACHSE GOTTHARD	21
1.4 DER GOTTHARDBASISTUNNEL (GBT)	22
1.4.1 ALLGEMEINES	22
1.4.2 CHRONIK	24
1.4.3 LINIENFÜHRUNG UND LÄNGSSCHNITT	25
1.5 VORTEILE DES GBT GEGENÜBER DER GOTTHARDBAHN	27
<b>2 DIE GOTTHARDBASISTUNNEL BAUSTELLENABSCHNITTE BODIO - FAIDO</b>	<b>28</b>
2.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE BAUSTELLEN	28
2.1.1 BODIO	28
2.1.2 FAIDO	29
2.2 DIE HAUPTARBEITEN DES CONSORZIO TAT IM JAHR 2011	30
2.3 DAS INNENGEWÖLBE	30
2.4 DAS ENTWÄSSERUNGSKONZEPT	31
2.5 DIE HERSTELLUNG DES INNENGEWÖLBES	32
<b>3 BESCHREIBUNG DER GESETZLICHEN SITUATION</b>	<b>33</b>
3.1 BELASTUNG DURCH CHROMAT, NITRIT UND KOHLENWASSERSTOFFE	33
3.1.1 BELASTUNG DURCH CHROMAT	33
3.1.2 BELASTUNG DURCH NITRIT	34
3.1.3 BELASTUNG DURCH KOHLENWASSERSTOFFE (KW)	34
3.1.4 BESCHREIBUNG DER VORGEHENSWEISE BEI DER LABORANALYSE	34
3.2 GESETZLICHE GRUNDLAGEN UND MAßGEBENDE GRENZWERTE	37
<b>4 BESCHREIBUNG DES SCHLAMMES</b>	<b>39</b>
4.1 ZUSAMMENSETZUNG DER SCHLAMMARTIGEN MATERIALIEN	39
4.2 SCHLAMMENTSTEHUNG IN DEN SICH BEWEGENDEN BAUSTELLEN UND MATERIALSTROM	39

4.2.1	AUFTEILUNG SCHLAMMHERKUNFT	40
4.2.2	RESTBETONMENGE IM VERGLEICH ZUR GESAMT VERBAUTEN BETONMENGE	41
<b>4.3</b>	<b>DER TRANSPORT DES SCHLAMMES AUS DEM TUNNEL</b>	<b>42</b>
4.3.1	TRANSPORT DES RESTBETONS	42
4.3.2	TRANSPORT MIT EINEM SAUG ODER BAGGERZUG/- LKW	42
4.3.2.1	Funktionsweise Baggerzug	42
4.3.2.2	Funktionsweise Saugzug	42
4.3.2.3	Funktionsweise Saug-LKW	44
4.3.3	TRANSPORT DURCH DIE HAUPTDRAINAGE- UND SCHMUTZWASSERLEITUNG	44
4.3.3.1	Die Kläranlage Bodio	45
<b>4.4</b>	<b>REGISTRIERUNG ÜBER BEGLEITSCHINE UND SCHLAMMANALYSE</b>	<b>46</b>
4.4.1	REGISTRIERUNG ÜBER BEGLEITSCHINE	46
4.4.2	SCHLAMMANALYSE	46
4.4.3	PROBENENTNAHME	46
<b>4.5</b>	<b>ZWISCHENLAGERUNG DES SCHLAMMES</b>	<b>46</b>
<b>4.6</b>	<b>TRANSPORT ZUR DEPONIE</b>	<b>47</b>
<b>4.7</b>	<b>BETRACHTUNG DER LABORERGEBNISSE BETREFFEND DER KOHLENWASSERSTOFFE</b>	<b>48</b>
4.7.1	DARSTELLUNG ÜBER DEN ZEITRAUM MITTE 2008 BIS ENDE 2012	48
4.7.2	DARSTELLUNG FÜR DAS JAHR 2011	50
<b>4.8</b>	<b>DIE ZUR VERFÜGUNG STEHENDEN DEPONIEN</b>	<b>51</b>
<b>4.9</b>	<b>DEPONIEANNAHMEKOSTEN</b>	<b>52</b>
<b>4.10</b>	<b>FESTGESTELLTE DISKREPANZ LKW</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>SCHLAMMANALYSE BEZÜGLICH MATERIALKENNWERTEN</b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>ALLGEMEINES</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>SCHLAMMPROBEN</b>	<b>55</b>
5.2.1	PROBEENTNAHME BEIM WURM	55
5.2.2	PROBEENTNAHME IM BEREICH DES SAUGZUGES	56
5.2.3	PROBEENTNAHME IN DER Z-HALLE / EX-TÜBBING	56
<b>5.3</b>	<b>PROCTORVERSUCH</b>	<b>58</b>
5.3.1	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	58
5.3.2	VERSUCHSERGEBNISSE	58
<b>5.4</b>	<b>VERIFIZIERUNG DER DICHTEN</b>	<b>60</b>
<b>5.5</b>	<b>SIEBKURVE</b>	<b>61</b>
<b>5.6</b>	<b>VERGLEICH PROCTORDICHTE MIT Z-HALLE MATERIAL</b>	<b>62</b>
<b>5.7</b>	<b>ATMOSPÄRISCHE EINFLÜSSE AUF DEN SCHLAMM</b>	<b>63</b>
5.7.1	SUCHE NACH EINEM ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SCHLAMMMASSE UND NIEDERSCHLAG.	64
5.7.2	TEILFAZIT	67
<b>5.8</b>	<b>MAXIMALER REGENWASSEREINFLUSS AUF DIE SCHLAMMMASSE</b>	<b>68</b>
5.8.1	NIEDERSCHLAG, VERDUNSTUNG UND DIFFERENZ AUS BEIDEN GRÖßEN	68
5.8.2	BERECHNUNG DER ZUSÄTZLICHEN TRANSPORT- UND DEPONIERUNGSKOSTEN.	69
<b>5.9</b>	<b>BETRACHTUNG DER IM JAHR 2011 ANGEFALLENEN SCHLAMMMASSE</b>	<b>71</b>
<b>5.10</b>	<b>ERMITTLUNG DER SCHLAMMMASSE AUS DEM GESCHÄTZTEN VOLUMEN</b>	<b>71</b>
<b>5.11</b>	<b>ABWEICHUNG INFOLGE VOLUMENSCHÄTZUNG</b>	<b>72</b>
<b>5.12</b>	<b>BERECHNUNG DES DURCH DIE HAUPTDRAINAGELEITUNG TRANSPORTIERTEN SCHLAMMES</b>	<b>73</b>
<b>5.13</b>	<b>SUMME DER SCHLAMMMASSEN</b>	<b>73</b>

<b>6</b>	<b>ALTERNATIVE ENTSORGUNGSMÖGLICHKEITEN</b>	<b>74</b>
<b>6.1</b>	<b>WEITERBEHANDLUNG DES SCHLAMMES AUF DER BAUSTELLE</b>	<b>75</b>
<b>6.2</b>	<b>TROCKNUNGSVERSUCHE</b>	<b>75</b>
6.2.1	THEORETISCHE BETRACHTUNG DER PHYSIKALISCHEN AUSWIRKUNG EINER TROCKNUNG AUF DEN SCHLAMM	75
6.2.2	TROCKNUNG MITTELS HEIZSTRAHLER	75
<b>6.3</b>	<b>OPTIMIERUNG DER VERSUCHSANORDNUNG</b>	<b>77</b>
6.3.1	VERSUCHSANORDNUNG	78
6.3.2	ERGEBNISSE	79
6.3.3	WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG ZUR SCHLAMMTROCKNUNG	80
<b>6.4</b>	<b>VORSCHLAG ZUR MASSENTROCKNUNG</b>	<b>81</b>
<b>6.5</b>	<b>THERMISCHE BEHANDLUNG</b>	<b>82</b>
6.5.1	THERMISCHE BEHANDLUNG IN EINEM DREHROHROFEN (EISENMANN, 2008)	83
6.5.2	WIRBELSCHICHTÖFEN FÜR FESTE UND PASTÖSE STOFFE (EISENMANN, 2008)	83
6.5.3	VOR- UND NACHTEILE EINER THERMISCHEN BEHANDLUNG	84
<b>6.6</b>	<b>RECYCLING VON BETONSCHLÄMMEN</b>	<b>85</b>
6.6.1	HERSTELLUNGSPROZESS VON ZEMENT	86
6.6.1.1	Beimischungsmengen von Ersatzrohstoffen in einem Zementwerk	87
6.6.2	HERSTELLUNGSPROZESS VON ZIEGELSTEINEN	87
<b>6.7</b>	<b>BIOLOGISCHE BEHANDLUNG</b>	<b>88</b>
<b>6.8</b>	<b>NOCH NICHT ANWENDBARE VERFAHREN</b>	<b>88</b>
6.8.1	VAKUUMDESTILLATION	88
<b>6.9</b>	<b>VERGLEICH ALLER ENTSORGUNGSMÖGLICHKEITEN</b>	<b>89</b>
6.9.1	BEURTEILUNGSKRITERIEN	89
6.9.1.1	Deponierung	89
6.9.1.2	Volumen	89
6.9.1.3	Ökologie	89
6.9.1.4	Arbeitskraft- und Energiekosten	90
6.9.1.5	Bewertung der Kosten	90
6.9.1.6	Bestimmung der Annahmekosten der Zement- und Ziegelwerke	90
6.9.1.7	Thermische Verbrennung:	90
6.9.1.8	Biologische Behandlung	90
6.9.1.9	Gesamtnote	90
6.9.2	KRITERIENMATRIX	91
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK</b>	<b>92</b>
<b>7.1</b>	<b>IM VORFELD EINES BAUPROJEKTES ZU BEACHTETE PUNKTE</b>	<b>92</b>
<b>7.2</b>	<b>EMPFEHLUNGEN FÜR DEN UMGANG MIT DEM SCHLAMM</b>	<b>93</b>
<b>7.3</b>	<b>EMPFEHLUNG DES ALTERNATIVEN ENTSORGUNGSVERFAHRENS</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG</b>	<b>95</b>
8.1.1	PROBE 1 TABELLARISCHE AUSWERTUNG	95
8.1.2	PROBE 1 PROCTORDICHTEVERLAUF	95
8.1.3	PROBE 2 TABELLARISCHE AUSWERTUNG	96
8.1.4	PROBE 2 PROCTORDICHTEVERLAUF	96



8.1.5	PROBE 3 TABELLARISCHE AUSWERTUNG	97
8.1.6	PROBE 3 PROCTORDICHTEVERLAUF	97
8.1.7	PROBE 4 TABELLARISCHE AUSWERTUNG	98
8.1.8	PROBE 4 PROCTORDICHTEVERLAUF	98
8.1.9	FEINANTEILE TABELLARISCHE AUSWERTUNG	99
8.1.10	FEINANTEIL PROCTORDICHTEVERLAUF	99
<b>9</b>	<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b>100</b>
<b>10</b>	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>102</b>
<b>11</b>	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS</u></b>	<b>103</b>

## Abkürzungsverzeichnis

BE	Baustelleneinrichtung
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft
EST	Einspurtunnel
FinöV	Finanzierung der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs
GBT	Gotthardbasistunnel
HD	Hauptdrainage
KW	Kohlenwasserstoffe
MAB	Materialaufbereitung
MFS	Multifunktionsstelle
NEAT	Neue Alpen Transversale
QK	Querkaverne
TAT	Tunnel Alp Transit-Ticino
TBM	Tunnelbohrmaschine
TS	Trockensubstanz
TVA	Technische Verordnung für Abfälle
TWAB	Tunnelwasseraufbereitung
VeVa	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen
Z-Halle	Zwischenlagerhalle

## Einheiten

CHF/t	Schweizer Franken pro Tonne
EUR/t	Euro pro Tonne
mm	Millimeter
m	Meter
km	Kilometer
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
g	Gramm
mg	Milligramm
to	Tonne
to/m <sup>3</sup>	Tonnen pro Kubikmeter
l	Liter
s	Sekunde
h	Stunde
mg/l	Milligramm pro Liter
mg/kg	Milligramm pro Kilogramm
l/s	Liter pro Sekunde
m <sup>3</sup> /h	Kubikmeter pro Stunde
KW	Kilowatt
KWh	Kilowattstunde
#	Stück
%	Prozent

## Motivation, Zielsetzung und Vorgangsweise

### Motivation

Beim Bau eines Tunnels fallen große Mengen an Materialien an, welche aus dem Berg ins Freie gebracht werden müssen. Zum überwiegenden Teil handelt es sich dabei um den Ausbruch, der im Sinne eines ökologischen Gedankens recycelt wird und somit Verwendung als Rohstoff bei verschiedenen Bauvorhaben findet. Jedoch fallen auch Materialien an, für welche es aufgrund ihrer physikalischen oder chemischen Eigenschaften keine Abnehmer in der Baubranche gibt. Lange Zeit wurden diese meist schlammartigen Materialien (im Folgenden meist als Schlamm bezeichnet) auf Inertstoff- oder Baurestmassendeponien entsorgt, was in vielen Fällen die einfachste und billigste Lösung für die Bauunternehmen darstellte. Erst durch den Bau der langen transalpinen Eisenbahnverbindungen, dem Lötschberg- und Gotthardbasistunnel, wurden in der Schweiz aufgrund der riesigen zu Tage geförderten Schlammengen Schadstoffuntersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigten eine hohe Kontaminierung des Schlammes mit Kohlenwasserstoffen, Nitriten und Chromaten. Durch das Inkrafttreten mehrerer Empfehlungen und Verordnungen sind die gesetzlichen Vorgaben verschärft worden. Als Folge dessen mussten Schlämme, die vorher auf Inertstoffdeponien abgelagert worden sind, auf Reststoff- oder gar Reaktordeponien entsorgt werden. Entsprechende (Mehr-) Kosten für die Bauunternehmen waren die Folge.

### Zielsetzung

Die Ziele dieser Arbeit sind

- den Leser in die Schlammproblematik anhand der gesammelten Erfahrungen am längsten Tunnel der Welt einzuführen,
- die schlammrelevanten bauleistungsrelevanten Abläufe darzustellen,
- aufzuzeigen, dass Schlamm im 21. Jahrhundert nicht als Abfall, sondern als Recyclingmaterial angesehen werden kann,
- dem Bauherrn Empfehlungen zu geben, was im Vorfeld der Planungs- und Ausschreibungsphase beachtet werden sollte,
- der Baufirma Behandlungsmöglichkeiten während der Bauphase aufzuzeigen.

## Vorgangsweise

Im Vorfeld dieser Arbeit konnten im Rahmen eines Praktikums am Gotthardbasistunnel bei der Arbeitsgemeinschaft Tunnel Alp Transit-Ticino (Consortio TAT) Erfahrungen mit den schlammartigen Materialien gesammelt werden. Anhand dieser und mit Hilfe einer Literaturrecherche entstand diese Arbeit.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Teile. Nach einer allgemeinen Einleitung, in welcher das Projekt "Gotthardbasistunnel", die Baustellenabschnitte sowie die schlammrelevanten gesetzlichen Vorschriften dargestellt werden (Kapitel 1-3), werden dem Leser in Kapitel 4 der Begriff "Schlamm" sowie die mit den schlammartigen Materialien im Zusammenhang stehenden logistischen Abläufe erklärt. Des Weiteren wird eine Vorstellung über die zu entsorgende Masse geschaffen. In Kapitel 5 werden Materialkennwerte des Schlammes und atmosphärische Einflüsse auf selbigen untersucht.

Im letzten Teil der Arbeit (Kapitel 6) werden, neben alternativen Entsorgungsmöglichkeiten, baustellenseitige Trocknungsverfahren vorgestellt. Dazu wurden während des Praktikums Trocknungsversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung eingeflossen sind. Abgerundet wird dieses Kapitel durch einen Vergleich aller Entsorgungsmöglichkeiten durch eine Kriterienmatrix.

Wortwörtliche Zitate werden kursiv und unter Anführungszeichen dargestellt. Bei einer sinngemäßen Verwendung einer Literatur, wird diese unter der Kapitelüberschrift mit Angabe des Autors und des Veröffentlichungsdatums gekennzeichnet. Detaillierte Quellenangaben sind dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

# 1 Einleitung

Das Kapitel 1 ist inhaltlich weitestgehend den folgenden Quellen entnommen: (Sinniger, et al., 2006), (Alp Transit, 12/2011), (Alpeninitiative, 2012).

## 1.1 Historisches

(Sinniger, et al., 2006)

Das Gotthardmassiv, mit seinem höchsten Berg dem Pizzo Rotondo mit 3192 m, hatte bis zur Erschließung der unpassierbaren Schöllenschlucht im 13. Jahrhundert eine geringe Bedeutung. Erst durch den Bau der sogenannten Teufelsbrücke über besagte Schlucht, gelang es den Walsern die kürzeste Nord-Süd Verbindung im zentralen Alpenraum zu schaffen. Der Bau stellte für das Mittelalter eine Meisterleistung dar, weshalb unter der Bevölkerung eine Sage entstand, in welcher der Teufel die Brücke innerhalb kürzester Zeit errichtete, dafür aber als Gegenleistung die Seele des ersten Benutzers gefordert hatte. Doch die schlauen Urner ließen als erstes Lebewesen einen Ziegenbock über die Brücke gehen. Dies verärgerte den Teufel so sehr, dass er einen riesigen Felsblock zu Tal schleuderte. Bei Göschenen ist dieser "Teufelsstein" noch heute zu sehen.

Mit dem Bau der zweiten aus Stein gefertigten Teufelsbrücke im Jahr 1595, konnte die Attraktivität des Gotthardpasses gesteigert werden. Im Jahr 1707 gelang den Erbauern mit der Fertigstellung des ersten 70 m langen Tunnels, dem Urnerloch vor Andermatt, eine weitere Pionierleistung. Doch erst der Bau der neuen Straße von Flüelen bis Chiasso, welche 1836 für den Verkehr freigegeben worden ist, läutete das Zeitalter der Postkutschen am Gotthard ein.

Das Gotthardmassiv ist bekannt für seine außergewöhnlichen bauingenieurlichen Meisterleistungen durch die für die damalige Zeit größten oder längsten Bauwerke. Der Gotthard-Eisenbahntunnel <sup>1</sup> (15 km, 1882), sowie auch der Gotthard-Straßentunnel (16,7 km, 1980) bilden hierbei keine Ausnahme. Bei ihrer Fertigstellung und Eröffnung waren beide Tunnel die längsten ihrer Art. Noch heute ist der Straßentunnel der längste Tunnel der Alpen und der drittlängste der Welt. Aufgrund des gestiegenen Straßenverkehrsaufkommens, sowie aus Sicherheitsgründen, wird derzeit über den Bau einer zweiten Tunnelröhre diskutiert.

---

<sup>1</sup> siehe Kapitel 1.2: Die „alte“ aktuelle Gotthardbahn

## 1.2 Die „alte“ aktuelle Gotthardbahn

(Sinniger, et al., 2006)

### 1.2.1 Überblick

Die rund 206 Kilometer lange Gotthardbahn verbindet den im Kanton Schwyz befindlichen Immensee mit dem nahe an der Italienisch-Schweizerischen Grenze liegenden Ort Chiasso (Abbildung 1). Sie bildet bis heute, trotz der Zeitspanne von mittlerweile 130 Jahren seit der Eröffnung, noch immer die kürzeste Verbindung zwischen den italienischen und Europas nordwestlichen Bahnnetzen.



Abbildung 1: Linienführung der Gotthardbahn ( (Academic, 2012), bearbeitet: Kuc)

Mit den verhältnismäßig sanft ansteigenden Tälern, dem Reusstal nördlich des Gotthardmassivs und dem südlich gelegenen Valle Leventina, konnten die natürlichen Gegebenheiten für den Bau einer Eisenbahnstrecke, welche Nord- und Südeuropa miteinander verbindet, genutzt werden. Neben der Möglichkeit des Baus von langen Steigungsrampen musste bei der Variante Gotthard ein verhältnismäßig kurzer Tunnel auf 1151 m. ü. M. zwischen Airolo im Süden und Göschenen im Norden durch das Gotthardmassiv geschlagen werden. Die Bauarbeiten des 15 km langen Scheiteltunnels begannen am 13. September 1872, wobei man auf Airoler Seite mit großen technischen Schwierigkeiten aufgrund von wasserführenden Gesteinsschichten zu kämpfen hatte. Nach knappen zehn Jahren Bauzeit wurde der Gotthard-Scheiteltunnel am 1. Juni 1882 für den Betrieb freigegeben. Mit dem Bau der Gotthardbahn waren insgesamt 5.472 Arbeiter beschäftigt, wobei 177 Menschen ihren Einsatz mit dem Leben bezahlten.

### **1.2.2 Die eisenbahnbauliche Pionierleistung im 19. Jahrhundert**

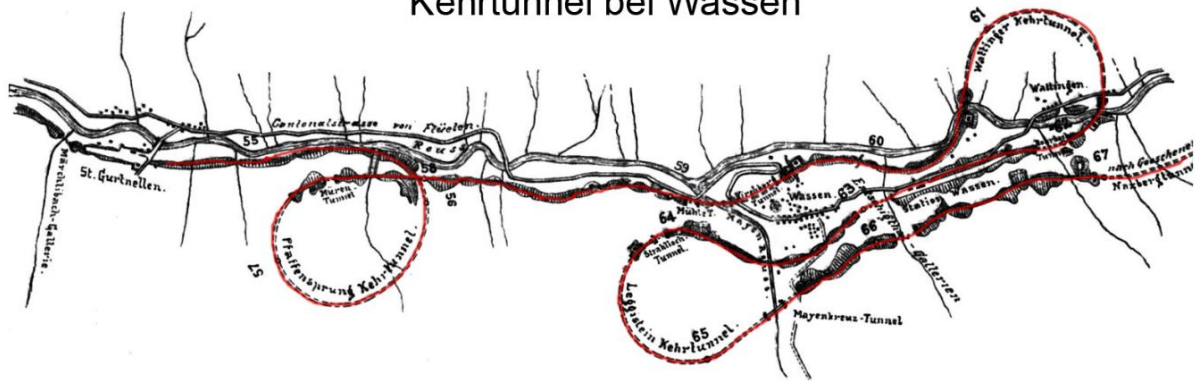
(Sinniger, et al., 2006)

Mit der Gotthardbahn wurde nach der Semmeringbahn (1854), der Brennerbahn (1867) und der Mont-Cenis-Strecke (1871) die vierte, zugleich aber die technisch anspruchsvollste, Eisenbahnalpenüberquerung geschaffen. Dem Bau gingen lang währende Verhandlungen über die Finanzierung und die endgültige Linienführung voraus, bis schließlich 1869 ein Staatsvertrag mit dem Königreich Italien und 1871 mit dem Deutschen Reich die Finanzierung sowie die Einigung über den Streckenverlauf den Baubeginn voraussetzen konnte.

Der Bau der Gotthardbahn stellt eine ingenieurliche Meisterleistung dar. Dazu tragen neben dem Scheiteltunnel, vor allem die vielen Spiral-, bzw. Kehrtunnel bei. Auf der bis zu 28 ‰ steilen Strecke überwindet der Zug über Doppelschleifen bis zu 200 Höhenmeter (siehe Abbildung 2).



## Kehrtunnel bei Wassen



## Doppelschleife zwischen Rodi und Faido

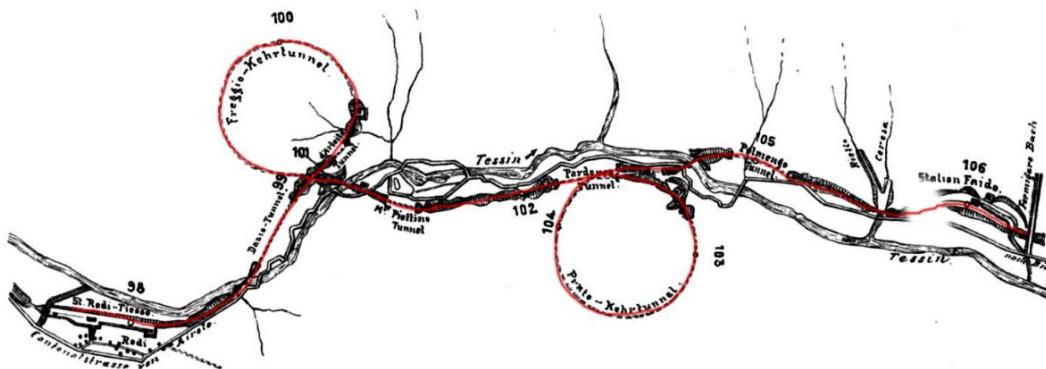


Abbildung 2: Veranschaulichung der Linienführung ((Academic, 2012), bearbeitet: Kuc)

Insgesamt werden bei der Fahrt über die Nord- als auch Südrampe fünf Spiraltunnel, sowie zwei Kehrtunnel überwunden. Den Höhepunkt von 1151 m.ü.M. erreicht die Strecke im bereits erwähnten Gotthard-Scheiteltunnel nach neun Kilometern Fahrt in südlicher Fahrtrichtung. Gleichzeitig markiert der Scheitelpunkt die Grenze zum Kanton Tessin.

Schon während des Baus entstanden neben der Strecke militärische Festungsanlagen. Dabei ist das Fort Airolo besonders zu erwähnen, denn es verfügte über eine über dem Südportal künstliche Lawine, die im Konfliktfall ausgelöst werden konnte.

### 1.2.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Gotthardbahn

(AlpTransit, 2012)

Seit der Eröffnung der Gotthardbahn verläuft ein Großteil des Güter- und Personenverkehrs zwischen dem nordwestlichen und dem italienischen Wirtschaftsraums über diese Bahnstrecke.

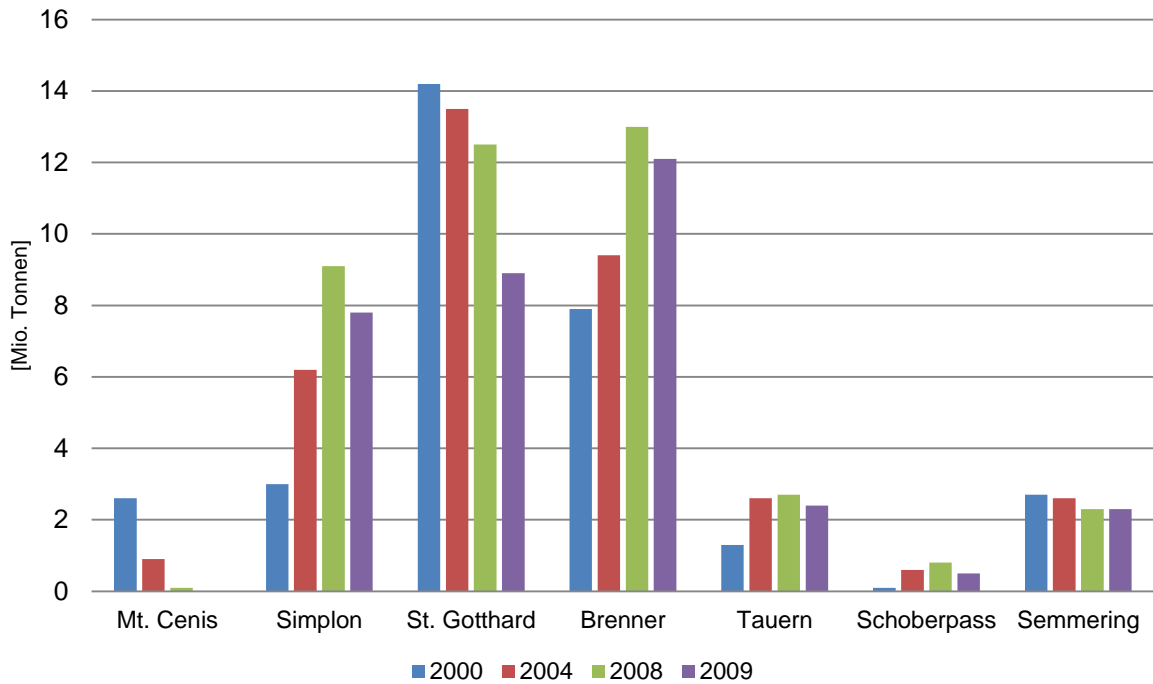


Abbildung 3: Schienentransportaufkommen an Alpenübergängen (Diagramm: Kuc, Quelle: (BAV, 21.01.2011))

Wie in Abbildung 3 dargestellt, stellt die Überquerung der Alpen durch das Gotthardmassiv gemeinsam mit jener über den Brenner, gemessen am Schienengüterverkehrsaufkommen, die wichtigste Alpenachse dar.

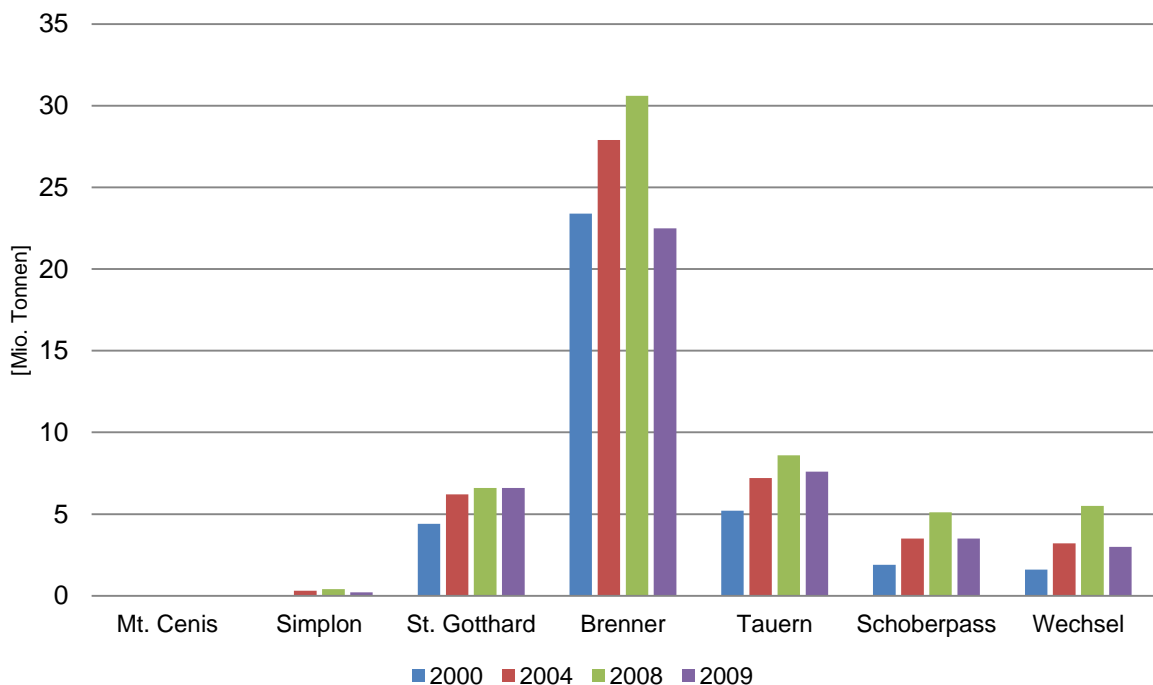


Abbildung 4: Straßentransportaufkommen an Alpenübergängen (Diagramm: Kuc, Quelle: (BAV, 21.01.2011))

Wird jedoch nur das Straßentransportaufkommen betrachtet, so ist ersichtlich, dass in dieser Kategorie der Brennerpass unangefochten an der Spitze steht (siehe Abbildung 4). Dieses Phänomen ist dadurch erklärbar, dass das Nicht-EU-Land Schweiz den Schwerverkehr auf ihrem Straßennetz begrenzen kann. Des Weiteren hat sich die Schweiz durch den Bau der langen Alpentunnel Lötschberg und Gotthard dazu verpflichtet, den Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Doch die jetzige 130 Jahre alte Gotthardbahn, mit ihren engen Radien, großen Steigungen, Kehr- und Spiraltunneln, ist schon lange an ihre Kapazitätsgrenze gestoßen. Somit kann das Schweizer Verkehrsverlagerungsvorhaben nur durch den Bau einer Flachbahn durch die Alpen realisiert werden.

### **1.3 Die NEAT (Neue Eisenbahn Alpen Transversale)**

(Sinniger, et al., 2006) (AlpTransit, 2012)

#### **1.3.1 Überblick über die NEAT**

Die **Neue Eisenbahn Alpen Transversale (NEAT)** hat ihren politischen Ursprung in den Sechzigerjahren, als die Kommission verschiedene Eisenbahn-Basis-tunnel-Projekte durch die Alpen empfahl. Im Allgemeinen wurde eine Verlagerung des Straßenschwerverkehrs auf die Schiene gefordert. Es sollten mehr als 20 Jahre vergehen, in welchen diverse Varianten diskutiert wurden, die zur besten und effizientesten Realisierung führen sollten. 1989 entschied sich die Schweizer Regierung für den Bau einer Netzvariante mit dem Lötschberg- sowie dem Gotthardbasistunnel. Dadurch konnte das NEAT Konzept als Teil in das von der EU geforderte Abkommen über den Alpentransit übernommen werden, was eine Ratifizierung des EU-Transitabkommens durch die Schweizer Regierung im Dezember 1994 ermöglicht hat. Zudem wurde im selben Jahr durch das Schweizer Volk die Alpen-Initiative beschlossen, welche den Schutz der Alpen vor dem Transitverkehr vorsah. Dadurch wurde die Voraussetzung für das 1999 in Kraft getretene Verlagerungsgesetz geschaffen. Demnach sollten ab dem Jahr 2011 eine Million und ein Jahr nach Eröffnung des Gotthardbasistunnels nur noch 650.000<sup>2</sup> LKW die Schweizer Alpen durchqueren dürfen. Allein im Jahr 2000 passierten 672.000<sup>3</sup> LKW den Gotthard-Straßentunnel. Des Weiteren wurde mit der Alpen-Initiative ein Kapazitätsausbau des bestehenden Schnellstreckennetzes durch die Alpen verhindert. Begleitmaßnahmen, wie Subventionen an den kombinierten Verkehr und anstatt der pauschalen die benutzungsabhängige Schwerverkehrs-abgabe, sollten die Konkurrenzfähigkeit der rollenden Landstraßen gegenüber dem Straßenverkehr sichern.

---

<sup>2</sup> (Alpeninitiative, 2012)

<sup>3</sup> (BAV, 2011)

### 1.3.2 Finanzierung und Kosten

(Alpeninitiative, 2012)

Über ein gesamtes Finanzierungskonzept wird die Modernisierung der Schweizer Bundes Bahn geregelt. Im Jahr 1998 hat das Schweizer Volk der Vorlage über Bau und Finanzierung der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs (FinöV) zugestimmt. Dabei bildet ein Fond, welcher aus Mitteln der Mineralölsteuer, der Schwerverkehrsabgaben und der Mehrwertsteuer besteht in welchem innerhalb von 20 Jahren ca. 31,65 Milliarden Franken<sup>4</sup> investiert werden. Etwa mehr als ein Drittel<sup>5</sup> dieser Summe wird dem Projekt AlpTransit Gotthard AG bereitgestellt.

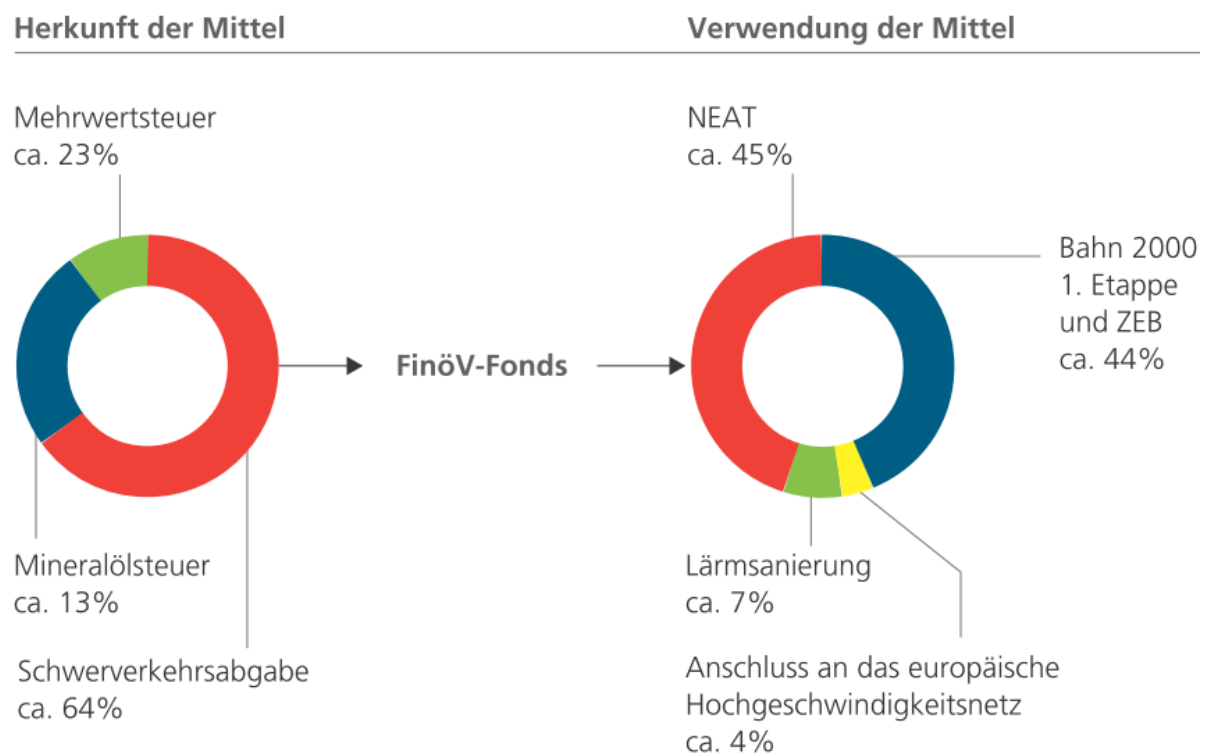


Abbildung 5: Finanzierung der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs (FinöV)  
(Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

Abbildung 5 veranschaulicht die Herkunft der Mittel. Dabei ist ersichtlich, dass die verkehrsabhängigen Steuereinnahmen (Mineralölsteuer (13%) und Schwerverkehrsabgabe (64%))<sup>6</sup> zweckgebunden an die Finanzierung der Modernisierung der Bahn gebunden sind. Lediglich ein Viertel der benötigten Mittel wird durch die Allgemeinheit, in Form der Mehrwertsteuer (23%)<sup>6</sup>, getragen.

<sup>4</sup> (Sinniger, et al., 2006)

<sup>5</sup> (Alp Transit, 12/2011)

<sup>6</sup> (Sinniger, et al., 2006)

### 1.3.3 Die NEAT Achse Gotthard

(Sinniger, et al., 2006)

Die Funktion einer wirtschaftlichen und schnellen Nord-Süd Eisenbahnalpenverbindung des 21. Jahrhunderts kann die Gotthardbahn mit ihren langen Rampen, den zahlreichen engen Kurvenradien und der Bewältigung von sehr großen Steigungen, nicht mehr erfüllen. Mit dem Bau des Gotthard- und des Ceneribasistunnel entsteht die erste Flachbahn durch die Alpen (Abbildung 6).

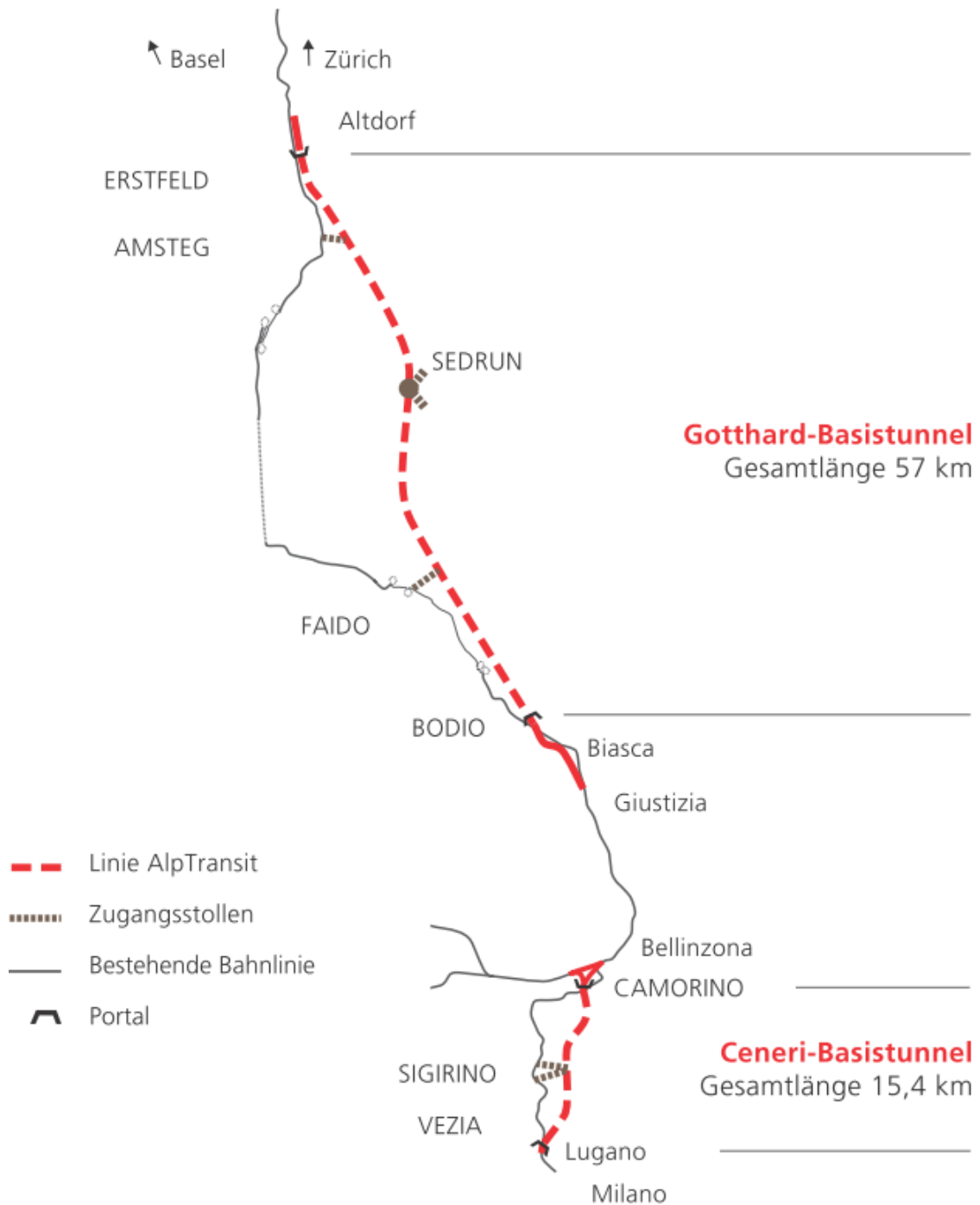


Abbildung 6: NEAT - Achse Gotthard (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

## 1.4 Der Gotthardbasistunnel (GBT)

### 1.4.1 Allgemeines

(Sinniger, et al., 2006)

Mit seinen zwei 57 km langen Einspurtunnelröhren stellt der Gotthardbasistunnel nicht nur das Herzstück der neuen AlpTransit Strecke, sondern den längsten Tunnel der Welt dar. Die 40 m voneinander entfernten Tunnel sind alle 325 m durch Querschläge, welche mit hermetisch abschließenden Türen versehen sind, miteinander verbunden.

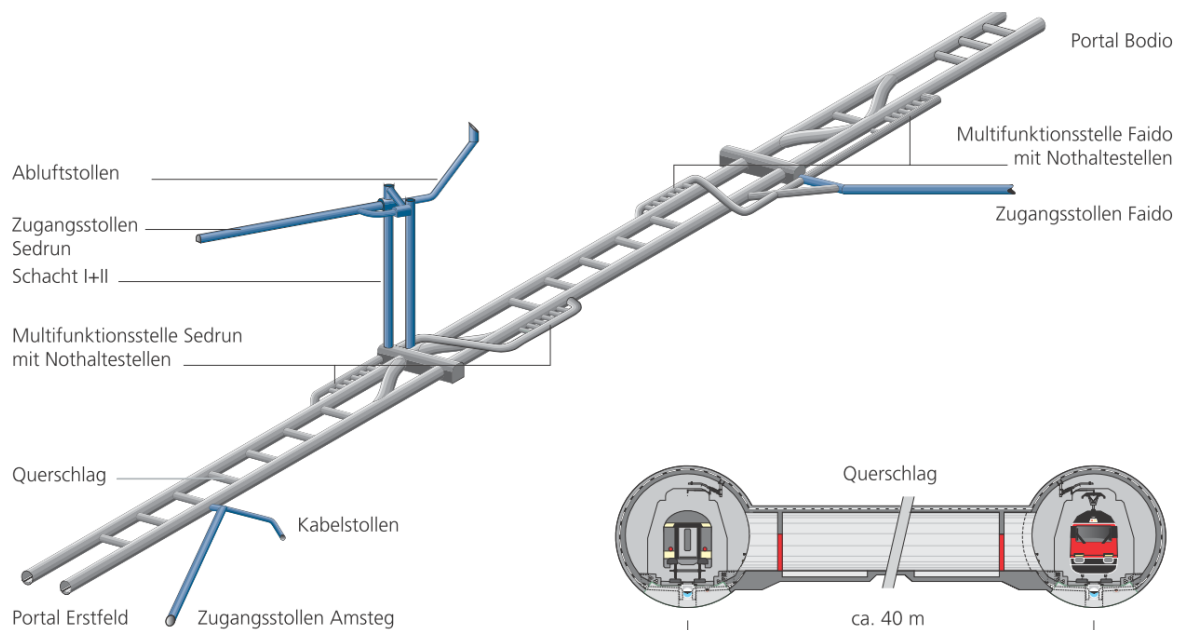


Abbildung 7: Systemschema des GBT (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

Des Weiteren verfügt der Tunnel in seinen Drittelpunkten über zwei **Multifunktionsstellen** (MFS), die jeweils mit zwei Tunnelverzweigungen, technischen Räumen für den Bahnbetrieb, Lüftungsinstallationen und Nothaltestellen versehen sind (Abbildung 7). Das Sicherheitskonzept sieht eine Weiterfahrt des Zuges bis zum Ausfahrtsportal vor, jedoch kann im Ereignisfall der Zug an den in den MFS sich befindlichen Nothaltestellen stehen bleiben, wobei sich die Passagiere über Querschläge in seitlich parallel führende Stollen in Sicherheit bringen können. Dabei müssen keine Gleise überquert werden, da der Rettungsweg über die Tunnelröhren führt. Zur Bewältigung des Höhenunterschiedes dienen sacht ansteigende Rampen.

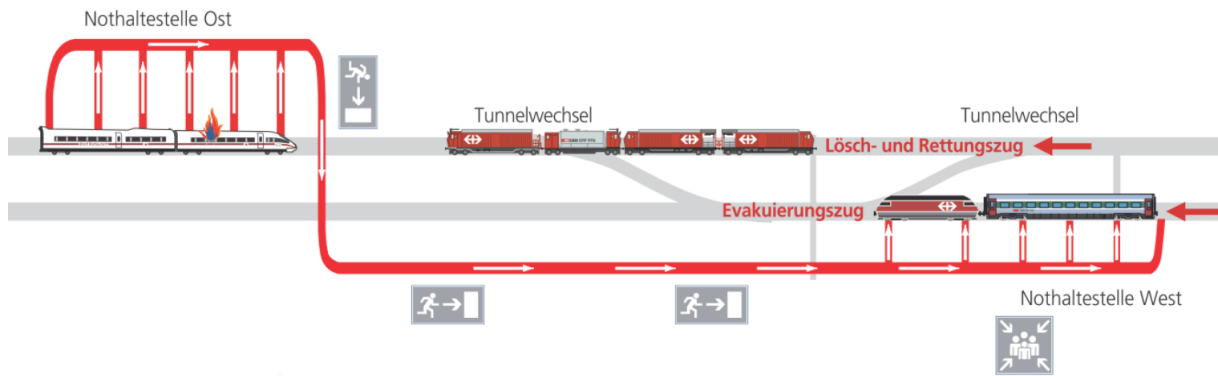


Abbildung 8: Flucht- und Rettungskonzept (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

Im Fall einer Notsituation wird die zweite Tunnelröhre für den regulären Bahnbetrieb gesperrt und ein Evakuierungszug in die intakte Röhre geschickt, der wiederum die in der Zwischenzeit an der zweiten Nothaltestelle angekommenen Passagiere abholt und ins Freie fährt (Abbildung 8).

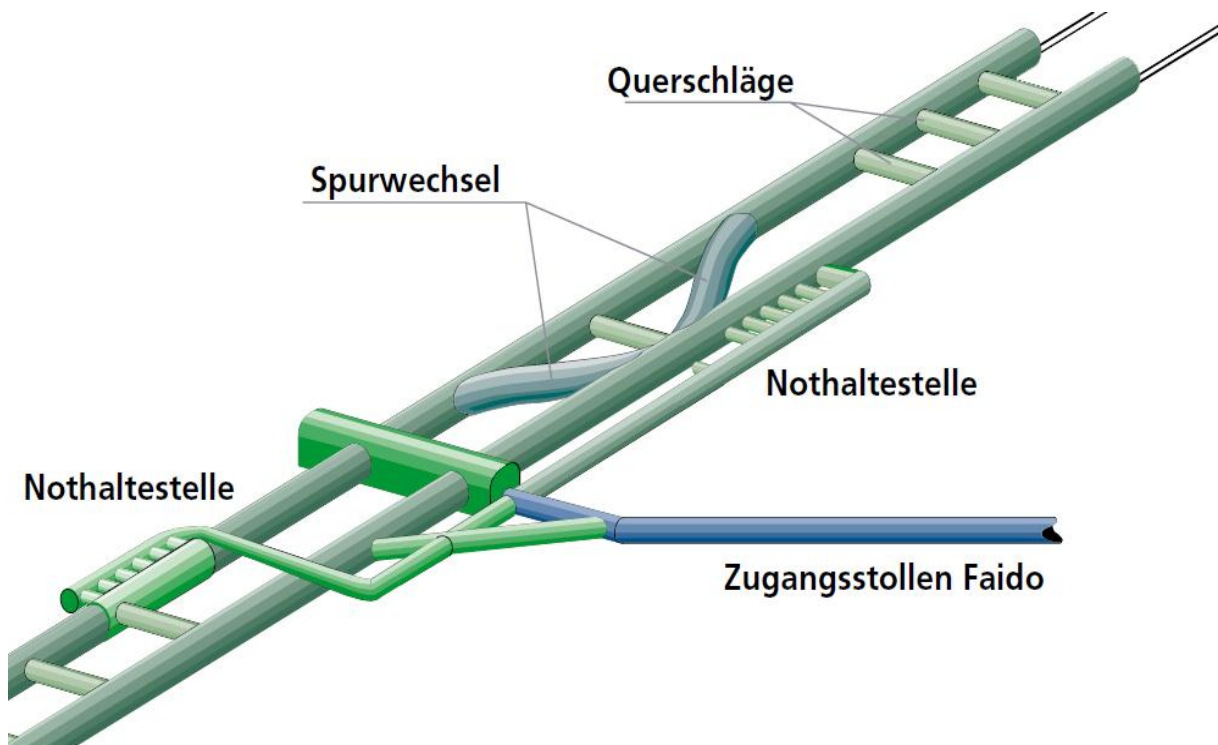


Abbildung 9: Multifunktionsstelle Faido (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

Abbildung 9 zeigt die Multifunktionsstelle in Faido. Zu erkennen sind die zwei Spurwechsellmöglichkeiten sowie die 450 m langen und mit 2 m breiten beleuchteten Gehsteigen versehenen Nothaltestellen, welche über Querschläge mit dem parallelführenden Fluchtstollensystem verbunden sind.

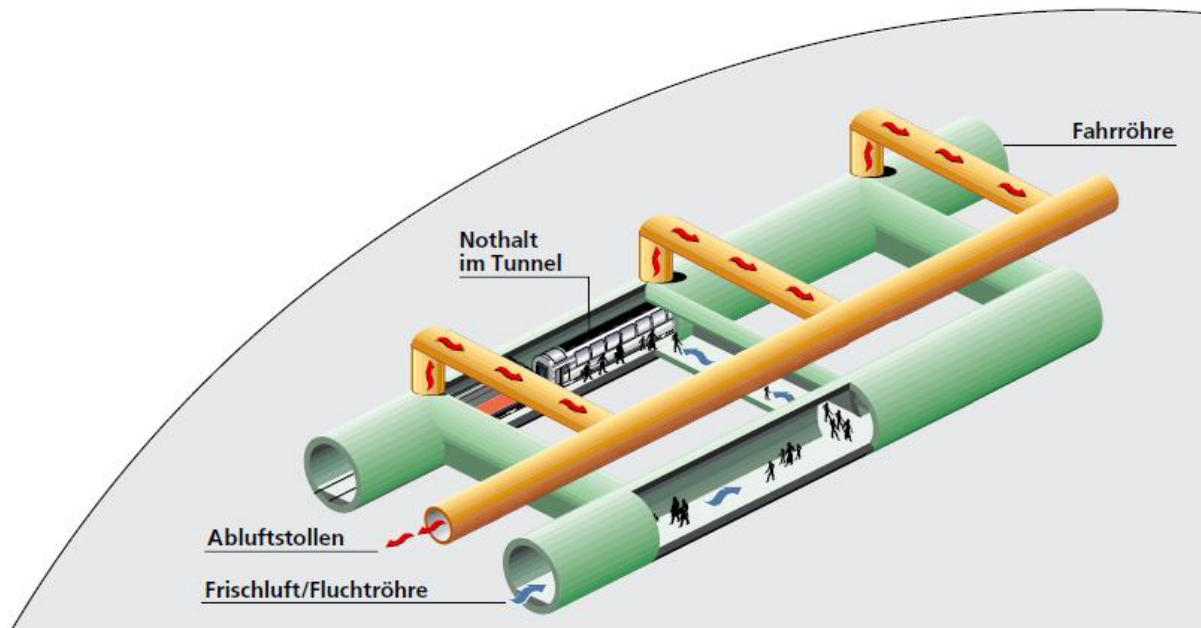


Abbildung 10: Sicherheitskonzept (Quelle: (AlpTransit, 2012))

Dabei wird über den Zugangsstollen, welcher mit einer Zwischendecke versehen ist, Frischluft in das Stollensystem gedrückt. Gleichzeitig wird mittels über dem Zug befindlichen Ventilatoren Luft aus dem Tunnel gesaugt und wiederum durch den Zugangsstollen aus dem Tunnel befördert (Abbildung 10). Damit wird gewährleistet, dass zum einen der Bereich der Nothaltestelle im Tunnel rauchfrei ist, und zum anderen, dass das parallel führende Stollensystem unter Druck steht. Insgesamt umfasst das gesamte Tunnelsystem des Gotthardbasistunnels eine respektable Länge von 152 Kilometer.

## 1.4.2 Chronik

(Sinniger, et al., 2006) (Alp Transit, 12/2011)

Die Idee einer Flachbahn entstand bereits kurz nach Ende des zweiten Weltkrieges, mit Eduard Gruners Idee von einem die Nord- mit der Südschweiz verbindenden Basistunnel mit einem unterirdischen Bahnhof. Jedoch ist die Geschichte der Projektierung, der verschiedenen Varianten und der schlussendlichen Entscheidung für die nun realisierte Variante sehr umfangreich und politisch komplex, weshalb sich dieses Kapitel mit den für den Bau zusammenhängenden relevanten Fakten der letzten 20 Jahre auseinandersetzt.

Mit der Errichtung der ersten Sondiersysteme wurde bereits 1993 begonnen. Im Jahr 1995 wurde die endgültige Linienführung des GBT festgelegt. Im selben Jahr hat auch der Bundesrat das Vorprojekt genehmigt. Die AlpTransit Gotthard AG wurde 1998 als Tochtergesellschaft der SBB gegründet. Im darauffolgenden Jahr wurden an der Alpennord- (Amsteg) und Südseite (Faido) mit den ersten Sprengungen die Vortriebe aufgenommen. Mit dem Baubeginn der Multifunktionsstelle in Faido und dem Vortriebsbeginn der ersten Tunnelbohrmaschine (TBM) in Bodio war das Jahr



2002 eines der bedeutendsten. Im darauffolgenden Jahr 2003 starteten auch im Norden die Tunnelbohrmaschinen von Amsteg in Richtung Sedrun. Im Herbst 2010 sowie im Frühling 2011 erfolgte der Hauptdurchschlag des Gotthardbasistunnels. Bis zu seiner voraussichtlichen Eröffnung im Jahr 2016 müssen noch weitere Arbeiten, wie Innenausbau, Installation der Bahntechnik, etc. abgeschlossen werden.

### 1.4.3 Linienführung und Längsschnitt

Maßgeblich verantwortlich für die Linienführung war die Geologie. Im Vorfeld wurden ab 1993 Probebohrungen, Temperaturmessungen und seismische Untersuchungen getätigt, anhand derer erfahrene Geologen Aussagen und Prognosen zu den erwartenden Gesteinen geben konnten. Durch die Auswertungen der Messergebnisse zeichneten sich unterschiedliche Gesteinsarten ab, vom weichen Sedimentgestein Schiefer (Urseren-Gravera-Zone), über dessen durch Regionalmetamorphose entstandenen Abwandlung in Form des Phyllits (Tavetscher Zwischenmassiv), bis zum harten und unnachgiebigen Granit (Abbildung 11). Diese weichen Gesteinszonen galten als bautechnische Herausforderungen, da entweder mit einem starken, druckhaften Verhalten oder mit wasserführenden Zonen gerechnet worden ist.

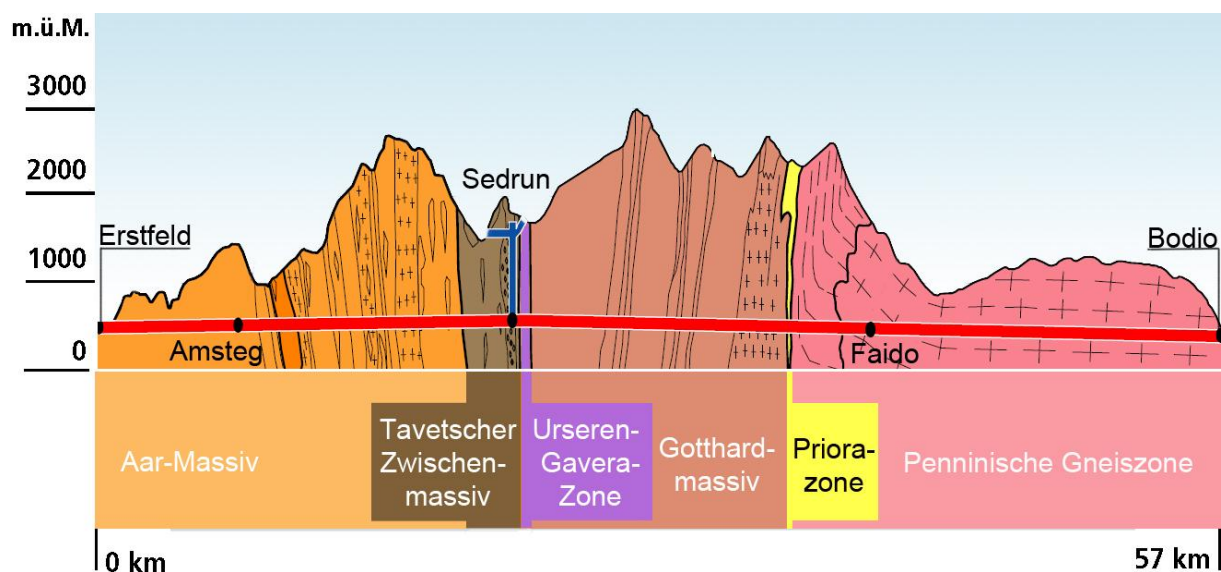


Abbildung 11: Längsschnitt und Geologie (Quelle: (Alp Transit, 12/2011), bearbeitet: Kuc)

Besonders die Priorazone sorgte vor Projektbeginn für reichlichen Diskussionsstoff, da in dieser Zone ein "schwimmendes Gestein", ein wassergesättigter, zuckerförmiger und kohäsionsloser Dolomit, vermutet worden ist. Sondierungen, welche bis auf das Tunnelniveau gereicht haben, konnten aber die Befürchtungen der Geologen entkräften.

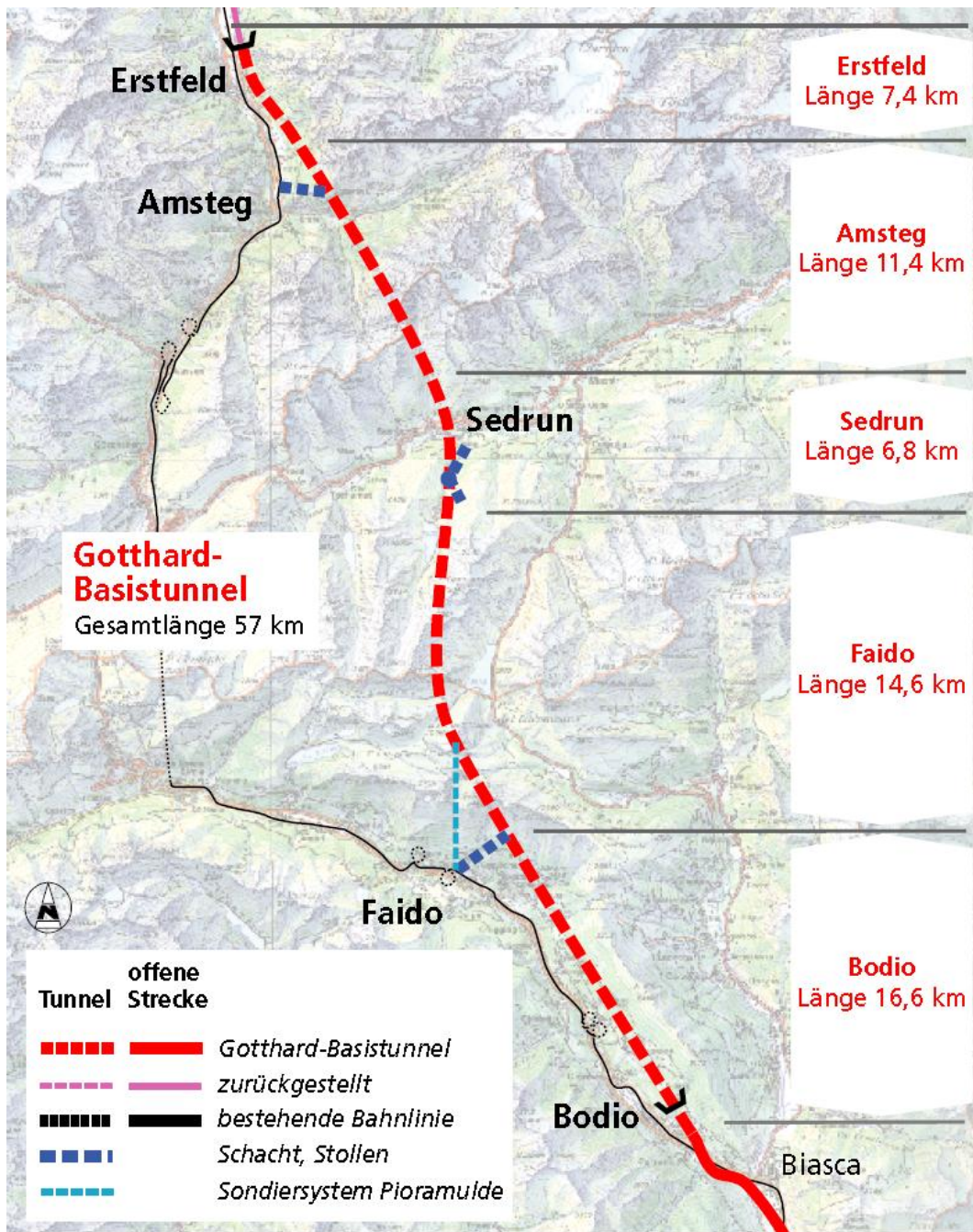


Abbildung 12: Linienführung des GBT (Quelle: (TAT, 2011) und (AlpTransit, 2012))

Abbildung 12 zeigt die finale Linienführung des Gotthardbasistunnels mit den jeweiligen Baustellenabschnitten. Mittels einer sanften S-Kurve führt der Basistunnel durch das Gotthardmassiv, wobei der minimale Bogenradius von 5000 m eine Projektierungsgeschwindigkeit von 250 km/h zulässt. Das Nordportal in Erstfeld liegt auf einer Höhe von 460 m ü.M., das Südportal auf 312 m ü.M. Der höchste Punkt der Strecke wird nach ca. 22 km in südlicher Fahrtrichtung erreicht und befindet sich auf einer Höhe von 549 m ü.M, wobei die Steigung mit 4,055 ‰ beziffert ist. Richtung Süden beträgt das Gefälle 6,76 ‰, wobei auf einer Länge von ca. 35 km 237 Höhenmeter abgebaut werden.

## 1.5 Vorteile des GBT gegenüber der Gotthardbahn

Durch den Bau einer Flachbahn durch die Alpen wird die Schweiz an das europäische Hochgeschwindigkeitsnetz sowohl im Norden als auch im Süden angeschlossen. Davon profitiert nicht nur der Personenverkehr, dessen Fahrzeit von Mailand nach Zürich sich um eine Stunde verkürzt, sondern vor allem auch der Güterverkehr. Es wird in Zukunft möglich sein, mit doppelt so schweren Zügen, angetrieben durch aus Wasserkraftwerken produzierter elektrischer und somit CO<sub>2</sub> neutraler Energie, durch die Alpen zu fahren. Derzeit ist aufgrund der hohen Steigung und der engen Kurvenradien auf der Gotthardbahn (siehe Abbildung 13) die jährliche Transportkapazität mit 20 Millionen Tonnen beschränkt. Mit Eröffnung der Gotthardachse wird die Kapazität auf 50 Millionen Tonnen gesteigert werden. Dies wird abgesehen von der Verdoppelung der täglich verkehrenden Güterzuganzahl, auch durch die gesetzlich vorgeschriebene Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene erreicht (siehe Kapitel 1.3).

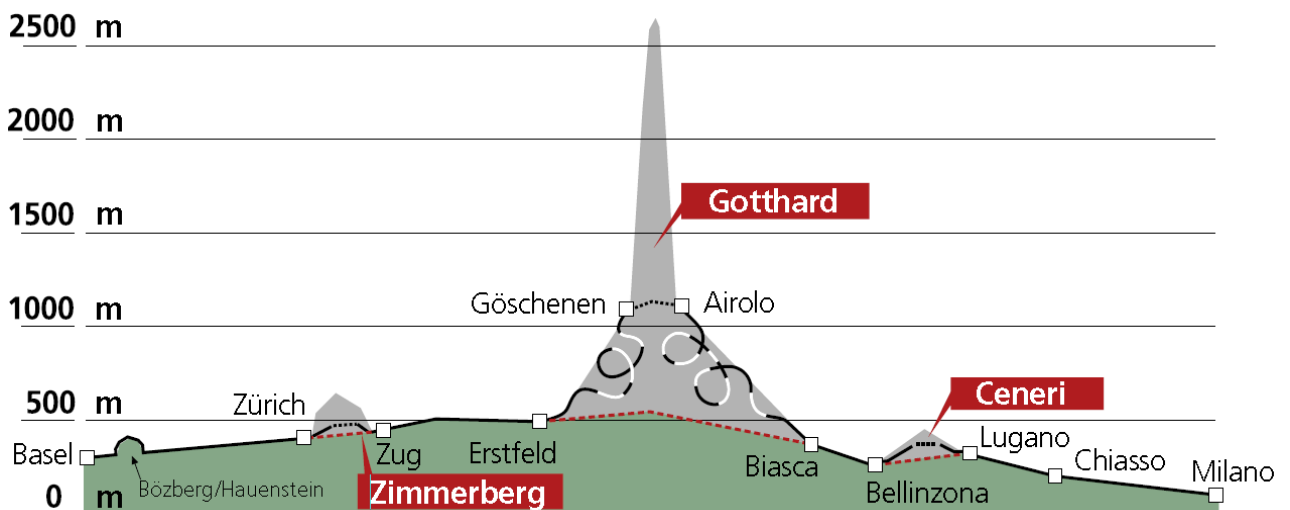


Abbildung 13: Vergleich Höhenschnitt (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

## 2 Die Gotthardbasistunnel Baustellenabschnitte Bodio - Faido

Dieses Kapitel widmet sich der Baustelleneinrichtung (BE) der Baustellenabschnitte Bodio und Faido und den dort im Jahr 2011 getätigten und für das Thema Schlamm relevanten Arbeiten. Die verwendeten inhaltlichen Informationen basieren auf folgende Quellen: (AlpTransit, 2012), (TAT, 2011), wobei die von der ARGE TAT zur Verfügung gestellten Dokumente teilweise wiederum als Quelle die Alptransit anführen.

### 2.1 Überblick über die Baustellen

Ursprünglich waren beide Baustellenabschnitte als voneinander unabhängige Lose ausgeschrieben. Das Consorzio TAT, bestehend aus den Firmen Alpine, Hochtief, Implema, Impregilo und CSC, hat sich während der Ausschreibungsphase jedoch um beide Abschnitte beworben und schlussendlich den Zuschlag bekommen.

#### 2.1.1 Bodio

Der Baustellenabschnitt Bodio umfasst eine Länge von 15,9 km, wobei die ersten Tunnelmeter in offener Bauweise errichtet worden sind. Erst nach Überwindung einer kurzen Strecke im Lockergestein begann der Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen im festen Gestein. Der 1200 m lange Umgehungsstollen diente der Errichtung der TBM-Montagekavernen. In Bodio befindet sich auch das Betonwerk, welches für die gesamte Betonversorgung der Einspurtunnel zuständig ist.

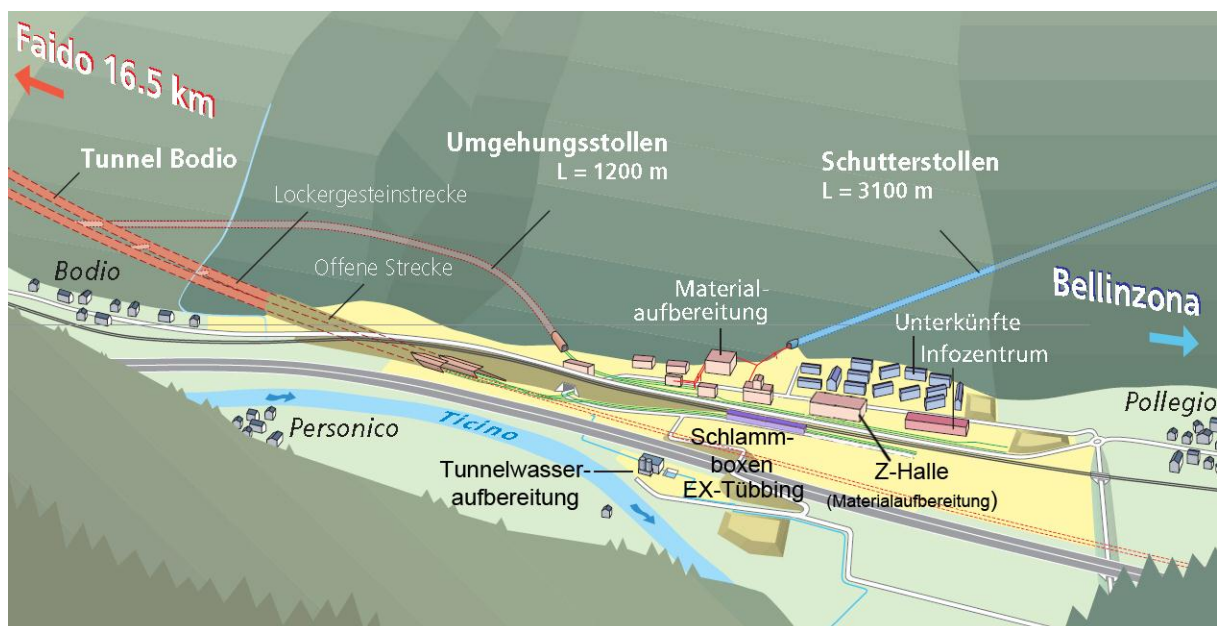


Abbildung 14: Baustelle Bodio (Quelle: (TAT, 2011) bearbeitet: Kuc)

Abbildung 14 zeigt die Lagerungsflächen des Schlammes, als Z-Halle und EX-Tübbing bezeichnet, und die Tunnelwasseraufbereitung. Des Weiteren ist ein 3100 m langer Schutterstollen ersichtlich, durch welchen das Ausbruchmaterial während des Vortriebes direkt in die sich hinter dem Berg befindliche Deponie transportiert worden ist. Erwähnenswert ist die bereits erfolgte Übergabe der Weströhre an das Nachfolgeunternehmen, welche die Bahntechnik schon eingebaut hat.

### 2.1.2 Faido

Mit 13,5 km zählt der Baustellenabschnitt Faido ebenso zum Verantwortungsbereich des Konsortiums. Das Tunnelniveau wird durch einen 2,7 km langen und 13 % geneigten Zugangstollen erreicht, der durch das Vorhandensein einer Zwischendecke auch als Ventilationsschacht dient. Faido verfügt über die bereits erwähnte Multifunktionsstelle. Im Laufe der Bauzeit haben unerwartete geologische Schwierigkeiten zu Verzögerungen und zur Versetzung des Spurwechsels in südlicher Richtung geführt.

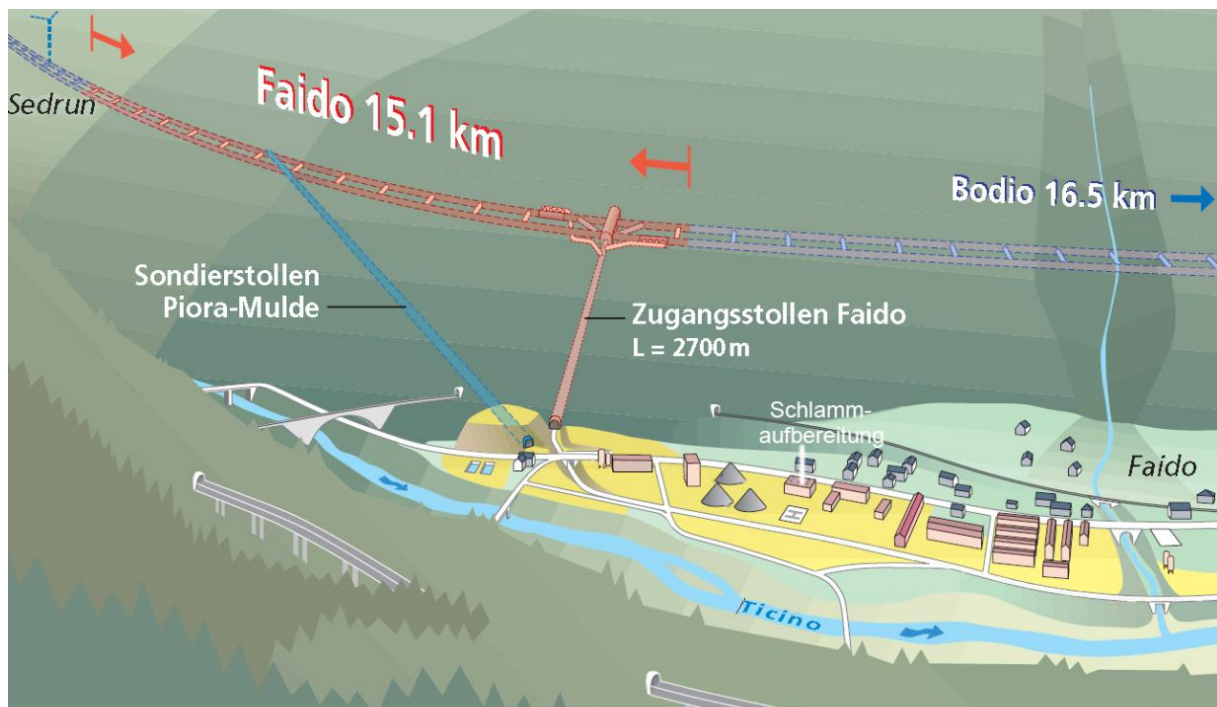


Abbildung 15: Baustelle Faido (Quelle: (TAT, 2011) und bearbeitet Kuc)

Abbildung 15 veranschaulicht die Baustelleneinrichtung Faido. Zu sehen ist unter anderem die Schlammaufbereitung, in welche der Schlamm aus der Querkaverne mittels eines Saug-LKW gelangt und nach dem Aufbereitungsprozess mittels einer Filterkammerpresse entwässert wird.

## 2.2 Die Hauptarbeiten des Consorzio TAT im Jahr 2011

Das Jahr 2011 stand hauptsächlich im Zeichen des Innenausbaus. Gemeint ist damit die Betonage der Tunnelhaut, sowohl im Einspurtunnel (EST) als auch in den Tunnelverzweigungen und Querschlägen. Weiters wurden die sich in der Multifunktionsstelle befindenden Absaugschächte, sowie Nebenstollen ausgebaut. Ebenso wurde nach dem Aufbringen mehrerer Schichten Spritzbeton in der Querkaverne mit dem Bau eines 2-stöckigen Hochbaus begonnen.

## 2.3 Das Innengewölbe

Das Innengewölbe ist der eigentliche Teil des Tunnels, der von einem den Tunnel passierenden Passagier gesehen wird. Es besteht aus 12 m langen und im Schnitt 110 m<sup>3</sup> fassenden unbewehrten Ortbetonteilen. Bewehrung kommt bei schlechter Geologie, im Bereich der Querschläge und in der Tunnelverzweigung zum Einsatz.

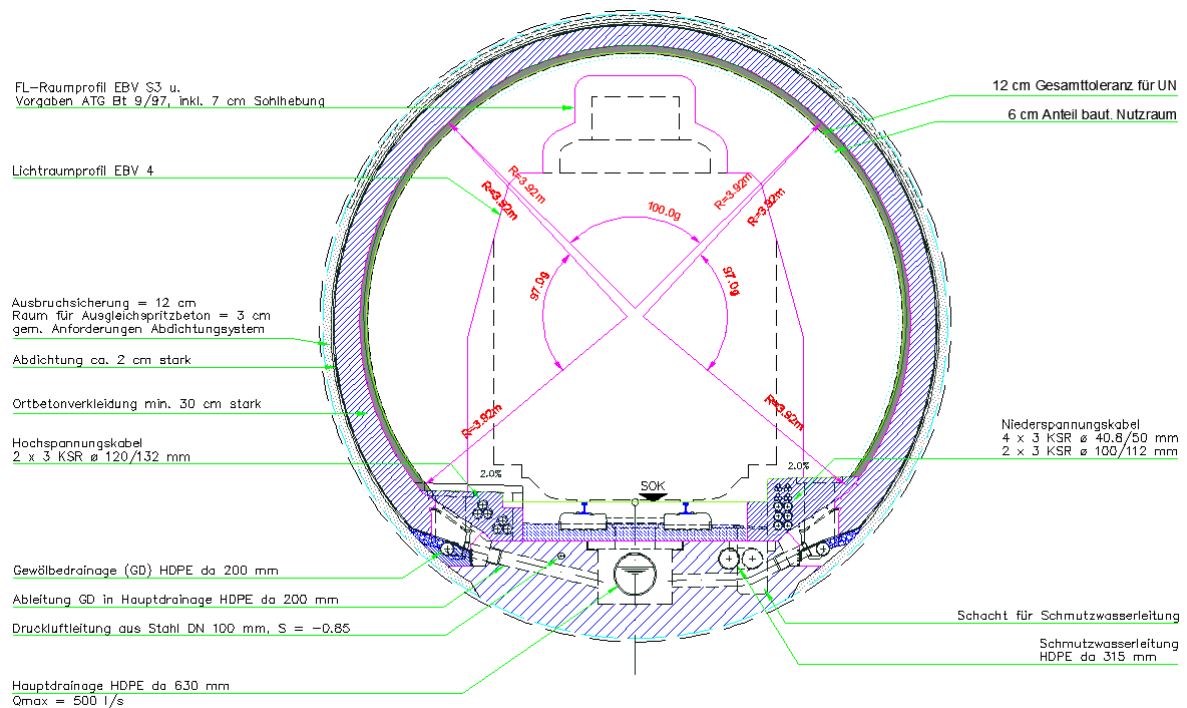


Abbildung 16: Querschnitt des EST (Quelle: (TAT, 2011))

Diese Tunnelhaut erfüllt in erster Linie die Funktion der Standsicherheit. Nach dem Ausbruch des Tunnels wurde als erste Sicherungsmaßnahme Spritzbeton auf den Felsen aufgetragen. Diese Ausbruchsicherung kann jedoch die Standsicherheit nur über eine befristete Zeit gewährleisten, weshalb weitere Maßnahmen zur Erreichung einer auf mindestens hundert Jahre ausgelegten Tragsicherheit benötigt werden. Im Gegensatz zu den Seitenstollen, in welchen mehrere bewehrte Spritzbetonschichten für die notwendige Sicherheit sorgen, muss in den Einspurtunnel aufgrund wasserhaltungstechnischer Überlegungen, sowie aus bahnbetrieblichen Gründen, auf die Ortbetonbauweise zurückgegriffen werden (Abbildung 16).

## 2.4 Das Entwässerungskonzept

Das Entwässerungskonzept sollte in einem standardisierten Ablauf zu realisieren gewesen sein und muss zudem auch den hohen Wasserdrücken über die Nutzungsdauer standhalten. Die Entscheidung fiel zu Gunsten einer Flächendrainage, die das anfallende Wasser über die an der Tunnelhaut angebrachte und dafür eigens entwickelte Abdichtungsfolie in Gewölbedrainageleitungen einleitet, welche alle 200 m mit der Hauptdrainageleitung verbunden sind.

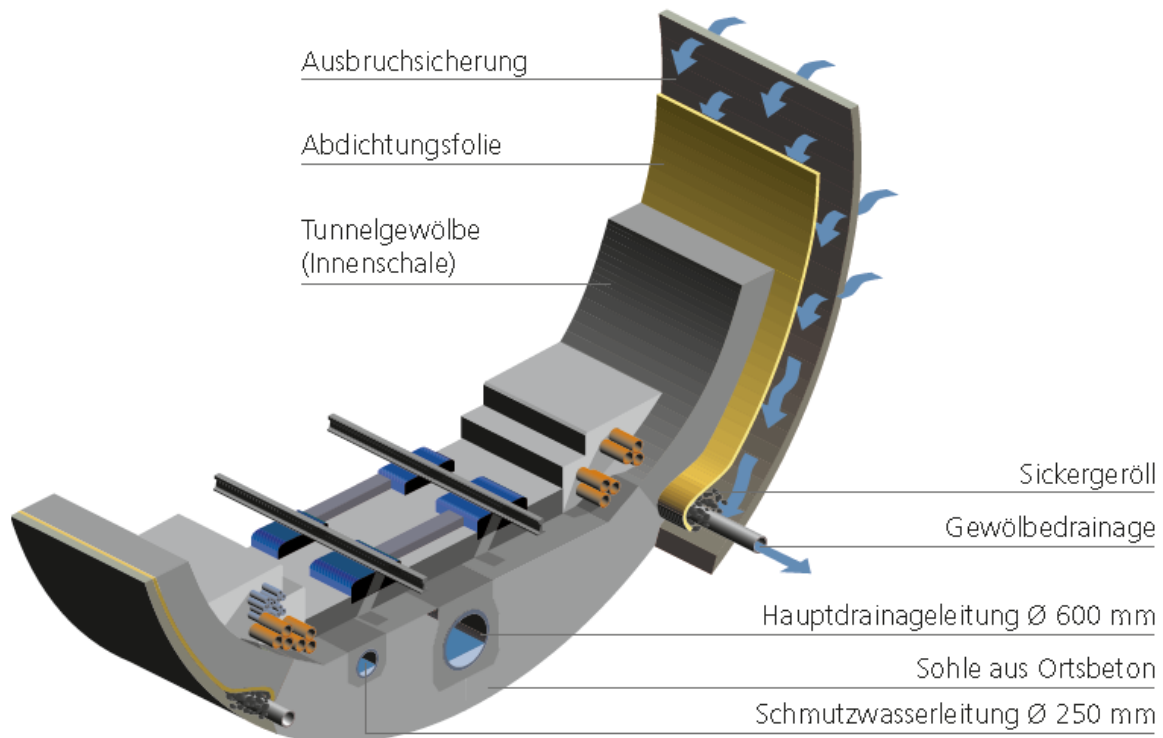


Abbildung 17: Querschnitt des EST (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))

Abbildung 17 veranschaulicht eine Systemskizze des Gewölbes und der Sohle. Abgesehen von der bereits erwähnten **Hauptdrainageleitung** (HD-Leitung) ist auch die Schmutzwasserleitung zu sehen. Alle innerhalb des Tunnels anfallenden Flüssigkeiten, Schmierstoffe, vom Zug tropfendes Regenwasser, werden 100 m voneinander entfernten Schächten zugeführt und durch diese in die 250 mm Schmutzwasserleitung geleitet. Dieses Trennsystem ist zwar teurer als ein Mischsystem, wie z.B. im Ceneribasistunnel, doch dadurch kann das Bergwasser nach Inbetriebnahme des Tunnels ohne weitere Behandlung aufgrund dessen natürlicher Reinheit in den Vorfluter geleitet werden. Das Schmutzwasser gelangt außerhalb des Tunnels in Auffangbecken und wird anschließend aufbereitet.

## 2.5 Die Herstellung des Innengewölbes

Die Herstellung des Innengewölbes erfolgt standardisiert durch den sogenannten Wurm. Damit ist eine Anordnung von mehreren Arbeitsbühnen gemeint mit einer gesamten Länge von 600 m. Auf den vorderen Bühnen wird die Ausbruchsicherung für die Verlegung der Arbeitsfolie vorbereitet. Diese wird von einer Mannschaft mit Hilfe einer sich um die Längsachse des Wurmes drehenden Kranbühne befestigt. Durch einen anderen Arbeitsschritt wird im Bereich der bereits von der TBM betonierten Sohle die Krawatte betoniert. Diese soll den Kraftanschluss des Gewölbes an die Sohle sicherstellen. Schlussendlich folgen zwei Arbeitsbühnen auf welchen sich die 12 m langen Schalungen des Innengewölbes befinden. Das Betonieren wird durch das Herabsetzen der Betonpumpe auf den unter den Bühnen geparkten Zug eingeleitet. Ein Betonzug besteht aus vier bis fünf rotierenden Betontransportbehältern, die aufgrund ihrer Form auch als Betonzigarre bezeichnet werden. Solch ein Behälter fasst 12 m<sup>3</sup> Beton und kann durch in seinem Inneren angebrachte Schaufeln den Beton durch Rotation zur Betonpumpe befördern. Dabei muss der Beton aus der letzten Zigarre alle davor liegenden Transportbehälter durchschwimmen bevor er schlussendlich in die Schalung gepumpt werden kann. Nach der Erstarrung des Betons muss die Schalung herabgesenkt und geputzt werden. Durchschnittlich werden zwei Blöcke pro Tag betoniert.

Die Produktion des Innengewölbes bietet zwei Schlammmentstehungsmöglichkeiten: Zu einem fällt (Beton-) Schlamm als Spritzbetonrückprall im Rahmen der Ausbruchsicherungsarbeiten an und zum anderen tritt bei der Beschickung der Betonpumpe, sowie der Betonweitergabe zwischen den einzelnen Betonzigarren immer etwas Beton aus.

Aufgrund der großen Entfernung des Einbauortes vom Betonwerk, muss der Beton bis zu 6 Stunden verarbeitbar sein. Eine weitere Anforderung an den Beton ist die rasche Festigkeitsentwicklung. Dabei musste eine Rezeptur gefunden werden, die auch bei den hohen Temperaturen und der hohen Luftfeuchte im Inneren des Tunnels eingesetzt werden kann.



### 3 Beschreibung der gesetzlichen Situation

Die in diesem Kapitel verwendeten inhaltlichen Informationen sind weitgehend folgenden Quellen entnommen: (Schneebeli, et al., 2006), (BAFU, 2008), (Zementwerke, 1999)

Lange Zeit wurden schlammartige Materialien aus der Material- und der Tunnelwasseraufbereitung als unverschmutztes Auffüllmaterial oder als Bauabfall, welches ohne weitere Behandlung auf Inertstoffdeponien abgelagert werden konnte, gehandhabt. Durch den Bau der langen Alpentunnel, Lötschberg und Gotthard, wurden aufgrund der schier unendlichen zu Tage geförderten Massen, die Schlämme auf Verunreinigungen genauer untersucht. Es stellte sich heraus, dass diese Materialien zum Teil stark mit Kohlenwasserstoffen, Chromaten (Chrom VI) und Nitrit belastet sind. Dabei sind die Nitritbelastung auf den Sprengvortrieb und die Chromatbelastung auf den Einsatz von Chrom VI haltigen Zementen zurückzuführen. Die Kohlenwasserstoffe hingegen gehen auf die Benutzung von Maschinen, welche mit Hydraulikölen, Schmiermitteln und Diesel betrieben werden, zurück. Durch das Inkrafttreten der BUWAL 2000 des **Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landwirtschaft** und der **Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA)** am 22.06.2005 sind die gesetzlichen Grenzwerte gegenüber der **Technischen Verordnung für Abfälle (TVA)** des Jahres 1990 verschärft worden. Dadurch mussten Materialien die zuvor auf Inertstoffdeponien entsorgt werden konnten auf Reststoffdeponien gebracht werden, was zu einer Erhöhung der Schlammmenge im Laufe der Bauzeit geführt hat.

#### 3.1 Belastung durch Chromat, Nitrit und Kohlenwasserstoffe

##### 3.1.1 Belastung durch Chromat

(Zementwerke, 1999)

In den natürlichen Rohmaterialien (Kalk, Ton und Mergel) des Zementes kommt Chrom überwiegend in einer dreiwertigen Form vor. Während des Brennvorganges bei der Klinkerproduktion oxidiert das dreiwertige Chrom zu Chrom VI und wird als Chromat bezeichnet. Bis zum Kontakt mit Wasser stellt Chrom VI keine Gefahr für den Mensch dar. Erst das bei der Zementverarbeitung in wässriger Lösung enthaltene Chromat ist für den Arbeitsschutz von Bedeutung, da beim Kontakt mit der Haut Chrom VI-Ionen resorbiert werden können. Folgen davon sind allergische Reaktionen sowie die sogenannte Maurerkrätze.

Um dieses Gesundheitsrisiko zu vermeiden sind die Schweizer Zementwerke seit 1. August 2005 (ChemRRV, 2011) verpflichtet ihren Produkten Reduktionsmittel (Eisen(II)- oder Zinn (II)-Sulfat) bei zu mischen. Damit erfolgte eine Anpassung an die europäische Richtlinie 76/769/EWG des Jahres 2003, welche einen Chrom VI

Grenzwert von 2 ppm vorsieht. Mit der Zeit verlieren die Reduktionmittel durch Oxidation an Wirkung, jedoch ist diese Zeitspanne lang genug, um die Verarbeitung und Erstarrung des Zementes zu gewährleisten.

Chrom gelangt durch den Spritzbetonrückprall und durch das "Kleckern" bei der kontinuierlichen Beschickung der Betonpumpe in den Schlamm. Bis zum Einsatz der Reduktionsmittel waren aufgrund der Ausbruchsicherung während des TBM Vortriebs, der Spritzbetonarbeiten in der MFS sowie dem Ausbau der Innenschale die Chrom VI Konzentrationen teilweise sehr hoch. Im Betrachtungsjahr 2011 spielt hingegen die Chrom VI Belastung keine große Rolle mehr.

### **3.1.2 Belastung durch Nitrit**

(Schneebeli, et al., 2006)

Spuren von Ammonium sowie Nitrit lassen sich auf Baustellenbereichen finden, in denen im Sprengvortrieb gearbeitet worden ist. Allerdings wurde im Jahr 2011 kaum gesprengt (ca. 5 Querschläge), weswegen die Nitrit- sowie Ammoniumbelastung bei Schlämmen keine besondere Rolle spielt.

### **3.1.3 Belastung durch Kohlenwasserstoffe (KW)**

(Schneebeli, et al., 2006)

Die Belastung durch Kohlenwasserstoffe stellt für den Gotthardbasistunnel für das Jahr 2011 den wichtigsten Punkt dar. Die Belastung bei den **Tunnelwasseraufbereitungsschlämmen** (TWAB) ist so hoch, dass seit Inkrafttreten der BUWAL-Empfehlung „Abfälle Auf Inertstoffdeponien“ des Jahres 2000, die bereits erwähnten Materialien nicht mehr auf Inertstoffdeponien abgelagert werden dürfen. Bei den **Materialaufbereitungsschlämmen** (MAB) hingegen, werden die Grenzwerte meist nicht überschritten, wobei festgestellt werden konnte, dass auf Baustellen mit TBM-Vortrieb geringere Belastungen als auf Baustellen mit Sprengvortrieb festgehalten werden konnten.

### **3.1.4 Beschreibung der Vorgehensweise bei der Laboranalyse**

(BAFU, 2008)

Tabelle 1 gibt die Richtlinien von der Probenentnahme, über die Aufbereitung bis zur Auswertung vor. Wichtig ist dabei die Einhaltung einer homogenen Probenentnahme, welche durch die LAGA Richtlinie PN 98 festgelegt ist. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass bei einer Entnahmestelle, nicht oberflächlich oder von einer Stelle, sondern vom gesamten Materialhaufen mehrere gleichschwere Proben zu entnehmen sind. Diese werden dann getrocknet und gemahlen, um eine homogene Probe zu erhalten.

Als Messmethode kommt die Gaschromatographie zur Anwendung, bei welcher das chemische Gemisch in einzelne Verbindung aufgetrennt wird. Im einfachsten Fall kommt es dabei zu einer Aufteilung aufgrund der unterschiedlichen Siedepunkte der einzelnen Substanzen des Gemisches. Bei dieser Art der Chromatografie wird mit Hilfe eines Trägergases das zu analysierende Material, welches durch Erhitzen in einen gasförmigen Zustand gebracht worden ist, durch eine gewickelte, gebogene, kapillarartige Röhre, die sogenannte Röhre gedrückt. Diese aus Quarzglas bestehende Röhre besitzt eine Länge zwischen 20 und 100 m, wobei die einzelnen Komponenten je nach Dampfdruck und Polarität der einzelnen Gasmoleküle unterschiedlich lange verweilen. Am Säulenende wird von einem Detektor der Austrittszeitpunkt sowie die Menge gemessen und von einem Schreiber grafisch dargestellt. Dabei werden die Mengen sowie die Zeitpunkte mit Standardsubstanzen verglichen, wobei eine leichte, schnelle qualitative sowie quantitative Bestimmung komplexer Stoffgemische ermöglicht wird.

Tabelle 1: Auszug aus "Analysemethoden für Feststoff - und Wasserproben" BAFU 2008

Parameter	Kohlenwasserstoff-Index C10-C40
Konservierung und Aufbewahrung	Keine besonderen Vorkehrungen; Proben in möglichst dicht verschlossenen Behältern (Glasgefäß; für größere Probenmengen Plastikeimer) gekühlt transportieren und lagern.
Probenvorbereitung	Grobes Material (> 0,5-1 cm) im feuchten Zustand durch Sieben abtrennen und separat mit Backenbrecher zerkleinern. Das gebrochene Material muss wieder unter die Probe gemischt werden. Nicht rieselfähige Proben, insbesondere lehmiges Material, bei maximal 40 °C vortrocknen und anschließend über Backenbrecher zerkleinern.
Probenaufbereitung	Extraktion der feuchten oder getrockneten Probe mit Lösungsmittelgemisch gemäß Norm. Abtrennung von Aceton durch Extraktion mit Wasser und anschließend Reinigen des Extraktes über Florisil (Magnesiumsilikat = Absorptionsmittel).
Messmethode	Gaschromatographie mit FID-Detektoren
Auswertung	Integration aller Signale zwischen C10 (n-Decan) und C40 (n-Tetracontan). Eichung mit Öl-Standard Gemisch gemäß Norm.
Gehaltsangabe	In mg/kg bezogen auf das Trockengewicht (105 °C) der Probe.
Qualitätssicherung	Die Qualitätssicherungsmaßnahmen der Normen (s. Literatur) und Bezug auf Aktivität des Florisils und der Widerfindung des Ölstandards müssen eingehalten und dokumentiert werden.
Bestimmungsgrenze	50 mg/kg TS (aliphatische Kohlenwasserstoffe). Diese Bestimmungsgrenze (BG) liegt unter derjenigen der zitierten Methode (100 mg/kg); sie kann jedoch bei Anwendungen von leichten Modifikationen bei der Aufkonzentrierung und/oder Messung unter Verwendung von reinen Lösungsmitteln erreicht werden.
Literatur	SN EN 14039 <sup>7</sup> ISO 16703 <sup>8</sup>
andere Verfahren	Da die erfasste Fraktion der Kohlenwasserstoffe über die Messmethode definiert ist, können keine alternativen Methoden eingesetzt werden.

<sup>7</sup> SN EN 14039, Ausgabe: 2005-01; Charakterisierung von Abfällen - Bestimmung des Gehalts an Kohlenwasserstoffen von C<sub>10</sub> - C<sub>40</sub> mittels Gaschromatographie

<sup>8</sup> ISO 16703, Ausgabe: 2004-11; Bodenbeschaffenheit - Gaschromatographische Bestimmung des Gehalts an Mineralölkohlenwasserstoffen.

### 3.2 Gesetzliche Grundlagen und maßgebende Grenzwerte

Tabelle 2: Gesetzliche Vorschriften für belastete Schlämme in der Schweiz  
(Schneebeli, et al., 2006)

Bezeichnung	Inhalt
Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10.12.1990	Vermischungsverbot von Abfällen (Art. 10).
	Verwertungspflicht, sofern technisch möglich und wirtschaftlich tragbar (Art. 12).
	Grenzwerte für die Ablagerung von verschmutztem Material auf sog. Inertstoff- oder Reststoff/Reaktordeponien relevant für Schlamm: Grenzwert für Nitrit-, Chrom VI- und Kohlenwasserstoffgehalt im Eluat).
Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVa) vom 22.06.2005	Regelungen zum Umgang mit Sonderabfällen (ab einer gewissen Höhe der Schadstoffbelastung gelten Schlämme aus der Tunnelwasserbehandlung als Sonderabfälle).
Aushubrichtlinie (AHR), BUWAL 1999	Richtwerte für unverschmutztes (U) und tolerierbar (T) verschmutztes Material (relevant für Schlamm: Kohlenwasserstoffbelastung).
	Verwertungsmöglichkeiten für U-Material: als Baustoff oder als Auffüllung von Materialentnahmenstellen für Terrainveränderungen.
	Verwertungsmöglichkeiten für T-Material: als (hydraulisch) gebundener Baustoff.
Empfehlung BUWAL 200 ("Abfälle auf Inertstoffdeponien")	Ergänzende Richtwerte für Materialablagerungen auf Inertstoff-Deponien (relevant für Schlamm: Richtwert für Kohlenwasserstoffgesamtgehalt im Feststoff).
Richtlinie BUWAL 1998 ("Entsorgung von Abfällen in Zementwerken")	Regelung für die Zulassung von Abfällen für eine Verwertung in Zementwerken (Anforderungen an die Abfälle und dann die Zementwerke).

Folgende Grenzwerte sind für belastete Schlämme des GBT maßgebend.

Tabelle 3: Maßgebend Grenzwerte zur Beurteilung der Belastung von Schlämmen (Schneebeli, et al., 2006)

	aliphatische KW > C10	Chrom VI	Nitrit	pH
Grenzwerte TVA für Eluat				
-Inertstoff	0.5 mg/l	0.01 mg/l	0.1 mg/l	6 - 12
-Reststoff	5 mg/l	0.1 mg/l	1 mg/l	6 - 12
Richtwerte AHR (Gesamtgehalte)				
-U-Wert	50 mg/kg TS	0.05 mg/kg TS	---	---
-T-Wert	250 mg/kg TS	0.05 mg/kg TS	---	---
Empfehlung BUWAL 2000	500 mg/kg TS	---	---	---

## 4 Beschreibung des Schlammes

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der allgemeinen Beschreibung des Schlammes und den Abläufen von seiner Entstehung bis zur Deponierung. Dabei wird sowohl auf die einzelnen Arbeitsschritte als auch auf die dazugehörige Protokollierung eingegangen. Anhand der Laborergebnisse wird die Aufteilung der Schlammmenge auf die einzelnen zur Verfügung stehenden Deponien sowie die sich daraus ergebenden Kosten betrachtet. Am Ende des Kapitels werden die Materialkennwerte des Schlammes und die im Jahr 2011 angefallene Masse bestimmt. Des Weiteren werden atmosphärische Einflüsse auf den Schlamm untersucht.

### 4.1 Zusammensetzung der schlammartigen Materialien

Der sogenannte "(Beton-) Schlamm" ist im Allgemeinen eine Mischung aus Zement, Zuschlagstoffen, Zuschlagmitteln, sowie Baustellenabfällen und organischen Substanzen. Unter den organischen Substanzen werden Maschinenfette, Hydraulikflüssigkeiten und Diesel verstanden.

Die Zuschlagmittel bestehen aus Fließmitteln, Erstarrungsverzögerern (Puzzolane) und einer Plastikphaser, die im Brandfall schmelzen und somit dem Beton Platz zum Dehnen bieten sollen.

### 4.2 Schlammmentstehung in den sich bewegenden Baustellen und Materialstrom

Da es sich bei einem Tunnel um keine stationäre Baustelle handelt und die Bauarbeiten nicht in einem Schritt sondern nacheinander über die Länge des Tunnels durchgeführt werden müssen, werden sie als "sich bewegende Baustellen" definiert. Dieses Kapitel beschäftigt sich nicht mit den eigentlichen Bauarbeiten der einzelnen Abschnitte, sondern mit dem betriebsbedingt anfallenden Abfall, der als Schlamm den Tunnel wieder verlässt.

Zum einen lief bis März 2011 der Vortrieb der Weströhre, an welchem Ausbruchmaterial und Schlamm entstanden sind, und zum anderen wurden an der eigentlichen Hauptbaustelle, der Produktion des Innengewölbes, durch den "Wurm" bis zu 1500 Tunnelmeter Tunnelhaut pro Monat hergestellt. Daneben wurden der Ausbau der Multifunktionsstelle sowie die Nachprofilierung betrieben.

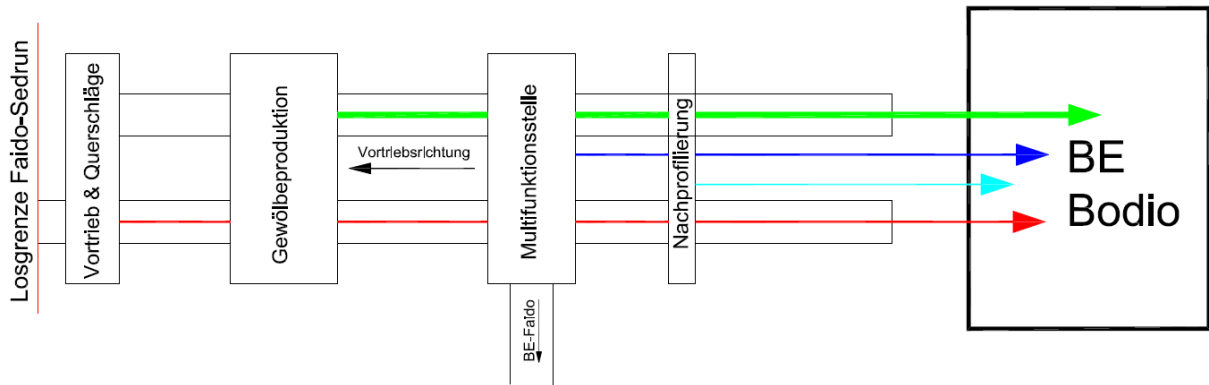


Abbildung 18: Baustellen des GBT (Kuc)

Abbildung 18 zeigt die verschiedenen Baustellenabschnitte und den Schammstrom Richtung Bodio. Besonders beim Ausbau der Multifunktionsstelle wurde bei den vielen Seitenstollen auf das Spritzbetonverfahren gesetzt. Obwohl dieses Verfahren während der Vortriebsarbeiten stark verbessert worden ist, gibt es dennoch einen Rückprallwert bis maximal 20 %. Unter Rückprall versteht man jenes Material, welches nicht auf der zu betonierenden Fläche haftet und als Verlust zu Boden fällt.

#### 4.2.1 Aufteilung Schammherkunft

Das für den Abtransport auf die Deponien klassifizierte Material weist folgende Herkunft auf.

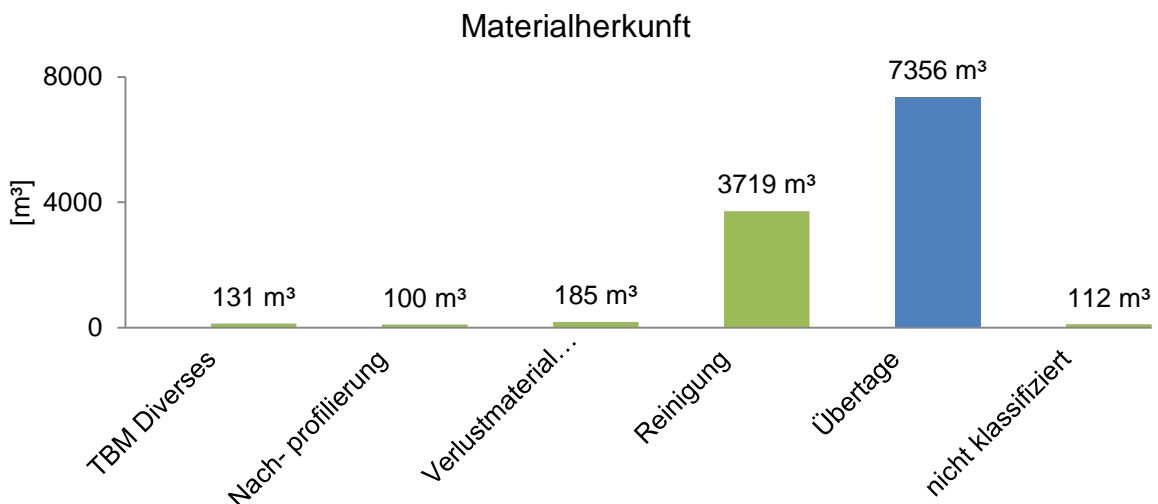


Abbildung 19: Materialherkunft Jan. - Dez. 2011

Abbildung 19 verdeutlicht, dass der meiste produzierte Schlamm durch den Übertagebetrieb entstanden ist. Auch das Material welches durch die Reinigung der Sohlen, Rigolen und Leitungen zu Tage gefördert worden ist, weist einen hohen Wert auf. Auf die Positionen mit den verhältnismäßig geringen Volumen wird nicht näher eingegangen.



Abbildung 20 veranschaulicht die Zusammensetzung der Position mit der höchsten Schlammmenge aus Abbildung 19. Dabei ist ersichtlich, dass der meiste Schlamm als Restbeton anfällt.

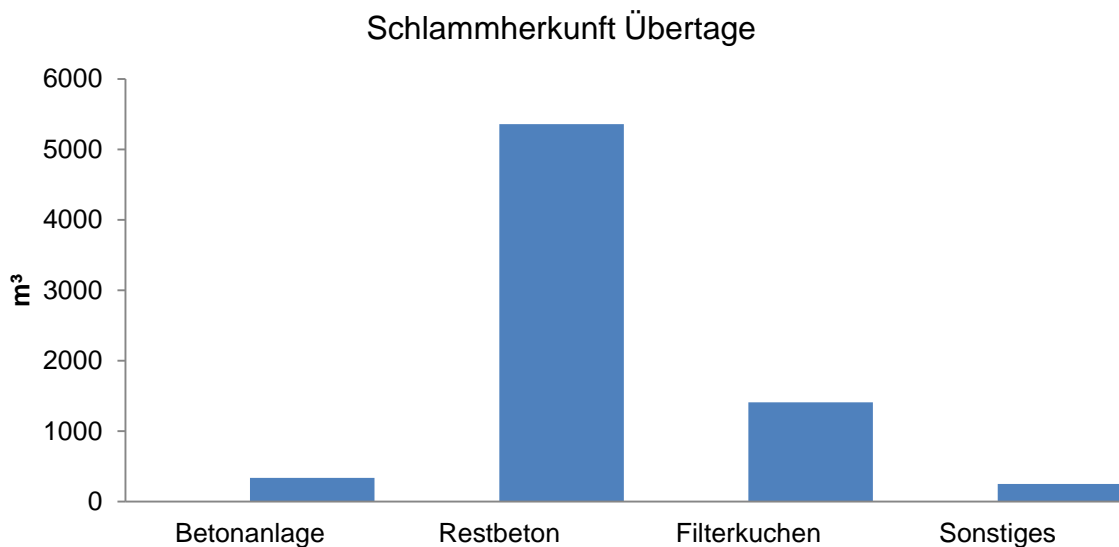


Abbildung 20: Materialherkunft Übertage Jan. - Dez. 2011

#### 4.2.2 Restbetonmenge im Vergleich zur gesamt verbauten Betonmenge

Anhand der von einzelnen Abteilungen zur Verfügung gestellten Daten werden an dieser Stelle die im Jahr 2011 gesamt verbauten Betonkubaturen in einer Tabelle veranschaulicht.

Tabelle 4: Gesamt verbautes Betonvolumen

2011	Bodio		Faido	
	Einbauort	Volumen	Einbauort	Volumen
Jan	Diverses	2 m³	MFS	119 m³
Feb	QS, EST-Ost + West	21.253 m³	MFS QK	33 m³
Mrz.	QS, EST-Ost + West	34 m³	MFS QK	1.651 m³
Apr	QS, EST-Ost + West	14.141 m³	MFS QK	1.595 m³
Mai	QS, EST-Ost + West	18.544 m³	MFS QK	761 m³
Jun	QS, EST-Ost + West	17.009 m³	MFS QK	211 m³
Jul	QS, EST-Ost + West	7.712 m³	MFS QK	1.004 m³
Aug	QS, EST - OST + West	8.208 m³	MFS QK	587 m³
Sep	QS, EST - OST + West	10.818 m³	MFS QK	1.103 m³
Okt	QS, EST - OST + West	32 m³	MFS	81 m³
Nov	QS, EST - OST, Bankette	5.559 m³	MFS	1.904 m³
Dez	Bankette	472 m³	MFS	1.300 m³
Zwischensumme:		<b>1.037.815 m³</b>		<b>103.456 m³</b>
Gesamtsumme:		<b>1.141.271 m³</b>		

Zu erkennen ist, dass der meiste Beton in Bodio produziert und für den Innenausbau des Einspurtunnels verwendet worden ist. Die in Faido produzierte Menge beträgt lediglich 10 % jener, die in Bodio angefallen ist und wurde für Spritzbetonarbeiten in der Querkaverne (QK), sowie im Seitenstollen verwendet.

In Anbetracht der großen Menge von 114 Tsd. m<sup>3</sup> produziertem Beton, erscheinen die angefallenen fünf Tsd. m<sup>3</sup> Beton als relativ geringe Menge. Dies macht einen Prozentanteil von 4,7 % aus.

### **4.3 Der Transport des Schlammes aus dem Tunnel**

Grundsätzlich gelangt der Schlamm in drei Arten aus dem Tunnel:

- Als Restbeton in einer Betonzigarre,
- in einem Saug- oder Baggerzug/ LKW,
- durch die Hauptdrainage- oder Schmutzwasserleitung.

#### **4.3.1 Transport des Restbetons**

Der in den Betonzigarren antransportierte, aber nicht benötigte Beton, wird nach Zugabe von sogenannten Betonkillern (Mittel die eine Erstarrung des Betons verhindern) wieder nach Bodio gefahren und einer Betonwaschanlage übergeben. In dieser Anlage werden die Zuschlagstoffe ausgewaschen die einer neuerlichen Verwendung zugeführt werden können. Die Feinteile werden in einer Filterkammerpresse entwässert.

#### **4.3.2 Transport mit einem Saug oder Baggerzug/- LKW**

Der auf der Tunnelsohle liegende und zumeist erstarrte Schlamm wird in zwei Vorgängen aufgeladen. Dabei kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz.

##### **4.3.2.1 Funktionsweise Baggerzug**

Ein auf einem Wagon stehender Minibagger entfernt vorerst die groben Schlammteile. Besondere Herausforderung für den Arbeiter stellt abgesehen von der Arbeitsgeschwindigkeit die Nichtbeschädigung von Schienen und Weichen dar.

##### **4.3.2.2 Funktionsweise Saugzug**

Der verbleibende Schlamm wird mittels eines Saugzuges verladen. Dabei wird der eventuell pastöse Schlamm durch Zugabe von Wasser in eine breiige Masse gewandelt. Das Absaugen des Schlammes erfolgt in mehreren Schritten. Im ersten Schritt wird zwischen den Schwellen der überwiegende Teil des Matsches durch das Saugrohr, welches durch einen Arbeiter bedient wird, aufgesogen (Abbildung 21). Im

zweiten Schritt wird der sich zwischen den Schwellen befindliche Schlamm durch eine zweite Arbeitskraft mittels einer besenartigen Schaufel hervor gekratzt.



Abbildung 21: Schlammabsaugung (KUC)



Schlamm unter dem Wurm



Erhärtung des Schlammes



Nach der Reinigung

Abbildung 22: Schlammstadien (KUC)

Abbildung 22 veranschaulicht die verschiedenen Stadien von der Schlammmentstehung bis zu seiner Entfernung. Dabei ist zu beachten, dass der Wassergehalt des Schlammes, welcher sich im Bereich des Wurmes befindet, sehr hoch ist. Das Abladen des Schlammes findet in der Z-Halle, einem überdachten Umschlagsplatz, oder beim EX-Tübbing statt (siehe Kapitel: 2.1.1). In der Z-Halle wird der gesamte Wagon, auf welchem sich auch der Schlammbehälter befindet, mittels einer Rotationskippe gedreht und entleert. Wie Abbildung 23 verdeutlicht, besteht die Rotationskippe aus einem statischen Teil, dem Rollenlaufwerk, und einem rotierenden Teil, auf welchem der zu entleerende Wagon gefahren wird. Während des Kippvorganges wird der Wagon durch hydraulische Halterungen gesichert.



Abbildung 23: Rotationskippe (Kuc)

Naturgemäß bleiben auf dem Transportbehälter Materialrückstände zurück, welche durch einen von einem Arbeiter gelenkten Wasserstrahl abgespritzt werden. Dabei kommt es zu einer weiteren Wasserzufuhr. Dem Schlamm wird das zugeführte Wasser entzogen, indem es einem Pumpensumpf zu rinnt, dort abgesaugt und einer Nachbehandlung zugeführt wird. Nach einer gewissen Zeit wird der Schlamm mittels eines Radladers in die freien Boxen verfrachtet, wobei nach einer Probeentnahme die Box mittels einer Kette abgesperrt wird.

#### 4.3.2.3 Funktionsweise Saug-LKW

Das Prinzip ist dasselbe wie bei einem Saugzug mit der Ausnahme, dass der Transportbehälter auf einem LKW situiert ist. Dieser Saug-LKW wird jedoch nur in der Querkaverne Faido eingesetzt und transportiert den Schlamm durch den Zugangstollen zu der in der Baustelleinrichtung Faido stehenden Behandlungsanlage, in welcher das Schlammwasser behandelt und die Feststoffe in einer Filterkammerpresse entwässert werden.

### 4.3.3 Transport durch die Hauptdrainage- und Schmutzwasserleitung

Im Normalfall wird der Sohlenschlamm mittels den Zügen oder dem LKW aus dem Tunnel abtransportiert. Jedoch kann ein verhältnismäßig kleiner Teil des Schlammes während der Bauarbeiten auch in die Hauptdrainage- sowie die Schmutzwasserleitung gelangen und mit dem anfallenden Berg- oder Brauchwasser aus dem Berg gelangen. Das in den Leitungen transportierte Material wird in der Kläranlage Bodio behandelt, gefiltert und zu einem Filterkuchen gepresst.

#### 4.3.3.1 Die Kläranlage Bodio

Material, welches im Tunnel in die Schmutzwasserleitung oder gegebenenfalls in die Hauptdrainageleitung gelangt ist, wird in der Kläranlage Bodio des Loses 503 gefiltert. Daneben verfolgt die Kläranlage das Ziel, das Wasser betreffend pH-Wert zu neutralisieren und es bei Bedarf abzukühlen.

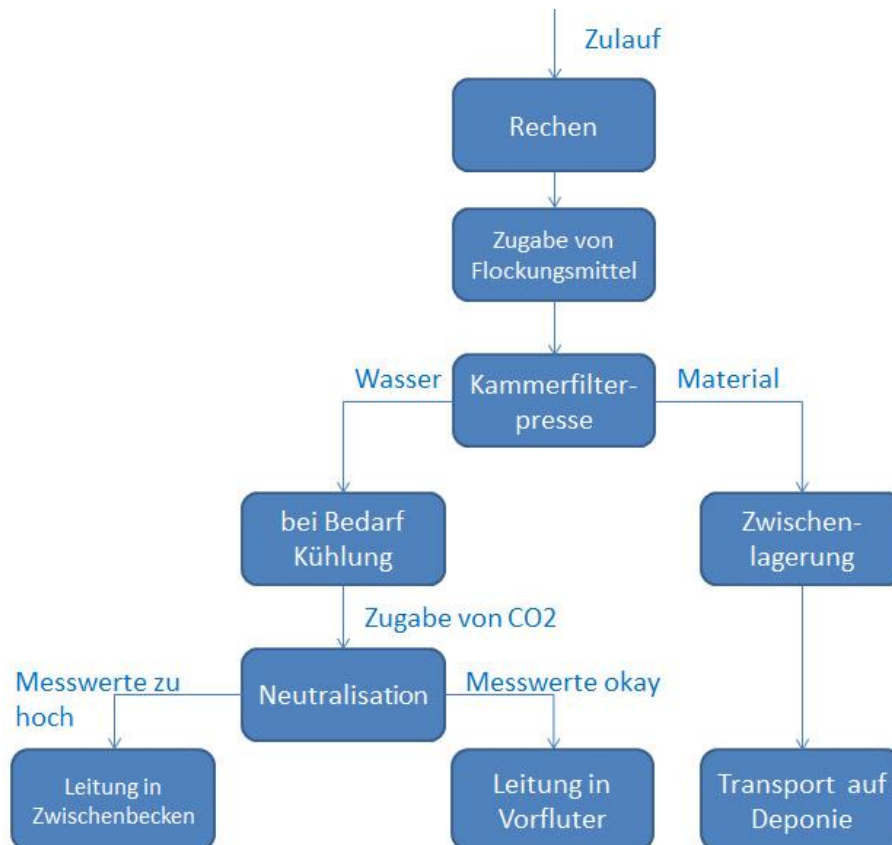


Abbildung 24: Schema der Kläranlage (Kuc)

Abbildung 24 zeigt das Schema der Kläranlage. Nachdem dem verunreinigten Wasser durch Rechen die groben Teile (wie PU-Schaum, Folien, etc.) entfernt worden sind, gelangt es in ein Becken, in welchem dem Wasser Flockungsmittel zugegeben werden. Diese Mittel binden die kleinen kolloidalen Schmutzpartikel indem sie größere Mikroflocken bilden. Die Flocken sind dann groß genug, um in einer Filterkammerpresse als fester Rückstand zurück zu bleiben. Die in der Presse rückbleibende Materialmasse hat eine Trockensubstanz (TS) von ca. 70 % und wird auf eine Deponie gefahren.

Das feststofffreie Wasser wird in ein weiteres Becken gepumpt, in welchem durch Zugabe von Kohlensäure, der hohe pH-Wert des Wassers gesenkt und somit in den neutralen Wert geführt wird.

Durch eine kontinuierliche Überwachung des pH-Wertes und der Trübung des Wassers, wird eine Einleitung von schadstoffhaltigem Wasser in den Vorfluter verhindert. Sollten Grenzwerte überschritten werden, so kann mittels der Schließung von Schiebern das Wasser in ein Zwischenbecken umgeleitet werden.

## **4.4 Registrierung über Begleitscheine und Schlammanalyse**

### **4.4.1 Registrierung über Begleitscheine**

Durch das Ausfüllen eines Begleitscheines wird sowohl die Herkunft des Schlammes mit einer Mengenangabe als auch die Ablagerungsstelle erfasst. Damit und durch weitere Erfassungen (EDV) kann das Material von seinem Entstehungsort bis zur endgültigen Deponierung verfolgt werden. Prinzipiell ist zu sagen, dass die Menge des sich im Schlammbehälter oder in der Betonzigarre befindlichen Materials vom Lokfahrer geschätzt und in Kubikmeter-Einheiten angegeben wird. Dabei spielen die Erfahrungen der abschätzenden Person und die Lichtverhältnisse eine wichtige Rolle und können die Ergebnisse verfälschen.

### **4.4.2 Schlammanalyse**

Dem in den einzelnen Boxen in der Z-Halle oder beim EX-Tübbing gelagerten Schlamm werden Proben entnommen und nach Zürich in das Laboratorium BMG-Engineering geschickt. Diese Proben werden wie bereits im Kapitel 3.1 beschrieben auf die Kohlenwasserstoff-, Nitrit- und Chromatkonzentrationen untersucht.

### **4.4.3 Probenentnahme**

Die Probeentnahme erfolgt auf Basis der LAGA Richtlinie PN 98 (Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, 10/2002). In dieser Richtlinie werden die "Hot-Spot" (Worst Case Betrachtung) sowie eine allgemeine Abfallbeprobung beschrieben, die auch beim Bau des GBT zum Einsatz kommt. Die allgemeine Beprobung kommt im Regelfall zum Einsatz und sieht mehrere Materialentnahmen an unterschiedlichen Stellen und Tiefen des Haufwerkes vor. Dabei wird für die Durchschneidung des Haufwerkes ein Radlader genutzt.

## **4.5 Zwischenlagerung des Schlammes**

Der Schlamm wird entweder in der überdachten Z-Halle oder im Bereich des Ex-Tübbings im Freien gelagert, wobei die Boxen, wie Abbildung 25 darstellt, gekennzeichnet sind, um eine eindeutige Identifizierung des Schlammes zu ermöglichen. Im Regelfall wird eine Box bis zur vollständigen Füllung mit Material beschickt, bevor sie abgesperrt und beprobt wird. Jedoch wird in Fällen, in welchen eine starke Kontaminierung des Schlammes mit Schadstoffen vermutet wird, nur die betroffene Menge in einer Box gelagert, um die Masse, die auf den teuren Reaktordeponien entsorgt wird, möglichst gering zu halten. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass in einer Box 100 m<sup>3</sup> normal verschmutztes Material gelagert

werden, während der Nebenbehälter nur zu ca. 10 %, dafür aber mit stark kontaminiertem Schlamm, gefüllt ist.

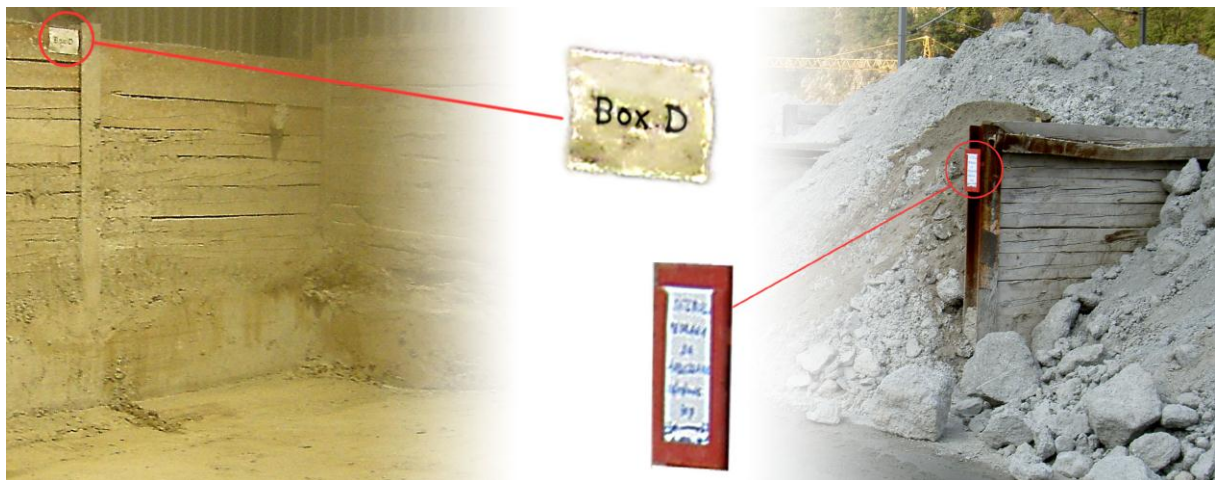


Abbildung 25: Schlammboxen (Kuc)

Während die Probe im Labor analysiert wird, kann der Schlamm "ausbluten". Die Betonung liegt beim letzten Satz bewusst auf „kann“, denn der Feuchtigkeitsverlust bedingt ein trockenes Wetter bei den im Freien gelagerten Schlämmen. Bei einer schlechten Wetterlage wird das Material wiederum mit Regenwasser vermischt. Im Kapitel 5.7 werden die atmosphärischen Einflüsse auf den Schlamm analysiert. Doch auch bei der sehr günstigen Tessiner Wetterlage findet eine Trocknung bestenfalls in der oberen Schlammschicht statt. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Schlammkonsistenz, der nasse Schlamm ab einer gewissen Überdeckungshöhe wie eine Deckschicht fungiert, die eine weitere Verdunstung des Wassers verhindert.

#### 4.6 Transport zur Deponie

Nach dem Erhalt der Laborergebnisse wird anhand der Analytik entschieden, auf welche Deponie der Schlamm gefahren wird. Für den Transport ist ein Spediteur verantwortlich, was zur Folge hat, dass die tatsächliche abtransportierte Masse nicht von der bauausführenden Firma gewogen wird. Bei der Begutachtung der Deponiescheine ist aufgefallen, dass auf selbigen immer das gleiche LKW-Leergewicht vermerkt ist. Dies hatte zur Folge, dass an einem Stichtag ein LKW-Fahrer auf die firmeneigene Wage zur Messung des Leergewichtes gebeten wurde. Auf das Resultat dieser Messung wird im Kapitel 4.10 eingegangen. Die auf den Deponien ankommenden LKW werden gewogen. Durch Subtraktion des LKW-Leergewichtes ergibt sich die Masse des zu deponierenden Schlammes. Die Arbeitsgemeinschaft erhält von den einzelnen Deponien die Wiegescheine mit einer fortlaufenden Nummer, sowie dem Nettogewicht des transportierten Materials. Zusätzlich stehen auf einem Beizettel die gefahrenen Kilometer sowie die dafür erforderlichen Stunden.

Im Folgenden wird ein Überblick über die zur Verfügung stehenden Deponien sowie die Verteilung der gesamten Schlammmasse auf die einzelnen Entsorgungsstätten gegeben. Dazu wird im Vorfeld auf die vorhandenen Laborergebnisse eingegangen aus welchen sich die Wahl der Deponien ergeben.

#### **4.7 Betrachtung der Laborergebnisse betreffend der Kohlenwasserstoffe**

Um einen besseren Überblick über die Anzahl der Proben inklusive der Höhe der Kohlenwasserstoff - Belastungen wiederzugeben, erfolgt eine graphische Darstellung. Zu beachten ist, dass diese Darstellung keine Informationen über die Masse des Schlammes von welchem die Probe gezogen wurde, wiedergibt. Bei Betrachtung der Diagramme könnte die Meinung entstehen, dass fast der gesamte Schlamm auf eine Reststoff- oder Reaktordeponie gebracht werden müsste, was aber aufgrund der tatsächlich transportierten Massen nicht der Fall ist. Es kann durchaus sein, dass in einer Box lediglich eine Tonne mit stark belastetem Material gelagert wurde, die andere Box jedoch mit schwach belastetem Material zur Gänze angefüllt gewesen ist. (siehe Kapitel 4.5)

##### **4.7.1 Darstellung über den Zeitraum Mitte 2008 bis Ende 2012**

Die Proben wurden verschiedenen Zwischenlagerungsboxen (Situierung der Boxen in 2.1.1 dargestellt) entnommen. Da der Schlamm nach dem Abtransport aus dem Tunnel in freie zur Verfügung stehende Boxen gebracht wird, erfolgt die Unterteilung zur besseren Übersicht in Ex-Tübbing sowie Z-Halle. Mit "Diverse" sind Proben gemeint, die direkt im Tunnel aus Schächten oder bei Ereignissen entnommen worden sind. Diese Arbeit beschäftigt sich zwar mit der Schlamm Entsorgung des Jahres 2011, jedoch wird für einen besseren Überblick über die Verteilung der im Labor analysierten Proben, der Zeitraum von Mitte 2008 bis Ende 2012 dargestellt.



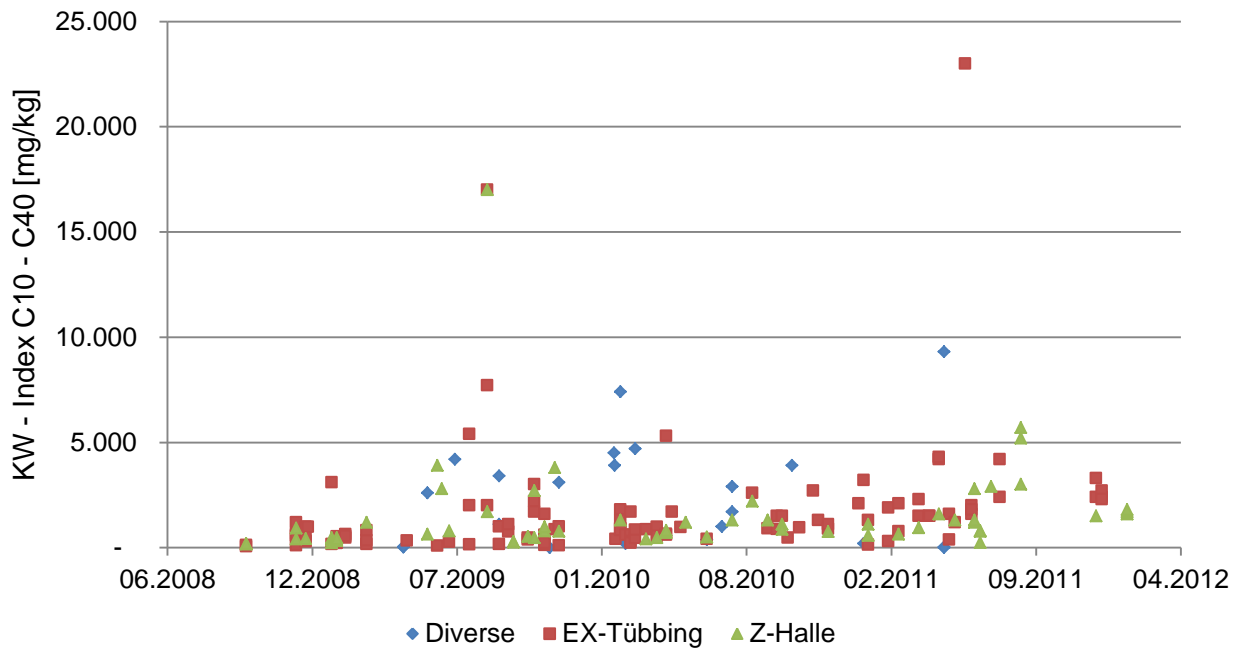


Abbildung 26: Belastung mit KW im Zeitraum Mitte 2008 bis Dez. 2011

In Abbildung 26 ist ersichtlich, dass die meisten Proben Kohlenwasserstoffwerte bis 5000 mg/kg TS haben.

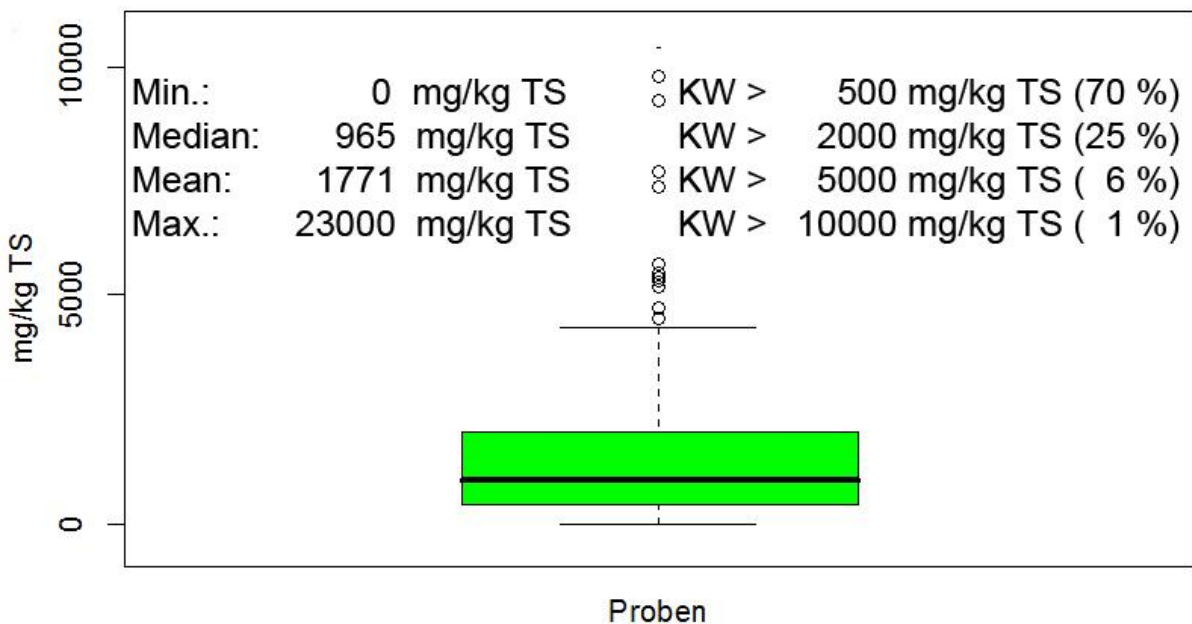


Abbildung 27: Boxplot der analysierten Proben des Zeitraumes 2008 - 2012

Ein Boxplot der analysierten Proben ist in Abbildung 27 dargestellt. Der Median beträgt 965 mg/kg. Des Weiteren ist ersichtlich, dass mehr als 70 % der Proben über 500 mg/kg Kohlenwasserstoffe aufweisen und somit nicht auf eine Inertstoffdeponie gebracht werden können. Werte über 5000 mg/kg TS kommen nur in beschränkter Anzahl vor, weshalb sie in den folgenden Darstellungen nicht berücksichtigt werden.

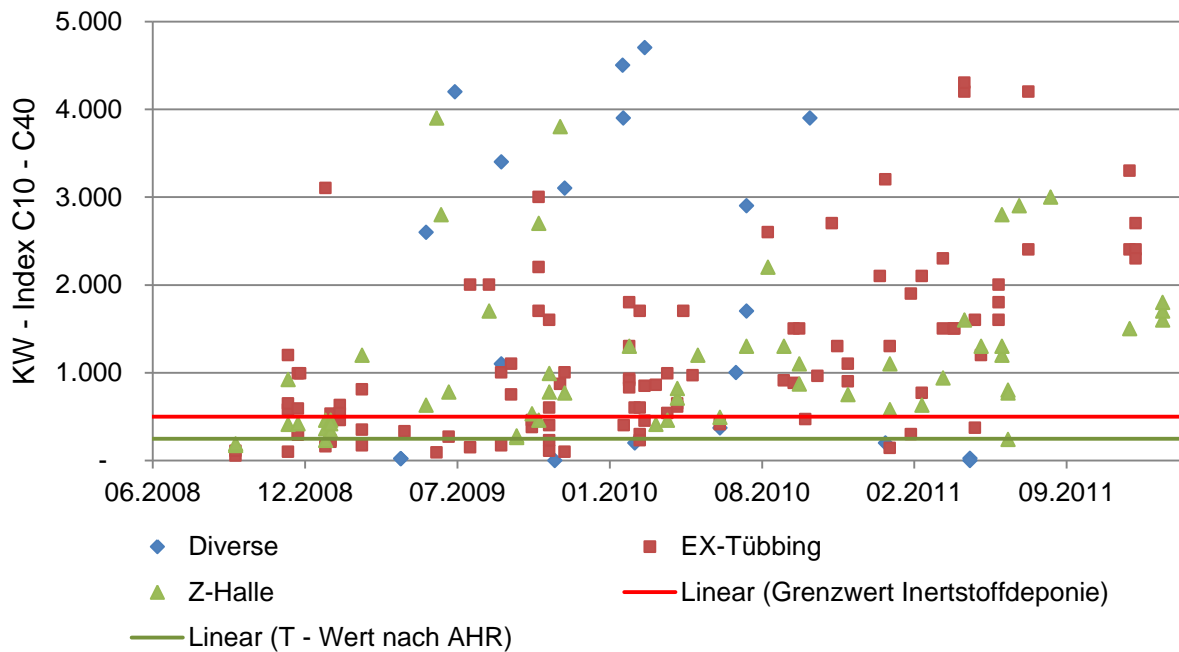


Abbildung 28: KW inkl. Deponiegrenzwerten 2008 - 2011

Die Deponiegrenzwerte werden in Abbildung 28 dargestellt, wobei die rote Linie den Grenzwert einer Inertstoffdeponie (500 mg/kg TS) und die grüne Linie den T-Wert (250 mg/kg TS, siehe auch Tabelle 2) nach der Aushubrichtlinie darstellt. Eine Beschreibung dieser Grenzwerte ist dem Kapitel 3 zu entnehmen.

#### 4.7.2 Darstellung für das Jahr 2011

Für das Jahr 2011 ergibt sich nach der Auswertung ein Median mit einem Wert von 1600 mg/kg, wobei 87 % der analysierten Proben einen Kohlenwasserstoffgehalt von mehr als 500 mg/kg TS aufweisen (Abbildung 29).

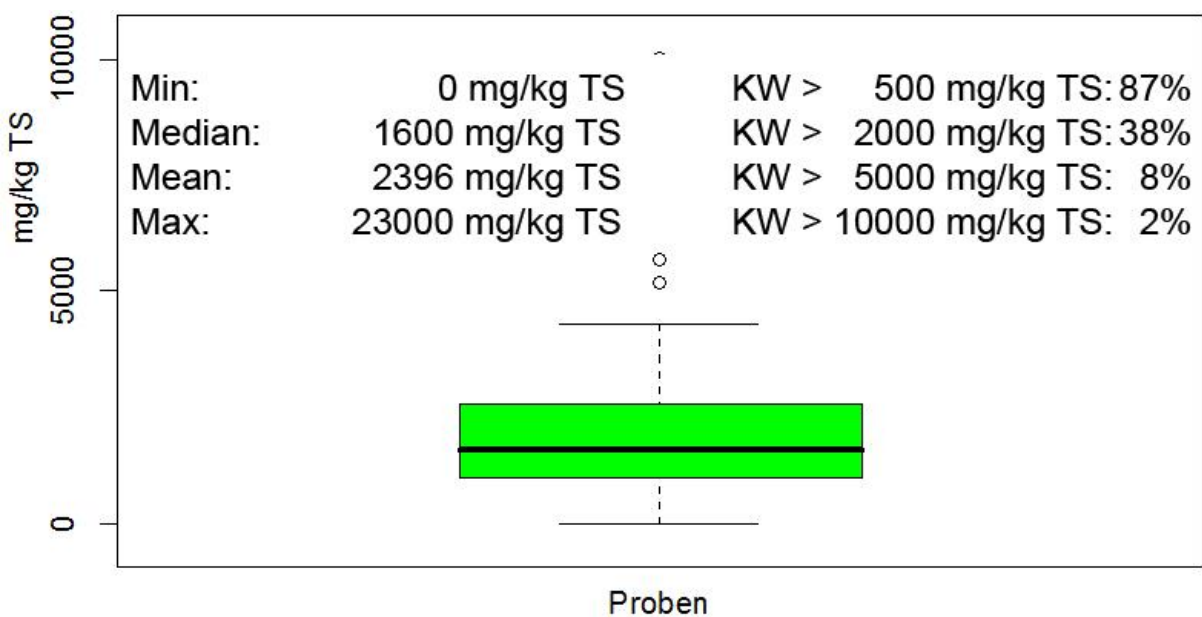


Abbildung 29: Boxplot der analysierten Proben für das Jahr 2011

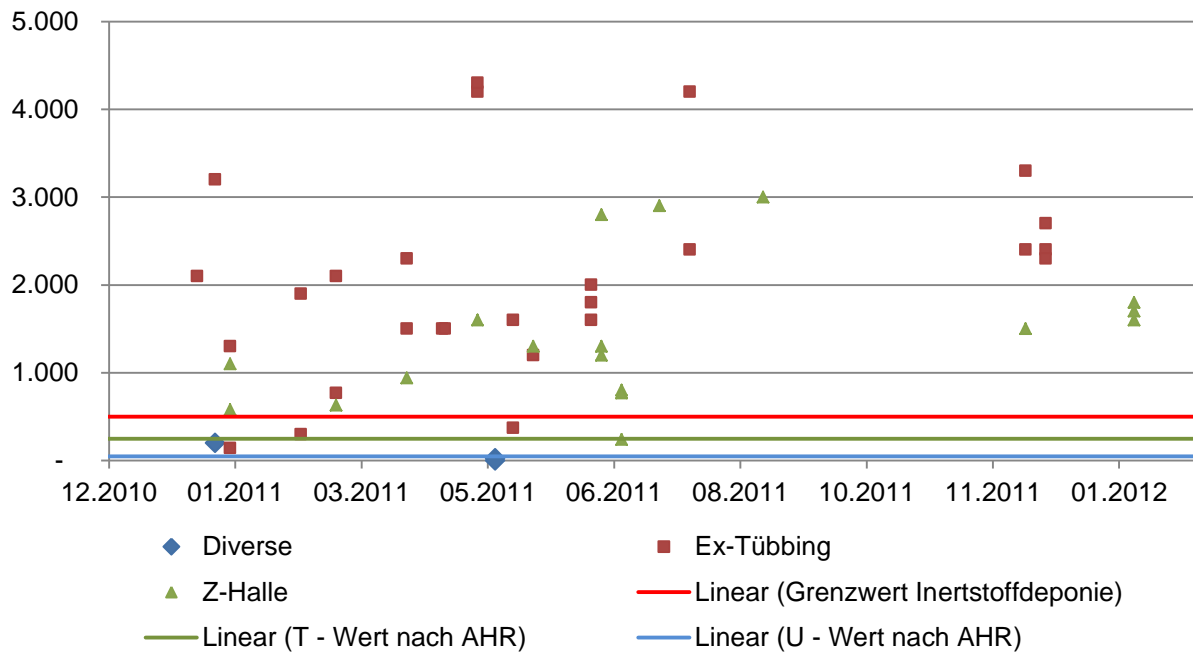


Abbildung 30: KW inkl. Deponiegrenzwerten 2011

Abbildung 30 verdeutlicht, dass die Messwerte die einzelnen Deponiegrenzwerte überschreiten. Eine mögliche Erklärung für den erhöhten Medianwert im Vergleich zum in Kapitel 4.7.1 betrachteten Zeitraum der Jahre 2008-2011 sind die Demontearbeiten der Tunnelbohrmaschinen sowie der Würmer, bei denen Flüssigkeiten ausgetreten sind.

#### 4.8 Die zur Verfügung stehenden Deponien

Laut der 2011 aktualisierten Auflage der Technischen Verordnung (TVA, 2011) dürfen Inertstoffdeponien Materialien annehmen, die mit bis zu 500 mg/kg Kohlenwasserstoff verunreinigt sind. Stoffe die mit bis zu 2000 mg/kg verunreinigt sind werden auf Reststoffdeponien entsorgt. Materialien bis zu einer Konzentration von 5000 mg/kg dürfen in der Schweiz auf Reaktordeponien gelagert werden. Darüber hinaus müssen verunreinigte Stoffe einer konzentrationssenkenden Behandlung unterzogen werden. Die Mengenangaben beziehen sich auf einen getrockneten Stoff.

In unmittelbarer Nähe zu Bodio, befinden sich drei Deponien zu denen der Schlamm je nach Kontaminierung transportiert wird. Des Weiteren stehen noch zwei weitere Anlagen für hochbelastete Schlämme zur Verfügung (Tabelle 5: zur Verfügung stehende Deponien)

Tabelle 5: zur Verfügung stehende Deponien

mg/kg	KW < 500	500 < KW < 2000	2000 < KW < 5000	KW > 15000
Deponie	Spineda / Personico	CRER	Reaktordeponie (CH)	Reaktordeponie (NL)

## 4.9 Deponieannahmekosten

Da die Wahl der Deponien von der Belastung des Schlammes abhängt, haben diese auch je nach Typ verschieden hohe Entsorgungskosten. Zu den Deponierungskosten kommen zusätzlich noch die Transportkosten, welche sich aus Fahrzeit und Kilometer zusammensetzen, hinzu.

Tabelle 6: Deponiekosten des Jahres 2011

	Personico	Spineda	CRER	Reaktordeponie	Reaktordeponie
	KW < 500 mg/kg	KW < 500 mg/kg	500 < KW mg/kg < 2000	2000 < KW mg/kg < 5000	KW > 15000 mg/kg
CHF/to	21.5	31.0	117.0	129.0	225.0
Deponierte Masse	3 %	75 %	18 %	3 %	1 %
Transport und Deponierungskosten	1 %	45 %	41 %	7 %	6 %

Tabelle 6 veranschaulicht die Deponierungskosten pro Tonne, die deponierte Masse und die daraus sich ergebenden Deponierungskosten für das Jahr 2011. Demnach wurden 26'036 to abtransportiert, welche eine Summe von 1.361.268 CHF zur Folge hatten. Aufgrund des Erreichens der Kapazitätsgrenze der Personico Deponie, wurde im Laufe des Jahres damit begonnen, mehr Schlamm auf der Spineda Deponie zu entsorgen.

### Deponierte Massen

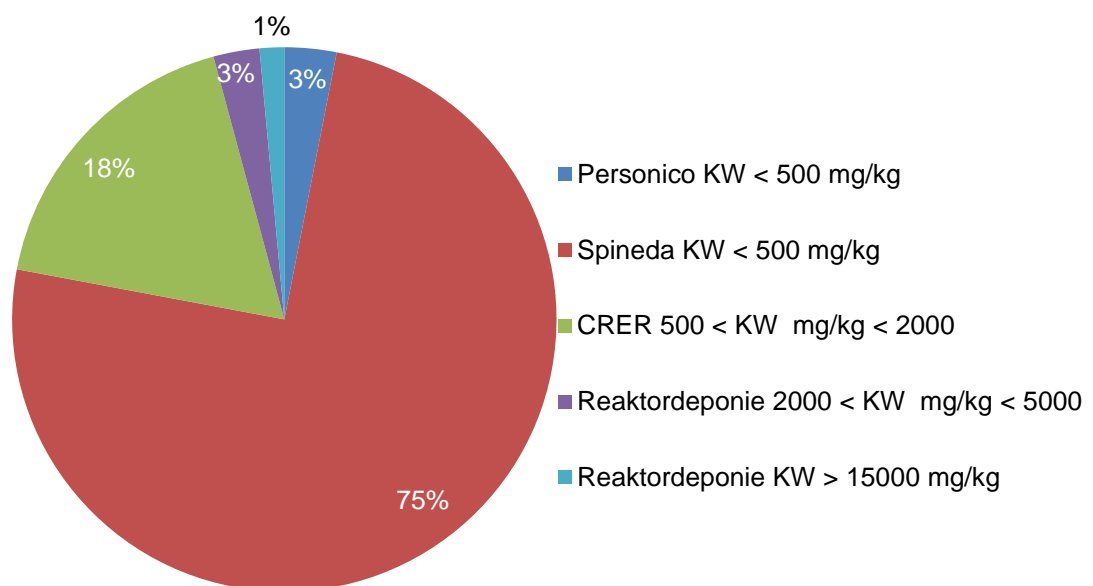


Abbildung 31: Deponierte Massen im Jahr 2011

## Transport- und Deponierungskosten

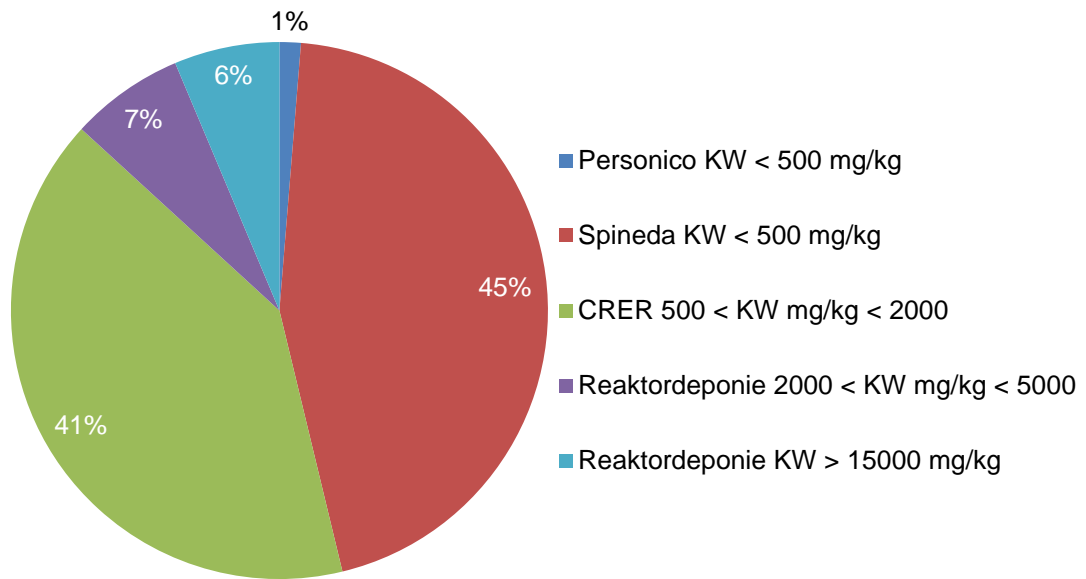


Abbildung 32: Gesamtkosten für das Jahr 2011

Die Abbildungen 31 und 32 veranschaulichen die in Tabelle 6 ermittelten Massen und deren Entsorgungskosten. Dabei fällt auf, dass 75 % der Massen auf der Spineda-Deponie abgelagert wurden, diese Masse jedoch nur 45 % der Gesamtkosten ausmachte. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die 18 % in der CRER Deponie abgelagerten Deponiemassen 41 % der Gesamtkosten betragen. Dies ist unter anderem auf den Tonnenpreis zurückzuführen, welcher auf Grund der längeren Transportstrecke nicht als Pauschalpreis angegeben wird, sondern sich aus folgendem Kostensatz ergibt.

- Deponiegebühr: 105 CHF/t
- Transportkosten Zeit: 115 CHF/h
- Kilometerpreis: 0.9 CHF

Durchschnittlich benötigt der Fahrer für die Strecke von 45 km in eine Richtung eine Stunde, wobei er laut Aufzeichnungen im Schnitt 25 Tsd. Tonnen transportiert. Somit ergibt sich ein Transportpreis von 12 CHF/to und ein Deponierungspreis von 117 CHF/to.

#### 4.10 Festgestellte Diskrepanz LKW

Aufgrund der Tatsache, dass auf den Deponiescheinen bei jedem LKW dasselbe Gewicht eingetragen ist, wurde am 8. September ein LKW auf der sich in Bodio befindenden Waage gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass das Leergewicht vom im Deponieschein angegebenen Leergewicht um 260 kg abweicht. Bei der Leermessung ist jedoch aufgefallen, dass der Fahrer neben der Waage stand, bei der zweiten Messung (incl. Material) aber im Fahrerhaus saß. Es wurde beobachtet, dass das Leergewicht des LKW 15260 kg, mit Fahrer jedoch 15400 kg gewogen hat. In den Deponiescheinen wurde aber ein Leergewicht von 15020 kg eingetragen. Somit beträgt die Abweichung 380 kg.


Lotto GM 506 Bodio		<b>Valscura SA</b> Via Chiasso 4 6710 Biasca Telefono 091 / 862 33 22 • Fax 091 / 862 42 20	
Targa veicolo ti 219477		<input type="checkbox"/> Pagato Fr. <input type="checkbox"/> Da fatturare	
Cod e Anagrafica C11/For 12 Beffa R. SA		Data 08/09/11 Ora 16:04:36	
Cod e Descrizione Materiale 65 FANGO TEM		Progressivo 7676	
----- USCITA -----		Rich. 1.Peso 15020 kg	
Data : 08-09-2011	Ora : 15:35	2.Peso 34880 kg	
P.E. :	N° : 005155	<b>NETTO PESATA 19060 kg</b>	
1°Peso PT 15260 kg			
2°Peso 34720 kg			
Netto U 19460 kg			
Gewicht Fahrer: 140kg		Cliente <i>Cons. Tat. Pollegio</i> Cantiere <i>Lotto 532</i> Targa veicolo <i>Ti 219477</i> Trasportatore <i>Beffa</i> Note <i>Resi beton Est. Tubi Box 1</i>	
		Valscura SA, Il cliente, firma 	
La <b>Valscura SA</b> declina ogni responsabilità dei dati forniti dal cliente, in special modo della tara. <input type="checkbox"/> Tara fornita <input type="checkbox"/> Tara pesata			

Abbildung 33: Vergleich Waage Bodio mit Waage Deponie

Ein Vergleich der in Abbildung 33 dargestellten Nettogewichte der baustelleneigenen- sowie der Deponiewaage ergibt eine weitere Erhöhung der Diskrepanz um zusätzliche 20 kg.

Aufgrund der Tatsache, dass nur eine Kontrollmessung stattgefunden hat, wird darauf verwiesen, dass die Abweichungen der Messungen Zufall sein könnten und nicht unbedingt der Regel entsprechen müssen. Dennoch gilt zu erwähnen, dass eine Abweichung von 400 kg pro Fahrt über die gesamte Anzahl der Transporte zu erheblichen Mehrkosten führen kann, weshalb Kontrollmessungen an zufällig gewählten Tagen durchgeführt werden sollten.

## 5 Schlammanalyse bezüglich Materialkennwerten

### 5.1 Allgemeines

Damit eine baustellenspezifische Aussage über den Schlamm gemacht werden kann, wird der Schlamm an folgenden Stellen entnommen:

- Wurm
- Während der Saugzugarbeiten
- In der Z-Halle

Zur Bestimmung der Materialkennwerte sind eine genaue Waage (Auflösung im Grammbereich) und ein Messgefäß erforderlich. Der Schlamm wird in das Gefäß, von welchem das Gewicht (Tara) bekannt ist, gefüllt und gewogen, wobei das Ergebnis als Nassgewicht definiert wird. Zudem wird das Volumen des Schlammes abgelesen. Die Subtraktion der Tara vom Nassgewicht mit anschließender Division durch das Volumen ergibt die Nassdichte. Der Feuchtgehalt ergibt sich durch eine mindestens 12 Stunden lange Trocknung des Schlammes in einem 120 °C warmen Ofen, wobei noch folgende Schritte durchgeführt werden müssen. Das Gewicht des trockenen Schlammes wird gewogen und als Trockengewicht angegeben. Die Differenz ist als Subtraktion des Trockengewichtes vom Nassgewicht definiert. Um den Feuchtegehalt zu erhalten, wird die Differenz durch die Differenz des Trockengewichtes und der Tara dividiert.

$$f = \frac{\text{Nassgewicht} - \text{Trockengewicht}}{\text{Trockengewicht} - \text{Tara}} \quad \rho_{\text{nass}} = \frac{\text{Nassgewicht} - \text{Tara}}{\text{Volumen}}$$

### 5.2 Schlammproben

#### 5.2.1 Probeentnahme beim Wurm

Tabelle 7: Schlamm im Bereich des Wurmes

Probeentnahmestelle	Wurm	
Datum	28.08.2011	
Volumen	2000	ml
Tara	4148	g
Bruttogewicht	6925	g
Nettogewicht	5452	g
Differenz	1473	g
Nassdichte	1,39	to/m <sup>3</sup>
Feuchtigkeitsgehalt	113	%

In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass der Schlamm unterhalb der Arbeitsbühnen sehr flüssig war. Der berechnete Feuchtigkeitsgehalt von ca. 113 % bestätigte diesen

Eindruck. Erwartungsgemäß wies die Probe mit  $1.39 \text{ to/m}^3$  den niedrigsten Wert unter den analysierten Proben auf.

### 5.2.2 Probeentnahme im Bereich des Saugzuges

Wie bereits im Kapitel 4.3.2 erwähnt worden ist, wird der bereits getrocknete Schlamm wieder verflüssigt, um eine Aufsaugung zu ermöglichen. Während dieser Arbeiten, im Bereich des Saugzuges, wurde eine Probe entnommen.

Durch eine Analyse konnten folgende Werte erhalten werden.

Tabelle 8: Schlammanalyse Saugzug

Probeentnahmestelle	Saugzug	
Datum	28.08.2011	
Volumen	500	ml
Tara	1860	g
Bruttogewicht	2616	g
Nettogewicht	2271	g
Differenz	345	g
Nassdichte	1,51	$\text{to/m}^3$
Feuchtigkeitsgehalt	84	%

Die in Tabelle 8 berechnete Nassdichte beträgt  $1.51 \text{ to/m}^3$  und ist nahezu ident mit dem zurzeit (Stand Dezember 2012) verwendeten Dichtefaktor, welcher  $1,52 \text{ to/m}^3$  beträgt.

### 5.2.3 Probeentnahme in der Z-Halle / Ex-Tübbing

Eine Schlammprobe wurde am 27.08.2011 aus einer ausgeschaukelten Box entnommen. Die ausgeschaukelte Box hat den Vorteil, dass sie quasi einen Schnitt durch die Schlammmasse darstellt (siehe Abbildung 34: Querschnitt Schlammbox). Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl nasser (in Bodennähe), feuchter (in der Mitte des Schlammhaufens), als auch trockener Schlamm (von der Oberfläche) entnommen wurde. Die entnommen Mengen wurden proportional der erwarteten Feuchtigkeitsverteilung des Schlammes angepasst.



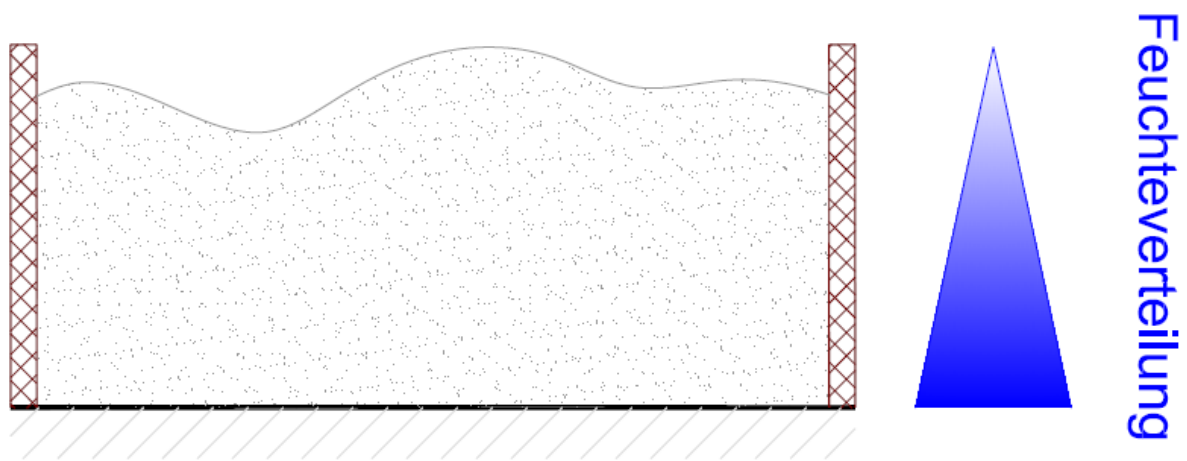


Abbildung 34: Querschnitt Schlammbox (Kuc)

In weiterer Folge wurde der Schlamm in einen Messbecher mit einem Volumen von 500 ml gefüllt und mit der Hand leicht verdichtet. Ziel dieser Verdichtung ist die Vermeidung von Hohlräumen, um einerseits die Selbstverdichtung zu simulieren und andererseits eine möglichst hohe Rohdichte zu erhalten. Die Ergebnisse sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Schlammanalyse Z-Halle

Probeentnahmestelle	Z-Halle	
Datum	27.08.2011	
Volumen	500	ml
Tara	1239	g
Bruttogewicht	2092	g
Nettogewicht	1801	g
Differenz	291	g
Nassdichte	1,71	to/m <sup>3</sup>
Feuchtigkeitsgehalt	52	%

## 5.3 Proctorversuch

Definition: **Proctordichte** gibt den optimalen Wassergehalt für die maximale Verdichtung von Bodenproben an (Wissenschaften, 2012). Dabei muss aber Verdichtungsarbeit geleistet werden (nach Ralph R. Proctor). Anzumerken ist, dass für einen Proctorversuch nach DIN 1827 nicht die geeigneten Mitteln zur Verfügung standen, weshalb der Versuch nicht normkonform durchgeführt werden konnte.

### 5.3.1 Versuchsdurchführung

In ein Messgefäß, in welchem das Volumen abgelesen werden kann, wird ein im Ofen getrocknetes Material eingefüllt. Nach der ersten Wägung und der darauffolgenden Zugabe von Wasser wird das Gefäß mehrmals entlang seiner vertikalen Achse gegen eine feste Unterlage gestoßen.

Nach dieser Verdichtungsarbeit werden das Gewicht, sowie das Volumen der Probe gemessen. Theoretisch steigt die Masse an, während aufgrund der Verdichtung das Volumen abnimmt. Dies ist damit zu erklären, dass das Wasser die Poren ausfüllt und die einzelnen Körner benetzt. Bei einem gewissen Feuchtegehalt wird das Maximum der Dichte erreicht (jedoch ist diese Dichte nicht grundsätzlich mit der höchsten Dichte, welche das Material einnehmen kann, zu verwechseln).

Wird der Probe weiteres Wasser zugegeben nimmt das Volumen zu, während gleichzeitig die Dichte gegen die Wasserdichte von  $1 \text{ m}^3/\text{t}$  konvergiert.

### 5.3.2 Versuchsergebnisse

Schlamm, welcher an mehreren Tagen aus BOX C vor der Z-Halle entnommen worden ist, wurde nach der Trocknung in mehrere Proben aufgeteilt. Bei diesen Teilproben wurde der Proctordichteverlauf ermittelt, um aufzuzeigen, dass innerhalb einer Schlammmenge aufgrund der verschiedenen Anteile der Zuschlagstoffe, unterschiedliche Verläufe zustande kommen. Die einzelnen Probenergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 10 und Abbildung 35 veranschaulichen den aus jeweils 4 Proben ermittelten Mittelwert der Proctordichte.

Tabelle 10: Ergebnisse des Proctorversuches

Feuchte	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittelwert
%	to/m <sup>3</sup>	to/m <sup>3</sup>	to/m <sup>3</sup>	to/m <sup>3</sup>	to/m <sup>3</sup>
0	1,29	1,29	1,32	1,29	1,30
10	1,46	1,46	1,46	1,43	1,45
20	1,68	1,62	1,62	1,57	1,62
30	1,73	1,71	1,78	1,71	1,73
40	1,61	1,71	1,81	1,79	1,73
50	1,52	1,65	1,75	1,80	1,68
60	1,46	1,60	1,62	1,70	1,59
70	1,39	1,56	1,49	1,59	1,51
80	1,34	1,51	1,46	1,50	1,45
90	1,29	1,47	1,43	1,45	1,41

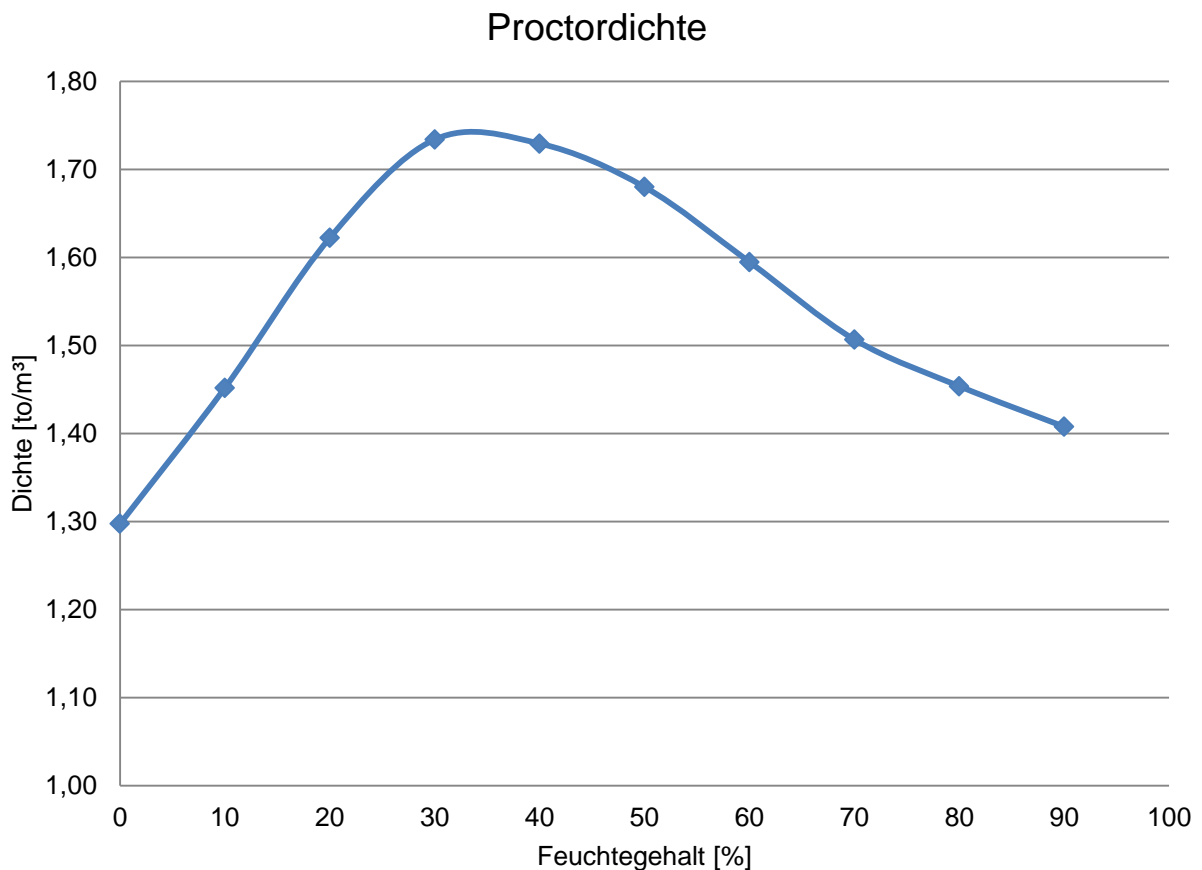


Abbildung 35: Graphische Darstellung der Proctordichte

Die Versuchsauswertung zeigt einen schönen Verlauf der Proctordichte, welcher in drei Abschnitte eingeteilt werden kann. Der erste Abschnitt ist durch den linearen Anstieg der Dichte in Relation zur Feuchte definiert. Der zweite Bereich ist mit einem Nachlassen des linearen Anstieges, dem Erreichen des höchsten Dichtewertes, welcher 1,73 to/m<sup>3</sup> beträgt und einer anschließenden Abnahme der Dichte definiert. Im dritten Bereich sinkt die Proctordichte mit zunehmendem Wassergehalt.

## 5.4 Verifizierung der Dichte

Anhand zahlreicher Lieferscheine des regionalen Transportunternehmens<sup>9</sup> der Monate Juni, Juli und August wurde die Summe des abtransportierten Schlammes und die Anzahl der dazu benötigten LKWs ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass unterschiedliche LKW-Typen mit verschiedenen hohen Ladevolumen eingesetzt wurden.

Tabelle 11: Berechnung von LKW-Einheiten

	m <sup>3</sup>	#	Anteil	LKW-E
LKW Typ	11	199	75,4%	199
	14	51	24,6%	65

Tabelle 11 veranschaulicht, dass 199 11-m<sup>3</sup> und 51 14-m<sup>3</sup> LKW eine Gesamtmasse von 4274 Tonnen im Zeitraum Juni bis August abtransportiert haben. An dieser Stelle wird, um die weitere Rechnung zu vereinfachen, eine LKW Einheit (LKW-E) definiert. Eine LKW-E ist ein 11 m<sup>3</sup> LKW. Demnach sind ein 14 m<sup>3</sup> LKW 1,273 LKW Einheiten. Dies ergibt wiederum, dass 51 14 to LKW 65 LKW-E ergeben.

Tabelle 12: Verifizierung der Dichte

LKW-E	Gesamtmasse	Realvolumen	Dichte
#	to	m <sup>3</sup>	to/m <sup>3</sup>
264	4.274	9,5	1,70

In weiterer Folge wird ein reales Volumen (Realvol.) definiert. Nach Absprache mit dem Logistik-Abteilungsleiter wird die Abweichung vom maximalen Ladevolumen einer LKW-Einheit mit 1,5 m<sup>3</sup> angenommen. Somit ergeben sich für das Realvol. 9,5 m<sup>3</sup>. Durch Division der Gesamtmasse mit dem realen Volumen und der Anzahl der LKW-E ergibt sich eine Dichte von 1,70 to/m<sup>3</sup> (Tabelle 12). Diese Dichte weicht somit von der ermittelten Proctordichte um 30 kg (-1,7 %) geringfügig ab. Anzumerken ist aber, dass die Proctordichte unter Verdichtungsarbeit ermittelt worden ist, weshalb die Abweichung durchaus gerechtfertigt ist.

<sup>9</sup> Transporte zur Spineda Deponie

## 5.5 Siebkurve

Vollständigkeitshalber wurde eine Siebanalyse des für die Proctorversuche benötigten Materials durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tabelle 13 sowie Abbildung 36 dargestellt. Das Größtkorn wird auf 16 mm geschätzt.

Tabelle 13: Siebdurchgang

Siebweite in mm	Sieb- boden	0.063	0.09	0.125	0.25	0.5	1	1.4	2	2.8	16
Rückstand in g	70	76	112	274	227	275	164	191	189	691	0
Rückstand in %	3%	3%	5%	12%	10%	12%	7%	8%	8%	30%	0%
Durchgang in %	0%	3%	6%	11%	23%	33%	46%	53%	61%	70%	100%

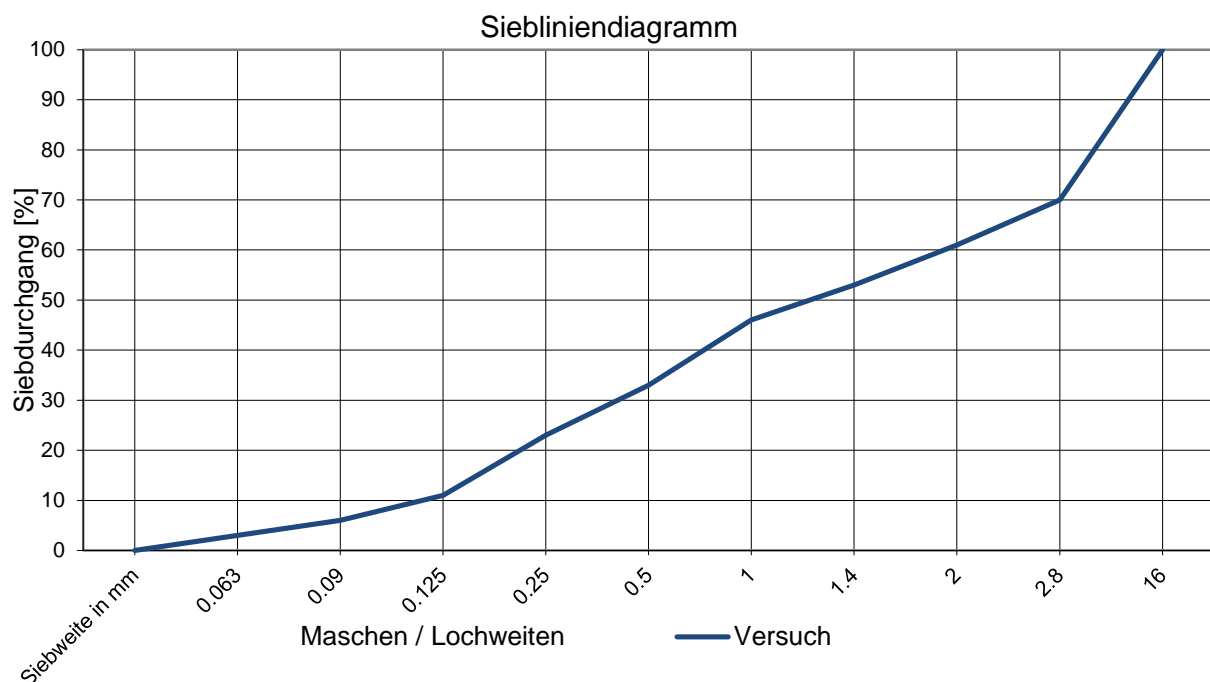


Abbildung 36: Siebkurve

Zu beachten ist, dass knapp 50 Massenprozent über 1 mm liegen. Aufgrund des im Betonlabor in Bodio beschränkten Siebaufbaus, kann eine genauere Analyse über 2,8 mm Siebdurchmesser nicht erfolgen. Jedoch zeigt sich, dass über 30 Massenprozent des Materials einen Durchmesser über 2,8 mm haben.

## 5.6 Vergleich Proctordichte mit Z-Halle Material

Die aus mehreren Proben, welche in der Z-Halle gezogen worden sind, ermittelten Durchschnittswerte ergaben folgende Zahlen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Durchschnittswerte des Z-Hallen-Schlammes

Nassdichte	Feuchtegehalt	Trockendichte
to/m <sup>3</sup>	%	to/m <sup>3</sup>
1,71	51	1,23

Demnach beträgt die Nassdichte 1,71 to/m<sup>3</sup> und weicht um nur 100 kg von der in Kapitel 5.4 verifizierten Dichte (1,70 to/m<sup>3</sup>) ab. In den folgenden Berechnungen wird mit einer Dichte von 1,71 to/m<sup>3</sup> gerechnet.

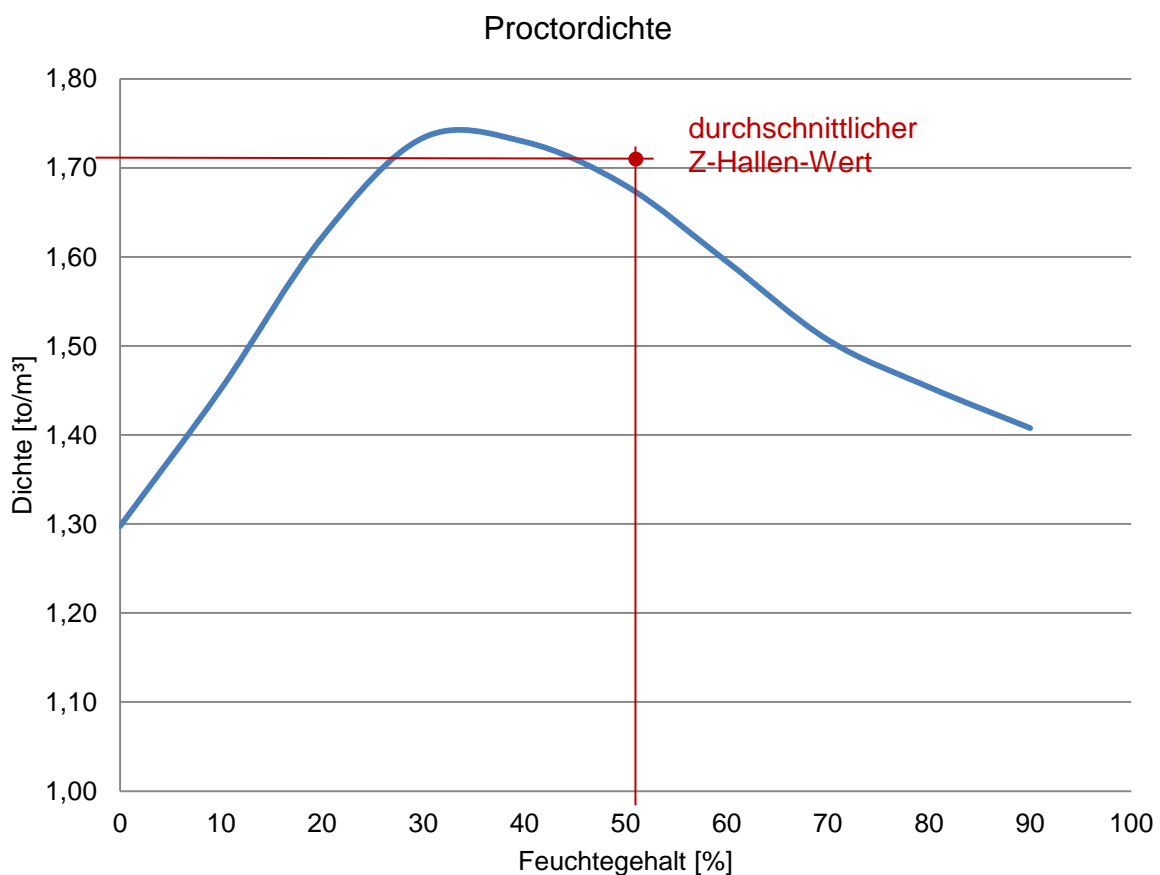


Abbildung 37: Proctordichte + Z-Hallen-Wert

Aus dem obigen Diagramm ist zu erkennen, dass sich das Material in der Z-Halle im sehr nassen und bereits abfallenden Bereich der Proctordichteverlaufskurve befindet. Als Schlussfolgerung kann gezogen werden, dass der abtransportierte Schlamm eine sehr hohe Dichte aufweist, welche nahe an der maximal ermittelten Proctordichte liegt. Des Weiteren wirkt sich der hohe Feuchtegehalt auch ungünstig auf das Volumen aus, weshalb nicht nur nasser Schlamm abtransportiert wird, sondern auch relativ viel Wasser abtransportiert werden muss und dadurch die LKWs öfters fahren müssen.

## 5.7 Atmosphärische Einflüsse auf den Schlamm

Wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt wurde, befinden sich nicht alle Boxen in der überdachten Halle, weshalb an dieser Stelle atmosphärische Einflüsse auf den Schlamm abgeschätzt werden.



Abbildung 38: Messstation und Portal Süd

Da direkt auf dem Baustellengelände keine Wetterstation installiert ist, wurden Daten aus der nächstgelegenen Station verwendet. Diese befindet sich in Osogna und ist lediglich 5 km Luftlinie von der Baustelle entfernt (Abbildung 38). Obwohl innerhalb eines Radius von 5 km große Niederschlagsschwankungen auftreten können, sind die verwendeten Daten repräsentativ, da es sich um eine Auswertung handelt, die sich über einen langen Zeitraum von mehreren Monaten erstreckt hat und außerdem die Schwankungen innerhalb des Tals aufgrund der umgebenden hohen Berge deutlich geringer ausfallen, als es ansonsten im Flachland der Fall ist.

### 5.7.1 Suche nach einem Zusammenhang zwischen Schlammmasse und Niederschlag.

Jänner - September 2011

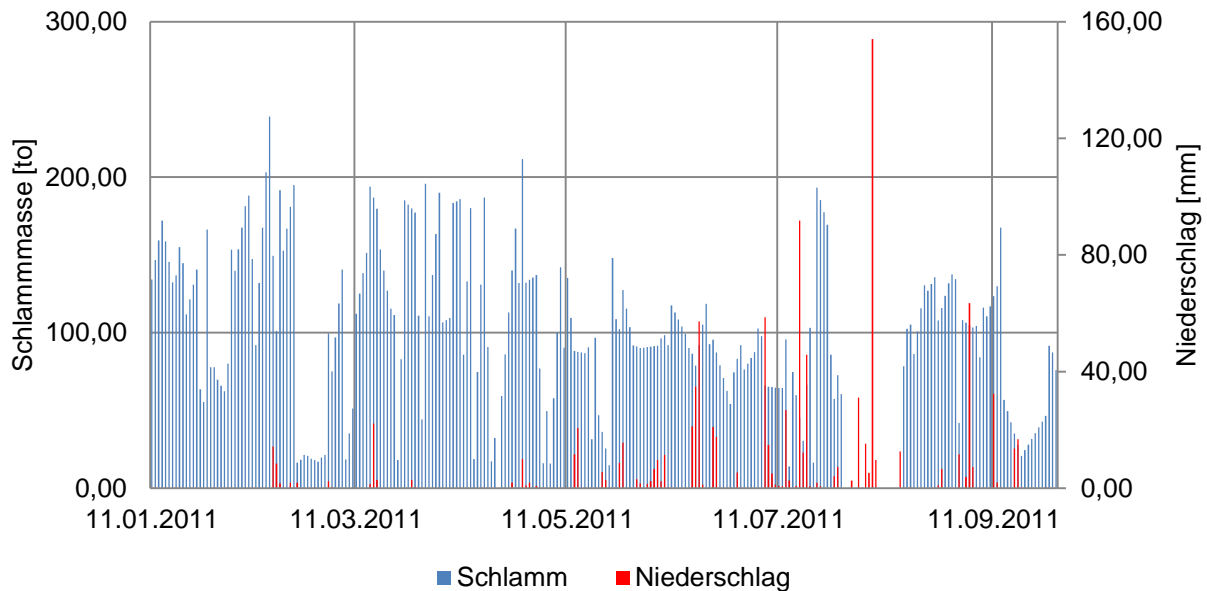


Abbildung 39: Schlammmasse und Niederschlag

Abbildung 39 veranschaulicht die abtransportierte Schlammmenge und den Niederschlag im Zeitraum von Jänner bis September 2011. Traditionell werden im Tessin im August zwei Wochen Betriebsferien gemacht, was auch in der Grafik aufgrund der nicht abtransportierten Masse zu sehen ist. Zu erkennen sind in der Abbildung extreme Schwankungen, die eine triviale Aussage, dass der Niederschlag einen hohen Einfluss auf die abtransportierte Masse hat, nicht zulassen. Die folgenden Abbildungen zeigen jedoch Tage, an denen die abtransportierte Schlammmasse nach oder während eines Regenereignisses tatsächlich zugenommen hat. Ob diese Zunahmen zufällig stattgefunden haben oder tatsächlich in einem Zusammenhang zum Niederschlag stehen, ist Teil dieser Untersuchung.



23.4 - 4.04.2011

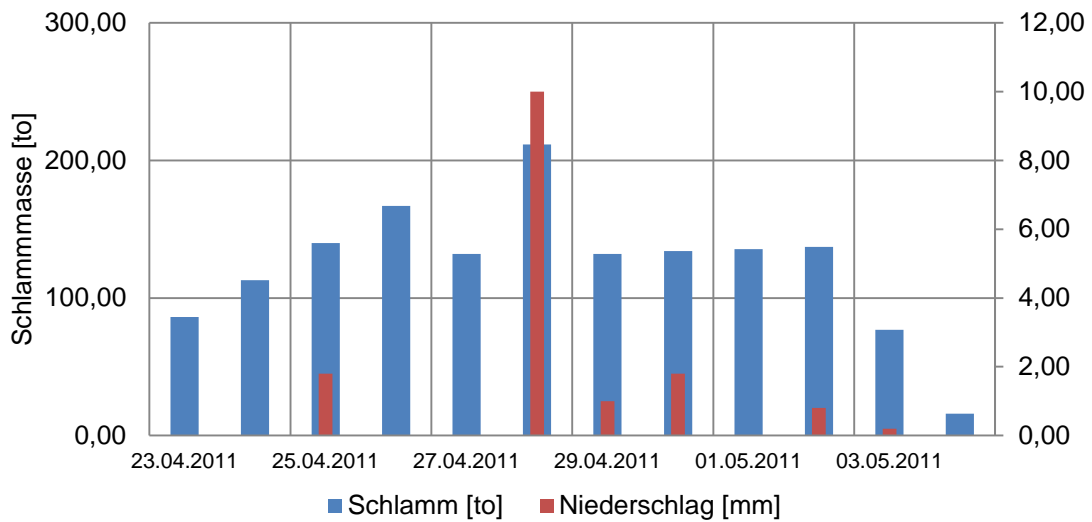


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 1

In Abbildung 40 ist deutlich zu erkennen, dass in der gleichen Zeit, in welcher ein Niederschlag stattgefunden hat, ein Anstieg der abtransportierten Schlammmasse zu beobachten gewesen ist.

25.05 - 30.05.2011

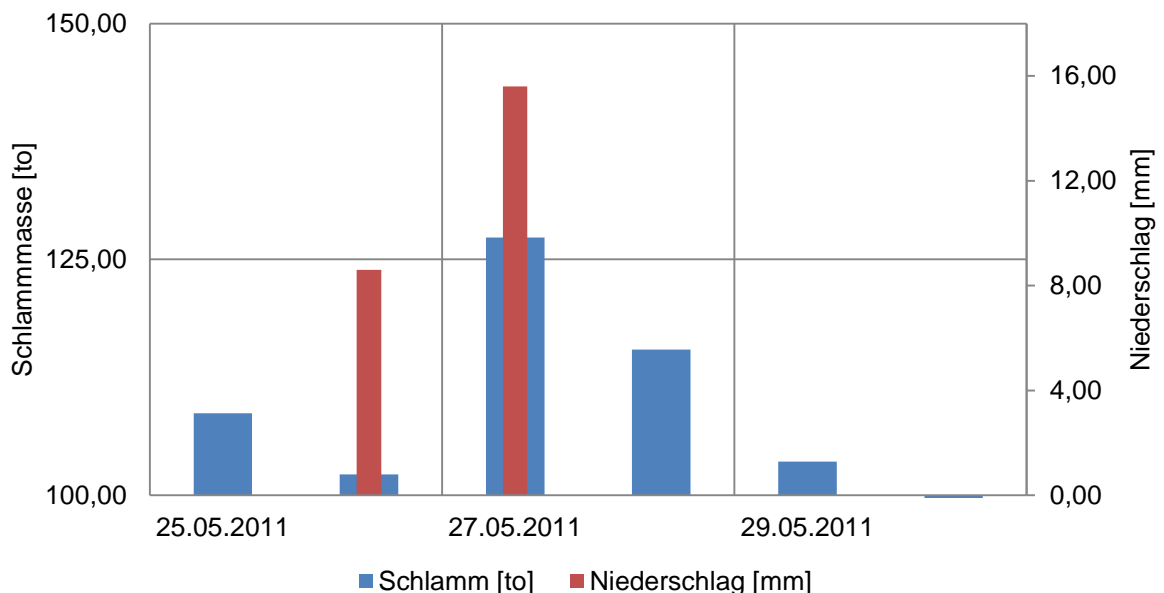


Abbildung 41: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 2

Auch Abbildung 41 zeigt einen Anstieg der Schlammmasse aufgrund eines Regenereignisses.

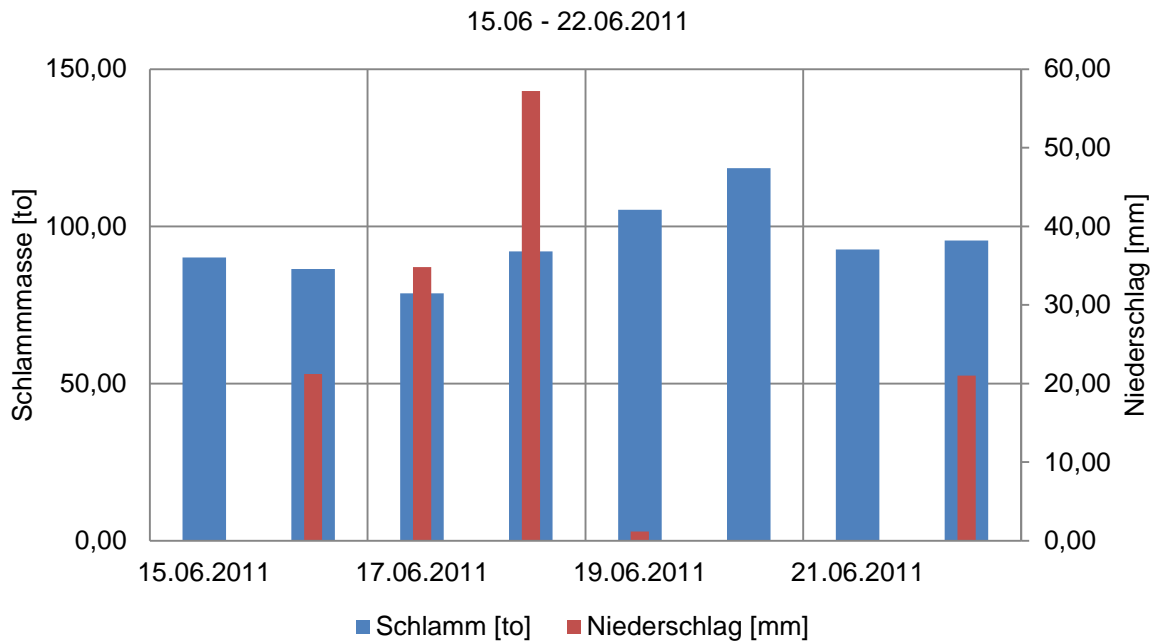


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 3

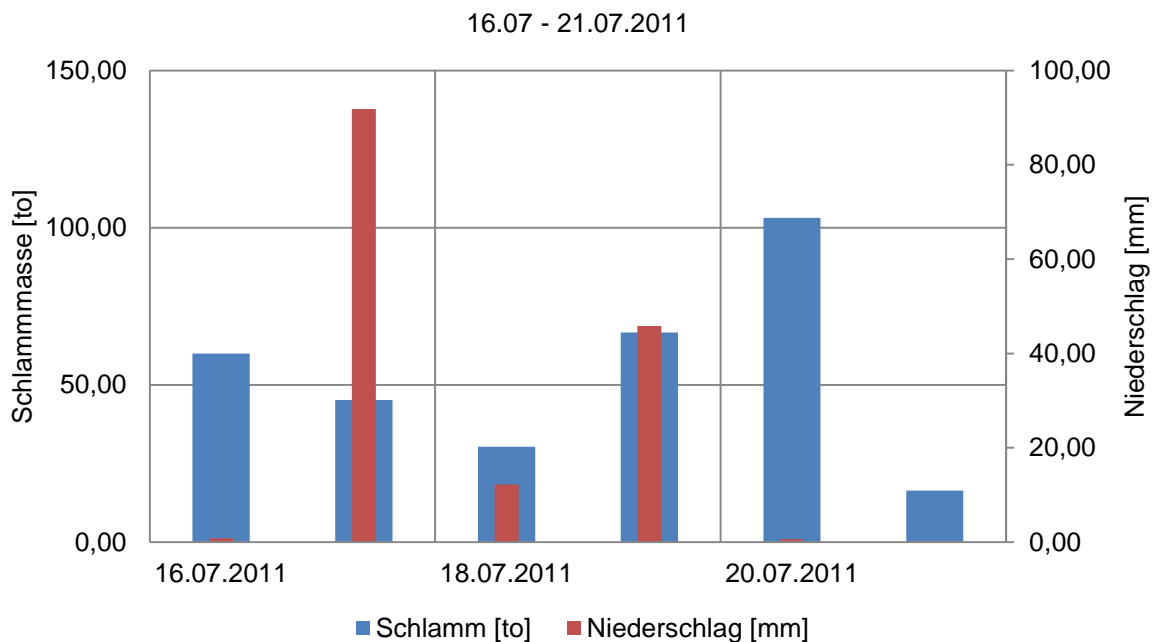


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 4

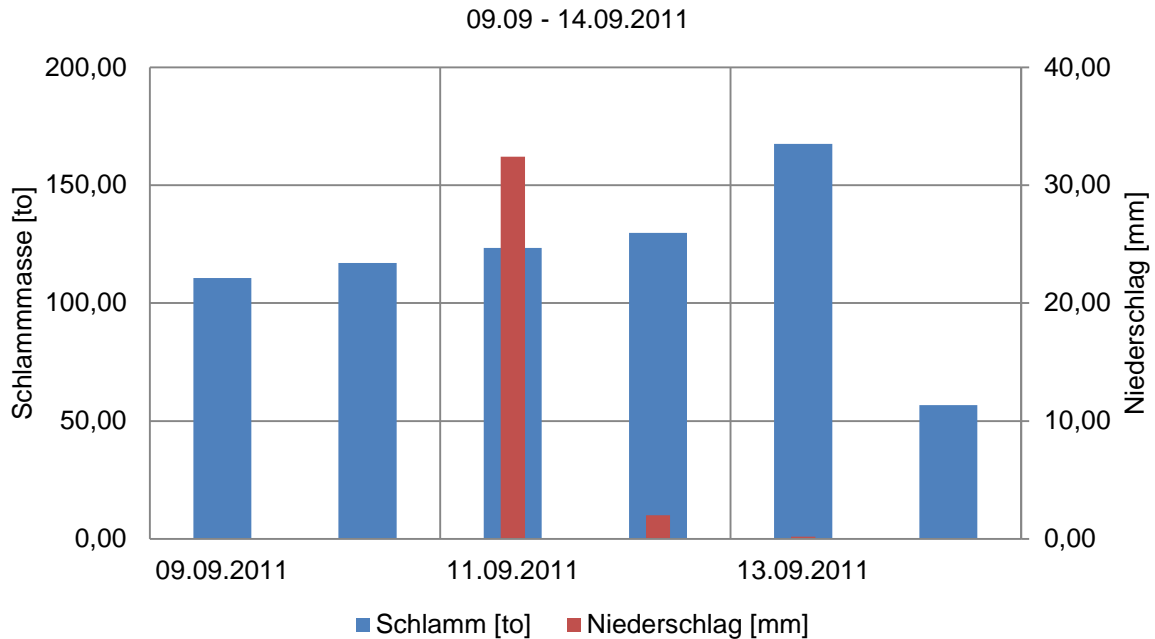


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 5

Die Abbildungen 42, 43 und 44 zeigen einen verzögerten Anstieg der Schlammmasse nach einem Regenereignis. Dies könnte durch das Durchsickern und somit mit dem Eindringen des Wassers in den Schlammhaufen zu erklären sein.

### 5.7.2 Teilfazit

Aufgrund der starken Schwankungen, verursacht durch unregelmäßige Transporte mit unterschiedlich vielen LKWs pro Arbeitstag, kann an dieser Stelle kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Schlammmasse und Niederschlag festgestellt werden. Anders würde es aussehen, wenn pro Arbeitstag immer das gleiche Volumen abtransportiert werden würde. Deshalb wird in Kapitel 5.8 der theoretische Einfluss des Regenwassers auf den Schlamm abgeschätzt.

## 5.8 Maximaler Regenwassereinfluss auf die Schlammmasse

In diesem Kapitel werden die zusätzlichen Mengen und Kosten abgeschätzt, die aufgrund des Niederschlages im Zeitraum Jänner bis September 2011 entstanden sind. Die Kosten werden auf die einzelnen Deponien aufgeteilt, wobei der im Kapitel 4.9 in Tabelle 6 ermittelte Verteilungsschlüssel Anwendung findet.

### 5.8.1 Niederschlag, Verdunstung und Differenz aus beiden Größen

Summe Niederschlag

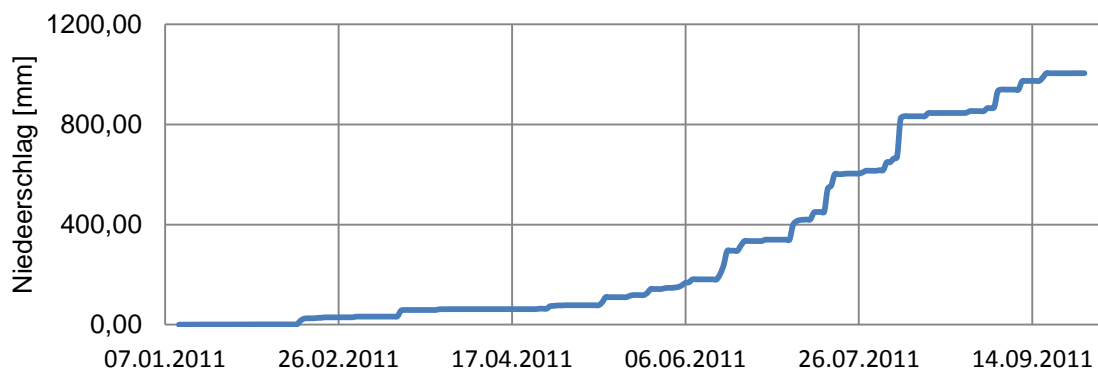


Abbildung 45: Summe Niederschlag Jan-Sep. 2011

Abbildung 45 zeigt die Summenganglinie des Niederschlages im Zeitraum Januar bis zum 29. September 2011. Bis einschließlich des letzten Messtages sind 1005 mm, bzw. 1005 Liter pro Quadratmeter Wasser gefallen. Eine Multiplikation dieses Wertes mit der Fläche einer BOX ergibt demnach die zusätzliche durch Niederschlag entstandene und damit abzutransportierende Wassermenge.

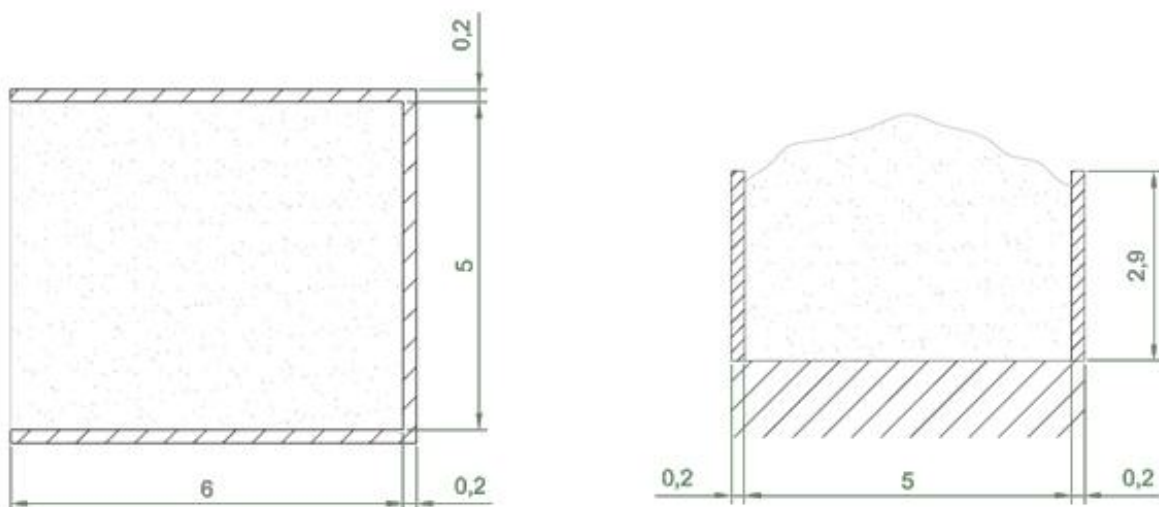


Abbildung 46: Ansichten einer Standard BOX

Abbildung 46 veranschaulicht sowohl den Grundriss als auch einen Schnitt durch die Box. Mit Hilfe des Schnitts ist die ungefähre Verteilung des Schlammes zu erkennen.

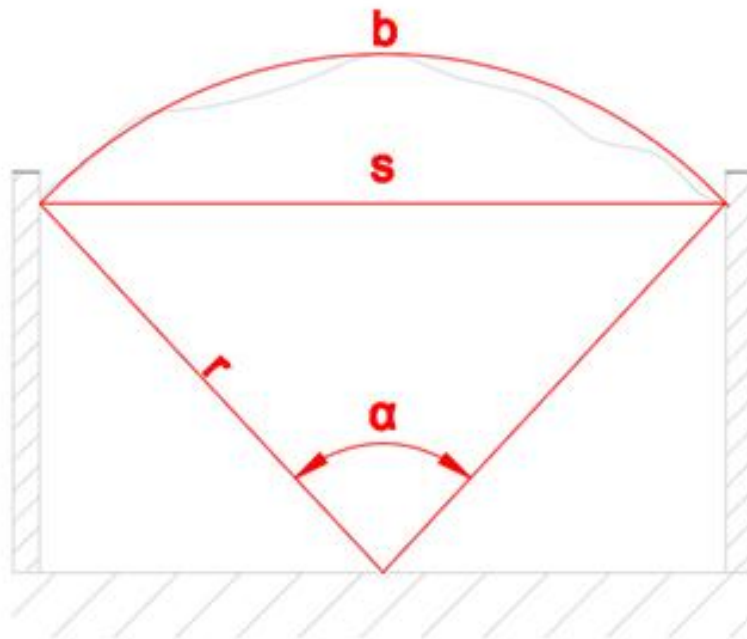


Abbildung 47: Modellierung der Oberfläche

Mit Hilfe des Kreissegmentes kann die Oberfläche des Schlammes, wie in Abbildung 47 dargestellt, sehr gut nachgebildet werden. Allerdings wird für die Berechnung des Niederschlages die Boxengrundfläche und nicht die benetzbare Schlammfläche verwendet.

### 5.8.2 Berechnung der zusätzlichen Transport- und Deponierungskosten.

In Bodio befinden sich im Freien 8 Boxen mit den Abmessungen von 6 x 5 x 2.90 m und jeweils eine Box mit 12 x 5 x 2 m bzw. 12 x 10 x 2 m. Demnach ergibt sich eine Grundfläche von 420 m<sup>2</sup>.

Tabelle 15: Zusatzkosten durch Niederschlag

	%-Anteil an Gesamtmasse	to	CHF/to	CHF
Personico	3	13	21.5	271
Spineda	75	315	31	9.765
CRER	18	76	117	8.845
Reaktordeponie	4	17	153	2.570
Gesamt	100	420	51	21.452

Damit ergeben sich, wie Tabelle 15 verdeutlicht, zusätzliche Kosten von 21.452 CHF für den Zeitraum Jänner bis September 2011. In Relation zu den im selben Zeitraum aufgetretenen Deponierungs- und Transportkosten, betragen die durch das Regenwasser zusätzlich entstandenen Kosten 2,1 %.

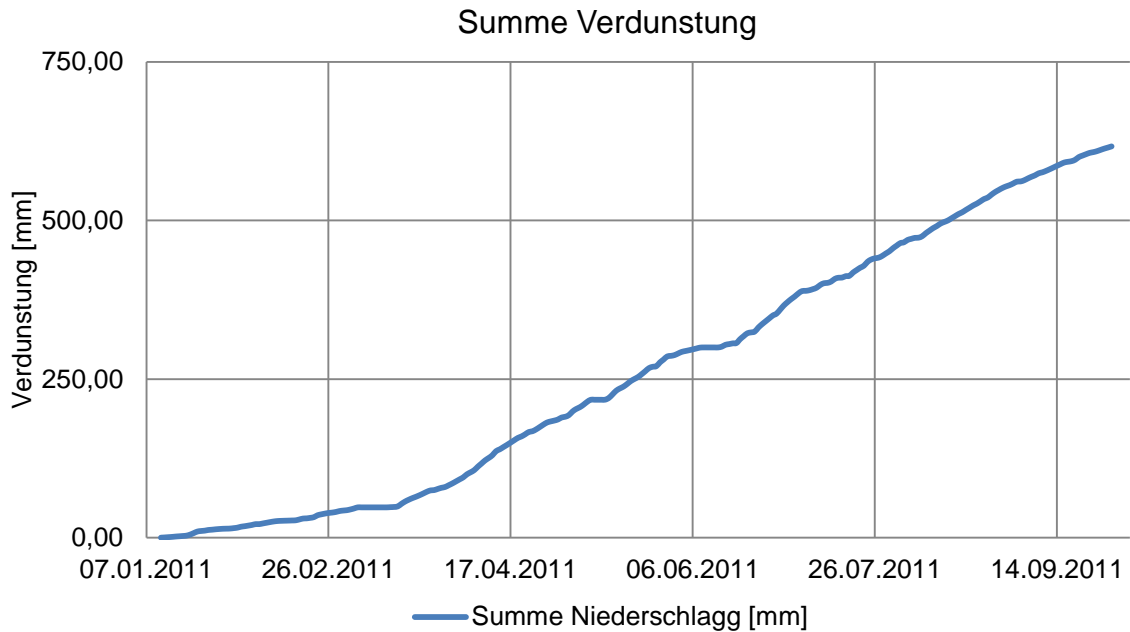


Abbildung 48: Summe Verdunstung Jan-Sep. 2011

Selbstverständlich hat im selben Zeitraum eine Verdunstung stattgefunden. Der ermittelte Wert für den oben angegebenen Zeitraum beträgt 616 mm oder 616 l/m<sup>2</sup>. Eine theoretische Verdunstung von 259 m<sup>3</sup> wäre demnach möglich. Wie sich aber die Verdunstung von im Schlamm gebundenem Wasser verhält, müsste in einer weiteren Studie genauer untersucht werden. Jedenfalls wird angenommen, dass bei einem breiigen Material (mit sehr hohem Feuchtegehalt) die tägliche Verdunstungsmenge gleich jener ist, die bei Wasser auftritt, diese Menge aber mit Absinken des Feuchtegehalts abnimmt.

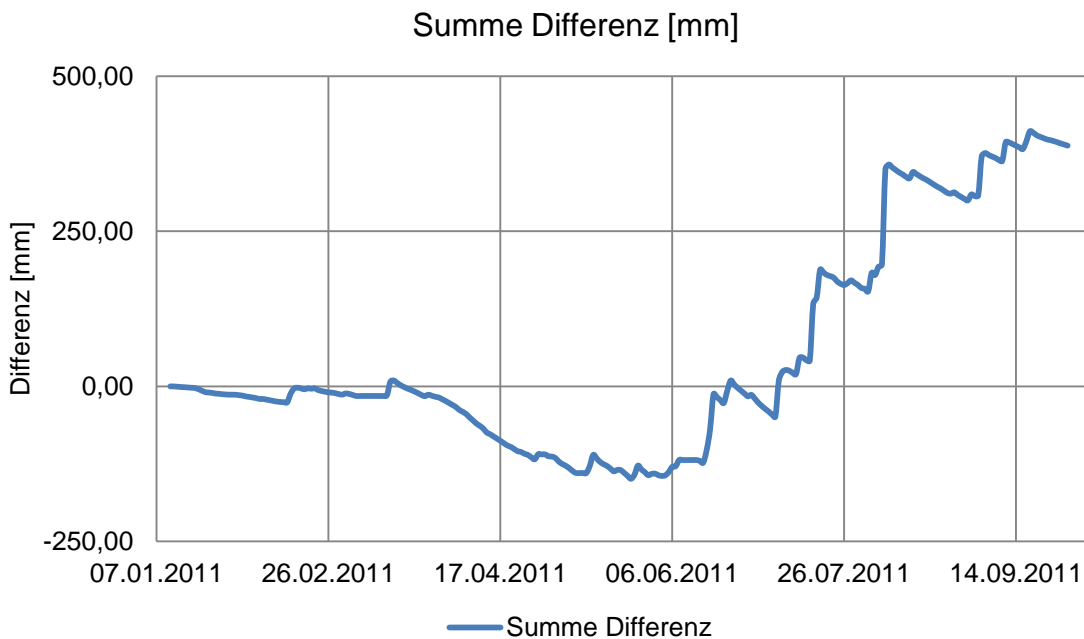


Abbildung 49: Differenz zwischen Verdunstung und Niederschlag Jan – Sep. 2011

Abbildung 49 veranschaulicht die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung. Es ist zu erkennen, dass zwar in den trockenen Monaten (April bis Mitte Juni) die Verdunstung überwogen, jedoch in Summe aufgrund des starken Niederschlages des Sommers, eine starke Zufuhr von Regenwasser stattgefunden hat.

### 5.9 Betrachtung der im Jahr 2011 angefallenen Schlammmasse

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die gesamte im Jahr 2011 angefallene Schlammmasse gegeben werden. Abgesehen von dem in die Deponien abtransportierten Schlamm erfolgt auch eine Abschätzung der Masse, die durch die Hauptdrainageleitung aus dem Tunnel gelangt ist.

### 5.10 Ermittlung der Schlammmasse aus dem geschätzten Volumen

Bis zum heutigen Datum (Stand Jänner 2012), werden die aus dem Tunnel transportierten Schlammvolumina, welche durch den Lokfahrer auf Materialbegleitscheinen festgehalten werden (Kapitel 4.3.2), mit einem seit Jahren angewendeten Dichtefaktor multipliziert, um einen Massewert abzuschätzen. Dieser Faktor wurde zu Baustellenbeginn festgelegt und beträgt  $1,52 \text{ to/m}^3$ .

Tabelle 16: Vergleich Deponie und TAT Massen (Stand Dezember 2011)

		Materialbegleitscheine	Deponiescheine
Tonnage	to	9.500	26.036
Dichte-Faktor	to/m <sup>3</sup>	1,52	4,2
Volumen	m <sup>3</sup>	6.245 (geschätzt)	

Tabelle 16 zeigt, dass aus den Materialbegleitscheinen, auf welchen das aus dem Tunnel abtransportierte Volumen<sup>10</sup> notiert ist, eine berechnete Schlammmasse von 9.500 to für das Jahr 2011 angefallen ist. Diese Masse ergibt sich durch die Multiplikation des geschätzten Volumens mit dem "alten" Dichtefaktor. Wird jedoch die auf den Deponien angekommene Masse durch das geschätzte Volumen von 6.245 m<sup>3</sup> dividiert, so ergibt das einen Faktor von 4,2 to/m<sup>3</sup>. Dieser Faktor weicht um 275 % vom ursprünglich festgelegten Dichte-Faktor ab. Diese Abweichung lässt sich in erster Linie durch die Schätzung des Volumens und Multiplikation mit der nicht mehr aktuellen Dichte erklären.

<sup>10</sup> ohne Restbetonvolumen

## 5.11 Abweichung infolge Volumenschätzung

Die Diskrepanz zwischen der in Kapitel 5.3 ermittelten Dichte sowie dem aus den Deponie- und Materialbegleitscheinen berechneten Dichtefaktor von  $4,2 \text{ to/m}^3$  wird in diesem Kapitel untersucht.

Tabelle 17: geschätzte Schlamm Masse

Summe Schlamm (Deponiescheine) ohne Restbeton	6.245 m <sup>3</sup>
mit Faktor 1,71 to/m <sup>3</sup>	10.680 to

Eine Masse von 10.680 to ergibt sich durch die Multiplikation des geschätzten Volumens mit der bestimmten Dichte von  $1,71 \text{ to/m}^3$  (Tabelle 17).

Tatsächlich wurden aber 26.036 to auf die Deponien geliefert. Dies ergibt eine Abweichung von mehr als 16.000 to, weshalb ein Abweichungsfaktor berechnet werden muss. Dieser Faktor bezieht sich auf die Masse die auf den Deponien angekommen ist und berücksichtigt somit nicht den Restbeton.

Tabelle 18: Berechnung der Abweichung

Abgeführte Menge (auf Deponie angekommen)	26.036 to
Über Materialbegleitscheine registrierte Menge ohne Restbeton	6.245 m <sup>3</sup>
mittels berechneten Dichtefaktor $1.71 \text{ to/m}^3$	10.680 to
Differenz	15.356 to
Abweichung	59%
Abweichung	244 %
korrigierte registrierte Menge	15.238 m <sup>3</sup>
mittels berechnetem Dichtefaktor $1.71 \text{ to/m}^3$	26.036 to

Die über die Materialbegleitscheine registrierte Menge wird mit dem ermittelten Dichtefaktor multipliziert und ergibt eine Masse von 10.680 to, was einer Differenz zur in den Deponien angekommenen Masse von 15.356 to entspricht. Anders ausgedrückt entspricht die in den Materialbegleitscheinen registrierte Masse ca. 41 % der deponierten Masse. Eine Division der mittels des Dichtefaktors berechneten Masse durch die tatsächlich angekommene ergibt den gesuchten Schätzkorrekturfaktor, wie Tabelle 18 zeigt.



## 5.12 Berechnung des durch die Hauptdrainageleitung transportierten Schlammes

Im Jahresdurchschnitt fließen 145 l/s durch die Hauptdrainageleitung aus dem Berg. Das ergibt wie Tabelle 19 zeigt 4.510.080 m<sup>3</sup> (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Berechnung des Tunnelwasser-Jahresvolumens

In Bodio ankommendes Wasser				
pro Sekunde	pro Stunde	pro Tag	pro Monat	pro Jahr
145 l	522 m <sup>3</sup>	12.528 m <sup>3</sup>	375.840 m <sup>3</sup>	4.510.080 m <sup>3</sup>

Über einen längeren Zeitraum wurden vor dem Rechen der Kläranlage Bodio Wasserproben nach der Gewässerschutzverordnung entnommen. Dabei wurden nach der Trocknung Feststoffmassen von durchschnittlich einem Gramm festgestellt.

Tabelle 20: Massen sowie Kosten der Kläranlage Bodio

Wasser pro Jahr	Masse ergebend durch Trockensubstanz 0,7 g/kg	Schlamm mit TS von 70%
4.510.080 m <sup>3</sup>	3.157 to	4.510 to

Tabelle 20 veranschaulicht, dass die theoretische Feststoffgehaltmenge 3.157 Tonnen für das Jahr 2011 beträgt. Da bei der Kläranlage betriebsbedingt durch die Filterkammerpressen eine Masse mit einem Trockensubstanzwert von 70% erreicht werden kann, entsteht eine Schlammmasse von 4.510 to.

## 5.13 Summe der Schlamm Massen

Die Summe besteht aus den 26.036 to deponierten Schlämmen (siehe auch Kapitel 4.9) inklusive den abgeschätzten 4.510 to Filterkuchen der Kläranlage Bodio. Zu bedenken ist dabei, dass im Betrachtungsjahr kein nennenswerter Vortrieb stattgefunden hat und diese Masse rein beim Innenausbau angefallen ist.

## 6 Alternative Entsorgungsmöglichkeiten

Dieses Kapitel soll einen Überblick über alternative Entsorgungsmöglichkeiten bieten. Dabei werden zwei grundsätzlich verschiedene Entsorgungswege vorgestellt. Zum einen eine Weiterbehandlung des Schlammes von Seiten der bauausführenden Firma als auch die Abgabe des unbehandelten Schlammes an ein Entsorgungsunternehmen. Dieses Unternehmen kann sich dabei rein auf die Eliminierung der Schadstoffe spezialisieren als auch den Schlamm als Rohmaterial für eigene Produkte verwenden.

Dabei werden im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit nach dem Abfallwirtschaftsgesetz folgende Ziele definiert (Abfallwirtschaftsgesetz, 2012) (Maydl, et al., 2007).

- *Schädliche oder nachteilige Einwirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt so gering wie möglich halten.*
- *Die Emissionen von Luftschadstoffen und klimarelevanten Gasen so gering wie möglich halten.*
- *Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Energie, Landschaft, Flächen, Deponievolumen) schonen.*
- *Stofflich verwerteter Abfall soll kein höheres Gefährdungspotential aufweisen als ein vergleichbarer Primärstoff.*
- *Es sollen nur solche Abfälle zurückbleiben, deren Ablagerung keine Gefährdung für künftige Generationen darstellen.*

Für die Erreichung und Umsetzung dieser Ziele sind drei Grundsätze im Abfallwirtschaftsgesetz angegeben (Abfallwirtschaftsgesetz, 2012).

- *Abfallvermeidung*
- *Vorbereitung zur Wiederverwendung*
- *Recycling*
- *sonstige Verwertung (thermische Verwertung)*
- *Abfallbeseitigung*

Besonders das Recycling und die Abfallverwertung stellt für dieses Kapitel einen wichtigen Punkt dar. Laut Gesetzgeber gilt folgendes Prinzip (Abfallwirtschaftsgesetz, 2012; Maydl, et al., 2007):

*"Abfälle sind zu verwerten, soweit dies ökologisch zweckmäßig und technisch möglich ist und die dabei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung nicht verhältnismäßig sind und ein Markt für die gewonnenen Stoffe oder die gewonnene Energie vorhanden ist oder geschaffen werden kann"*

Die Definition der verhältnismäßigen Mehrkosten kann dem Erlass des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie des Jahres 1993 entnommen werden (Maydl, et al., 2007).

*Die Verhältnismäßigkeit ist dann gegeben, wenn eine entsprechende Verwertung im Umkreis von 50 km ab Abfallort existiert und die Kosten der ordnungsgemäßen Verwertung im Vergleich mit einer ortsüblichen Deponierung in genehmigten Anlagen 25 % nicht überschreiten.*

## **6.1 Weiterbehandlung des Schlammes auf der Baustelle**

Die Schlammbehandlungsmöglichkeiten, die einer Baufirma verbleiben, sind stark beschränkt und hängen von der Bauzeitdauer, den (Arbeitskraft-) Ressourcen und dem Volumen des anfallenden Schlammes ab. Die Errichtung von komplizierten Anlagen, die für eine Eliminierung der Schadstoffe geeignet sind, sind aus wirtschaftlicher Sicht abzulehnen. Abgesehen von dem langwierigen Genehmigungsverfahren fallen noch hohe Errichtungs- und Betriebskosten an. Des Weiteren müssten diese Anlagen nach Beendigung der Bauarbeiten wieder abgebaut werden. Falls die bauausführende Firma den Schlamm selber nicht verwerten kann, bleibt ihr nur noch die Möglichkeit, die Masse des Schlammes zu verkleinern, indem dem Material Feuchtigkeit entzogen wird. Dass bei einer Trocknung mit zusätzlichem Energie-, Geräte- und Arbeitskostenaufwand gerechnet werden muss, ist dabei unvermeidlich. Jedoch zeigen die im Kapitel 6.2 beschriebenen Trocknungsversuche eine Rentabilität in Form von reduzierten Deponierungs- und Transportkosten.

## **6.2 Trocknungsversuche**

Das Ziel der Versuche war die Verringerung des Feuchtegehaltes mit relativ geringem Energie- und Arbeitsaufwand. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Versuch leicht in der Praxis und im industriellen Still angewendet werden könnte. Hauptgedanke des Versuches ist die natürliche Lufttrocknung zu verstärken bei gleichzeitiger Vermeidung einer Staubeentwicklung.

### **6.2.1 Theoretische Betrachtung der physikalischen Auswirkung einer Trocknung auf den Schlamm**

Da die in dem Schlamm enthaltenen Kohlenwasserstoffe nicht flüchtig sind, gelangen sie durch eine Trocknung auch nicht in die Atmosphäre. Es findet lediglich eine relative Konzentrierung der Stoffe, bezogen auf die Gesamtmasse, statt. An der Klassifizierung der Deponieklasse ändert dies aber nichts. Das ist damit begründet, dass die im Labor zu untersuchenden Proben vor der Untersuchung getrocknet werden und der Kohlenwasserstoffgehalt immer auf die Trockenmasse bezogen wird.

### **6.2.2 Trocknung mittels Heizstrahler**

Mittels dieses Versuchs sollte demonstriert werden, dass mit einem relativ geringen Energieaufwand der Schlamm bis zu einem gewissen Grad getrocknet werden kann. Bedingung für ein gutes Ergebnis ist das mehrmalige Umsetzen des Materials innerhalb der Trocknungszeit.

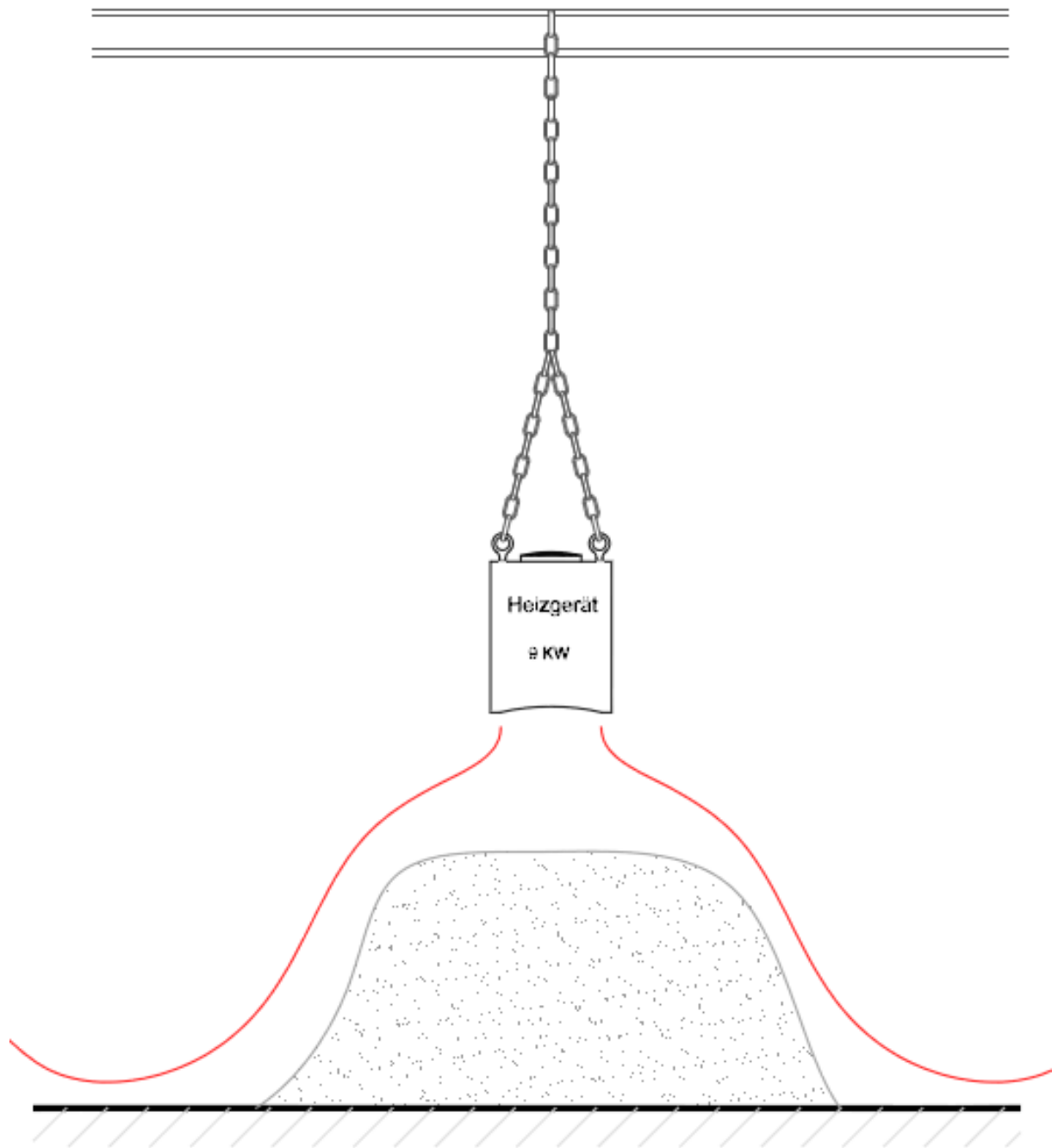


Abbildung 50: Erster Trocknungsversuch (Kuc)

Eine Radladerschaufel, beladen mit einem Inhalt von ca. 3 m<sup>3</sup> mit einem am 09.09.2011 aus dem Tunnel abtransportierten Material wurde am 10.09.2011 von der Box C in die Z-Halle transportiert und dort auch abgeladen. In weiterer Folge wurde ein 9 kW starkes Heizgerät, welches mit einem Ventilator bestückt war, mittels einer eigens konstruierten Vorrichtung über dem Schlamm aufgehängt. Dieser Versuch sah die beschleunigte Oberflächentrocknung aufgrund der warmen Luftüberstreichung vor.

### 6.3 Optimierung der Versuchsanordnung

Jedoch stellte sich bald heraus, dass der Heizstrahler sehr ineffektiv gearbeitet hat, weshalb nach einer Optimierung der Versuchsanordnung gesucht wurde. Es wurde das Ziel verfolgt, die Wärme nicht an der Oberfläche des Schlammes vorbeileiten zu lassen, sondern sie in das Innere des Schlammhaufens zu bekommen. Dazu musste eine Vorrichtung konstruiert werden, die die aufgeheizte Luft ins Innere der Masse leitet.

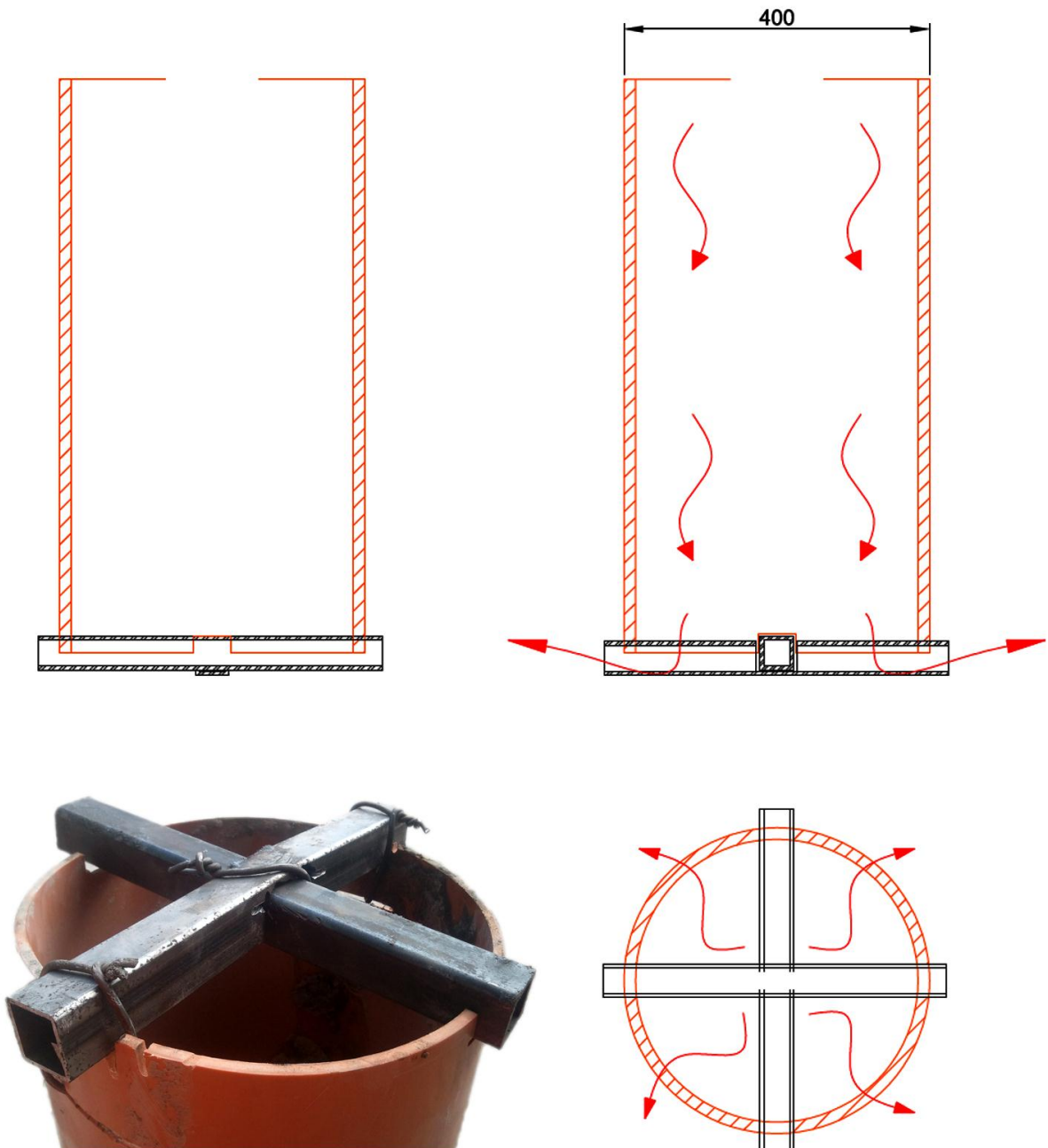


Abbildung 51: Ansichten der Rohrhilfskonstruktion (Kuc)

Mit Hilfe dieser Konstruktion soll warme Luft ins Innere des Materials strömen. Damit die Luft aber auch in den Schlamm gelangen kann, wurde mittels von Formrohren das PVC Rohr angehoben.

### 6.3.1 Versuchsanordnung

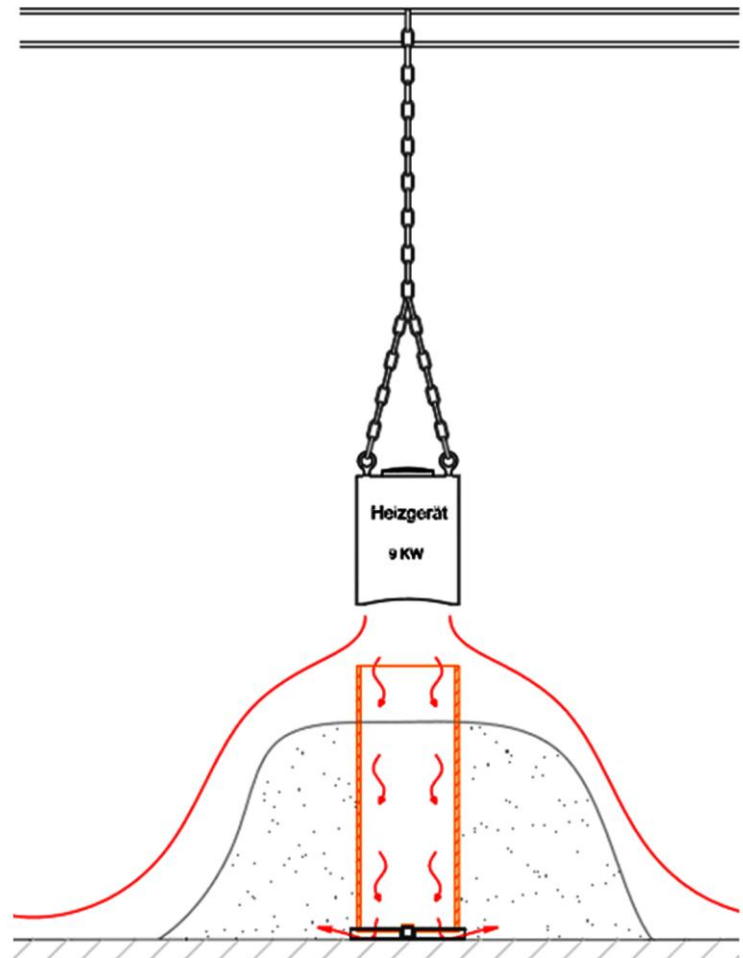


Abbildung 52: Optimierte Versuchsanordnung (Kuc)

Wie Abbildung 52 darstellt, wurde der Heizstrahler ca. 70 cm oberhalb des Rohres positioniert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Luftaustritt des Strahlers in der Rohrachse stattfindet um einerseits die Luft in das Rohr zu blasen und um andererseits eine oberflächliche Trocknung des Schlammes durch das Überströmen mit warmer Luft zu begünstigen.

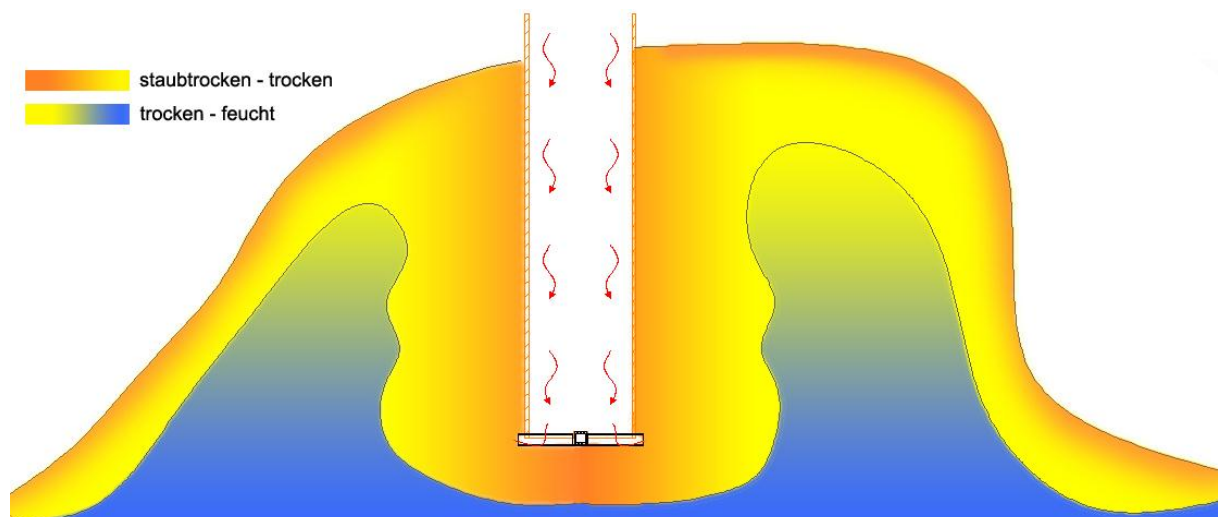


Abbildung 53: Feuchteverteilung innerhalb des Schlammhaufens (Kuc)

Der Materialhaufen wurde innerhalb von 24 Stunden drei Mal umgesetzt, um eine bessere Trocknung der gesamten Probe zu erzielen. Beim Übersetzen konnte tatsächlich eine Trocknung des Materials entlang des Rohres im Umkreis von ca. 50 cm festgestellt werden. Die beobachtete Feuchteverteilung wird in Abbildung 53 dargestellt.

### 6.3.2 Ergebnisse

Nach 24 Stunden wurden dem getrockneten Schlammhaufen zwei Proben entnommen, um mit dem am Vortag entnommenen nassen Schlamm vergleichen zu können (Tabelle 21 und Tabelle 22).

Tabelle 21: Vor Trocknung

		Probe 1	Probe 2
Volumen	ml	2.000	2.000
Tara	g	4.129	4.040
Bruttogewicht	g	7.630	7.556
Nettogewicht	g	6.407	6.430
Differenz	g	1.223	1.126
Nassdichte	to/m <sup>3</sup>	1,75	1,76
Feuchtigkeitsgehalt	%	54	47

Tabelle 22: Nach Trocknung

		Nach Trocknung 1	Nach Trocknung 2
Volumen	ml	2.000	2.000
Tara	g	3.828	4.143
Bruttogewicht	g	6.503	6.988
Nettogewicht	g	5.958	6.443
Differenz	g	545	545
Nassdichte	to/m <sup>3</sup>	1,34	1,42
Feuchtigkeitsgehalt	%	26	24

Tabelle 23: Durchschnittliche Verbesserung gegenüber unbehandeltem Schlamm

Verbesserung	%
Nassdichte	21
Feuchtegehalt	50

Eine Reduzierung um 21 % der Nassdichte sowie über 50 % des Feuchtegehaltes konnte aufgrund des Versuches realisiert werden (siehe Tabelle 23). In absoluten Zahlen ausgedrückt müssten pro Kubikmeter transportiertem Schlamm um 370 kg weniger Wasser transportiert werden.

### 6.3.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Schlamm Trocknung

Anhand dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung soll gezeigt werden, dass eine durch die Baufirma durchgeführte Trocknung in wirtschaftlicher Weise als sinnvoll anzusehen ist. Für eine realitätsnahe Betrachtung werden die in Kapitel 4.9 dargestellten Deponieannahmekosten verwendet. Es wird aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Rechnung aufgrund der örtlichen Randbedingungen nicht auf das Consorzio TAT rückzuführen ist.

Der Wirtschaftlichkeitsberechnung liegt folgendes Szenario zu Grunde:

Bei einer Box, von denen zwei zur Verfügung stehen, mit den Dimensionen 8 m x 4 m x 2,5 m (80 m<sup>3</sup>) werden sechs 20 KW Heizstrahler montiert. Die Strahler verbrauchen in 24 Stunden 2.880 KWh, was multipliziert mit einem Kilowattstundenpreis von 15<sup>11</sup> Rappen 432 Franken beträgt. Der Schlammberg wird innerhalb der betrachteten Zeit mit einem Radlader dreimal zwischen den Boxen umgesetzt um die Trocknung zu begünstigen. Dazu werden insgesamt 1,6 Arbeitsstunden (150 m<sup>3</sup>/h) mit 68<sup>12</sup> CHF/h Mittellohnenkosten und 57<sup>12</sup> CHF/h Gerätekosten einkalkuliert (Summe Arbeitskosten 200 CHF). Die Ausgangsmasse wird mit der bestimmten Dichte von 1,71 to/m<sup>3</sup> multipliziert. Bei den durchgeführten und im Kapitel 6.2 beschriebenen Trocknungsversuchen konnte eine Dichteminderung von 370 kg/m<sup>3</sup> erreicht werden. Für diese Wirtschaftlichkeitsberechnung wird dieser Wert um 20 % auf 300 kg/m<sup>3</sup> gemindert und das Ausgangsvolumen mit einem Dichtefaktor von 1,41<sup>13</sup> to/m<sup>3</sup> multipliziert.

Tabelle 24: Einsparpotential durch Trocknung

	Trocknung	Kosten						Ersparnis
		Masse	Energie	Arbeit+Gerät	Deponie	Deponie (absolut)	Gesamt	
		to	CHF	CHF	CHF/to	CHF	CHF	
Spineda	ohne	137	0	0	31	4.247	4.247	3%
	mit	113	432	200		3.503	4.135	
CRER	ohne	137	0	0	117	16.029	16.029	14%
	mit	113	432	200		13.221	13.853	
Reaktor	ohne	137	0	0	225	30.825	30.825	15%
	mit	113	432	200		25.425	26.057	

Aus Tabelle 24 ist ersichtlich, dass mit steigenden Deponierungskosten die Rentabilität einer Trocknung steigt. Diese baustellenseitige Behandlung sollte vor allem bei Schlämmen durchgeführt werden, welche aufgrund der hohen Schadstoffbelastungen nicht auf einer Inertstoffdeponie gelagert werden können, da bei denen das Einsparpotential bezogen auf den hohen Tonnenpreis sehr groß ist.

<sup>11</sup> Stand: September 2011

<sup>12</sup> inklusive Endzuschläge

<sup>13</sup> 1,71 to/m<sup>3</sup> - 300 kg



## 6.4 Vorschlag zur Massentrocknung

Im Folgenden wird ein Vorschlag zur Massentrocknung in einer Halle vorgestellt (Abbildung 54: Vorschlag zur Trocknung). Die Konstruktion sieht horizontal eingelegte Rohre in den Boxen vor, welche mittels eines Verdichters mit trockener Luft zwangsbelüftet werden. Dadurch, dass die Boxen einen quergeneigten Boden aufweisen, sieht der Vorschlag ein in einem Kiesbett gelagertes und von einem Flies, welches das Eindringen grober Schlammpartikel verhindert, geschütztes Rohr vor. Die restlichen Rohre werden auf Höhe des Hallenbodens auf den Schlamm geschoben und anschließend mit Schlamm beschickt.

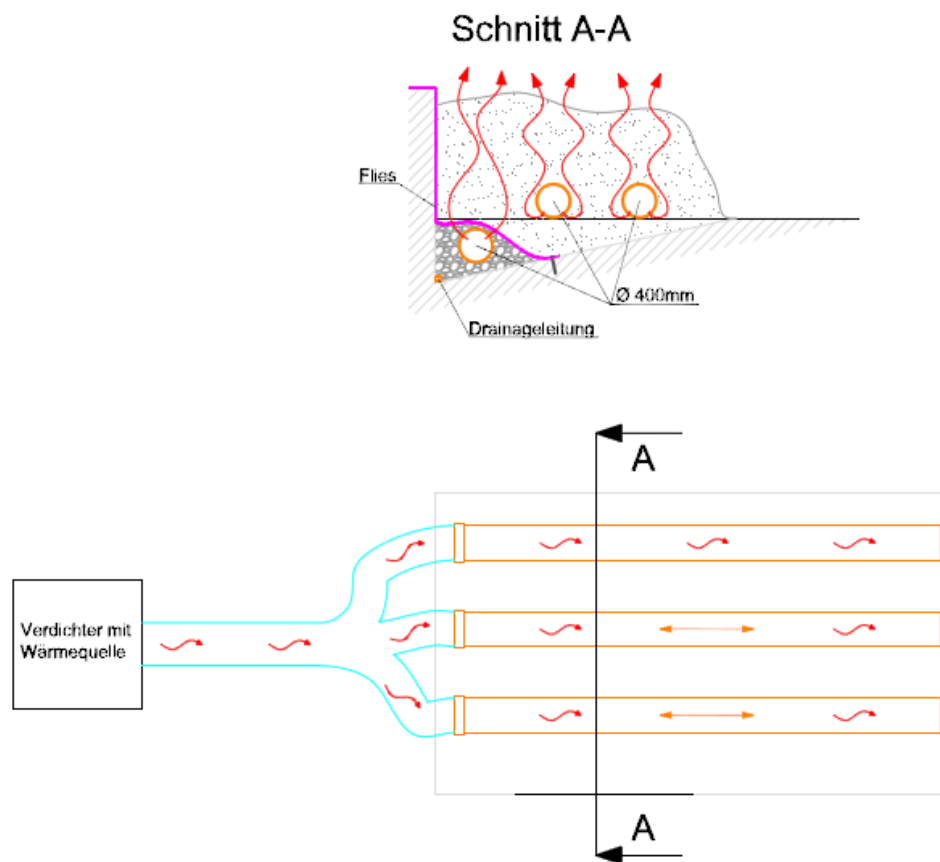


Abbildung 54: Vorschlag zur Trocknung (Kuc)

Nach erfolgter Trocknung wird der sich über den Rohren befindende Schlamm abgetragen und deponiert. Leider konnte diese Idee nicht in die Tat umgesetzt werden, weshalb keine mit dieser Methode erzielbaren Werte vorliegen.

Alternativ könnte auf die Zwangsbelüftung, jedoch nicht auf die Drainageleitungen und das Kiesbett, verzichtet werden. Die Drainageleitungen hätten zur Folge, dass Wasser aus dem nassen Schlamm abfließen kann. Logischerweise würde der sich in Bodennähe befindende Schlamm niemals austrocknen. Allerdings wird angenommen, dass die darüber liegende Schicht "ausbluten" könnte. Diese Schicht könnte nach einer gewissen Zeitspanne, welche noch untersucht werden müsste, auf die Deponien transportiert werden.

## 6.5 Thermische Behandlung

Kohlenwasserstoffe lassen sich durch sehr hohe Temperaturen eliminieren. Dabei kommen verschiedene Verfahren wie zum Beispiel die Behandlung in einem Drehrohrofen oder einem Wirbelschichtofen in Betracht. Das behandelte Material kann danach auf eine günstige Inertstoffdeponie gebracht werden. Damit jedoch eine thermische Behandlung auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, muss der Kohlenwasserstoffgehalt des Schlammes die Grenzwerte einer Reststoffdeponie überschreiten. Ohne weitere Behandlung müsste dieses hoch belastete Material auf einer teuren Reaktordeponie entsorgt werden. Mit Hilfe der thermischen Behandlung wird das Ziel verfolgt, die Kohlenwasserstoffkonzentration soweit zu verringern, bis eine Deponierung auf einer Inertstoffdeponie möglich ist.

Einsatzmaterial	Turaktor®			Pyrobustor®			Wirbelschicht			Drehrohrofen					
										ausgemauert			Ganzstahl		
	< 2 MW	2-6 MW	6-30 MW	< 2 MW	2-6 MW	6-30 MW	< 2 MW	2-6 MW	6-30 MW	< 2 MW	2-6 MW	6-30 MW	< 2 MW	2-6 MW	6-30 MW
Klärschlamm Tiermehl	—	—	—	★★	★★	★	○	★	★★	★	★	★	★	—	—
Ölschlamm / Raffinereschlamm	—	—	—	—	—	—	★	★★	★★	★	★★	★★	★★	★	—
Entölung von Metall- spänen und Walz- zunderschlämmen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	—	★★	★	—
Shredderrückstände Restfraktionen aus Haus / Gewerbemüll	—	—	—	○	—	—	○	★	★★	★★	★★	★★	—	—	—
Edelmetallrück- gewinnung	★★	★★	★★	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Katalysator- Regenerierung	★★	★★	★★	—	—	—	—	—	—	—	—	—	★	○	—
Kontaminierte Böden	—	—	—	—	—	—	—	—	—	★	★★	★★	★	○	—
Langlebige organische Schadstoffe (POPs)	★★	★★	★★	—	—	—	—	—	—	★★	★★	★★	★	○	—
Sonderabfälle / toxische Stoffe	★★	★★	★★	—	—	—	○	○	○	★★	★★	★★	★	○	—

★★ sehr gut geeignet   ★ gut geeignet   ○ in Sonderfällen geeignet   — nicht geeignet

Abbildung 55: Verfahren der Thermischen Behandlung (Quelle: (Eisenmann, 2008))

Aus Abbildung 55 ist ersichtlich, dass ein Drehrohr- oder Wirbelschichtofen für das Ausglühen der Kohlenwasserstoffe am besten geeignet ist. Der Schlamm kann dabei im sehr seltenen Ereignisfall (Platzen eines Hydraulikschlauches einer Baumaschine) als Öl-/Raffinereschlamm oder als kontaminierter Boden angesehen werden. Die Kapitel 6.5.1 bis 6.5.3 sollen einen kurzen Überblick über die Funktionsweisen des Drehrohr- sowie des Wirbelschichtofens (findet in bei der Klinkerproduktion (siehe Kapitel 6.6.1) Verwendung) geben und basieren inhaltlich auf folgender Quelle: (Eisenmann, 2008).

### 6.5.1 Thermische Behandlung in einem Drehrohrföfen (Eisenmann, 2008)

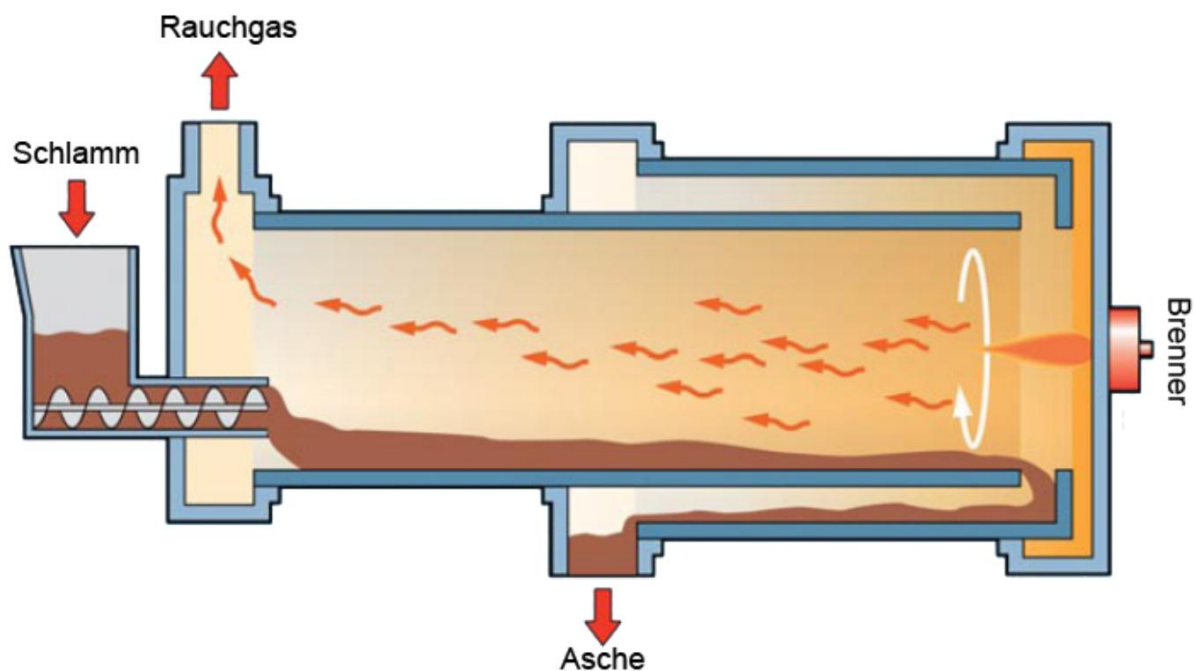


Abbildung 56: Drehrohrföfen (Grafik: (Eisenmann, 2008) bearbeitet Kuc)

Drehrohrföfen sind beliebte Vorrichtungen für eine Thermische Behandlung von Sonderabfällen. Sie eignen sich auch für Stoffe mit geringem Heizwert, weshalb sie für den betrachteten Schlamm in Frage kommen. Dabei gelangt das Material durch eine Schnecke in die einzelnen Ofenzonen (Abbildung 56). Der stirnseitig angeordnete Brenner verdampft das Wasser des im Gegenstrom geförderten Schlammes. Danach wird die Organik gezündet. Durch die variabel einstellbare Verweilzeit in den einzelnen Ofenabschnitten, kann ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden. Wird die obligatorisch nachgeschaltete Rauchgaswäsche mittels einer Wärmekopplung betrieben, kann der energetische Wirkungsgrad gesteigert werden.

### 6.5.2 Wirbelschichtföfen für feste und pastöse Stoffe (Eisenmann, 2008)

Ein Wirbelschichtföfen (Abbildung 57) ist in drei Bereiche aufgeteilt. Im ersten Bereich, der Windbox, wird die Wirbelluft mit hohem Druck eingetragen. Diese Luft wird durch einen Brenner erhitzt und gelangt durch den Düsenboden in den zweiten Bereich, Sandbett oder auch Wirbelbett genannt. Das Wirbelbett wird aufgelockert und in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand überführt. Dieser Vorgang wird auch als Fluidisierung bezeichnet. Der Schlamm wird durch die Beschickungseinrichtung in den Ofen eingebracht und vermischt sich mit dem fluidisierenden Sandbett. Im letzten Bereich des Ofens, dem Freeboard, werden die entstandenen Rauchgase nachverbrannt, weshalb eine nachgeschaltete Nachbrennkammer nicht erforderlich ist.

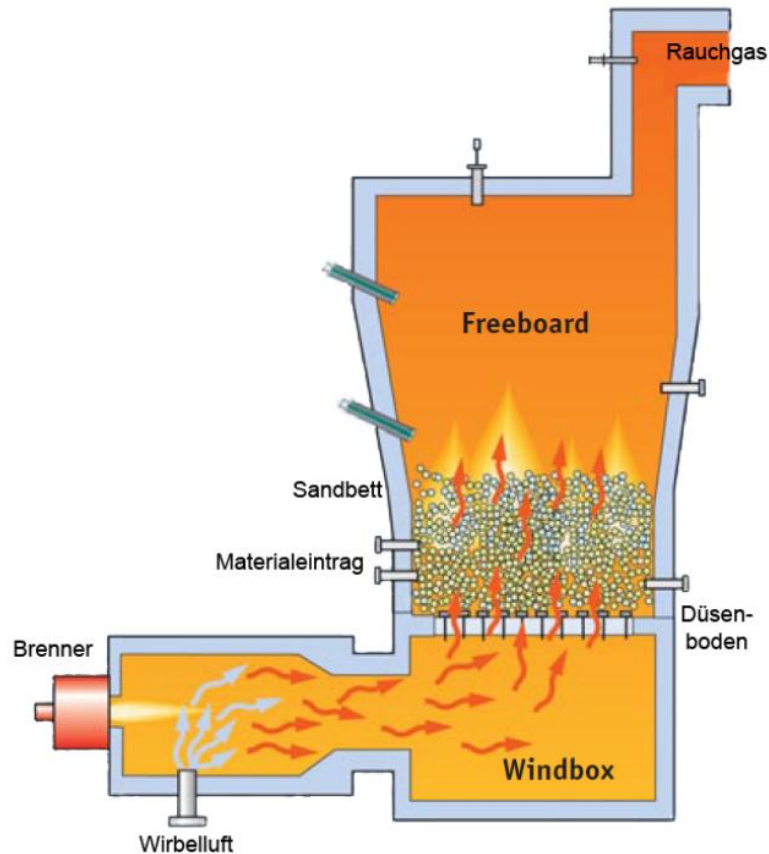


Abbildung 57: Wirbelschichtofen (Grafik (Eisenmann, 2008))

Der Vorteil eines Wirbelschichtofens ist die Möglichkeit einer autothermen Verbrennung von niedrigkalorischen Materialien. Des Weiteren können saure Bestandteile bereits im Bett durch das Einbringen von Additiven gebunden und somit die Rauchgasreinigung entlastet werden. Solche Anlagen werden in der Ölindustrie zur Verbrennung von Öl- sowie Raffinerieschlämmen verwendet.

### 6.5.3 Vor- und Nachteile einer thermischen Behandlung

Bei einer thermischen Behandlung ist eine vollständige Verbrennung der Kohlenwasserstoffe gewährleistet. Diese Anlagen sind für Schlämme mit hoher KW-Konzentration in unterschiedlichen Größen und als Komplettanlagen inkl. Gaswäsche verfügbar. Als Endprodukt bleibt inertes Material mit einer sehr geringen Dichte, aufgrund der Feuchtigkeitsreduktion, zur Deponierung übrig. Der Nachteil sind jedoch die hohen Betriebskosten. Es darf ebenso nicht vernachlässigt werden, dass die Asche einer Deponierung bedarf. Zwar kann dazu eine Inertstoffdeponie angefahren werden, dennoch ist mit zusätzlichen Transport- und Deponierungskosten zu rechnen. Allerdings ist eine thermische Behandlung aus ökologischer Sicht einer Deponierung auf Reaktordeponien vorzuziehen.

## 6.6 Recycling von Betonschlämmen

Die Kapitel 6.6 ist inhaltlich weitestgehend den folgenden Quellen entnommen: (Hitz, et al., 2006), (Holcim, 2011)).

In diesem Kapitel werden weitere Behandlungsmöglichkeiten abseits der Deponierung vorgestellt und diskutiert. Wichtigstes Ziel einer alternativen Entsorgung ist die Eliminierung der Schadstoffe. Des Weiteren ist vom ökologischen Standpunkt aus betrachtet die Wiederverwertbarkeit des Materials ein wichtiger Punkt.

Die thermische Eliminierung von Schadstoffen mit der anschließenden Ablagerung auf Deponien ist im ökologischen Sinne der Deponierung von unbehandelten Materialien zu bevorzugen. Die ökologisch beste Möglichkeit ist jedoch eine Wiederverwertung des Schlammes. Dabei müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Die Schadstoffe müssen vor der Wiederverwendung in neuen Produkten eliminiert werden.
- Bei der Herstellung der neuen Produkte dürfen keine neuen Schadstoffe entstehen.

Als Abnehmer für den "Abfall" kommen Zement-, Ziegel- und Keramikwerke in Frage. Keramik- und Zementwerke können den Betonschlamm als Rohmaterialersatz für die jeweilige Produktion verwenden. Ziegelwerke können schwach<sup>14</sup> belastete Schlämme einem fetten Lehm als Magerungsmittel beimischen. Bei der Zementindustrie wird stark<sup>14</sup> belasteter Schlamm mit den weiteren Ausgangsmaterialien des Zementes in einem Drehrohrofen gebrannt. Dabei verbrennen die Kohlenwasserstoffe genauso wie bei der Thermischen Behandlung. Der große Vorteil gegenüber der alleinigen thermischen Behandlung ist die Kostenersparnis der Deponierung, die Einsparung des kostbaren Deponievolumens und die gleichzeitige Produktion von neuen Baustoffen.

Abbildung 58 zeigt die zwei Schlammströme im Form des (Restbeton-) Schlammes und des Tunnelwassers. Bei der Materialaufbereitung könnte entschieden werden ob der Schlamm auf eine Deponie oder in ein Zementwerk gefahren werden soll, wobei grundsätzlich die Verwertung bevorzugt werden sollte.

---

<sup>14</sup> (Schneebeli, et al., 2006)

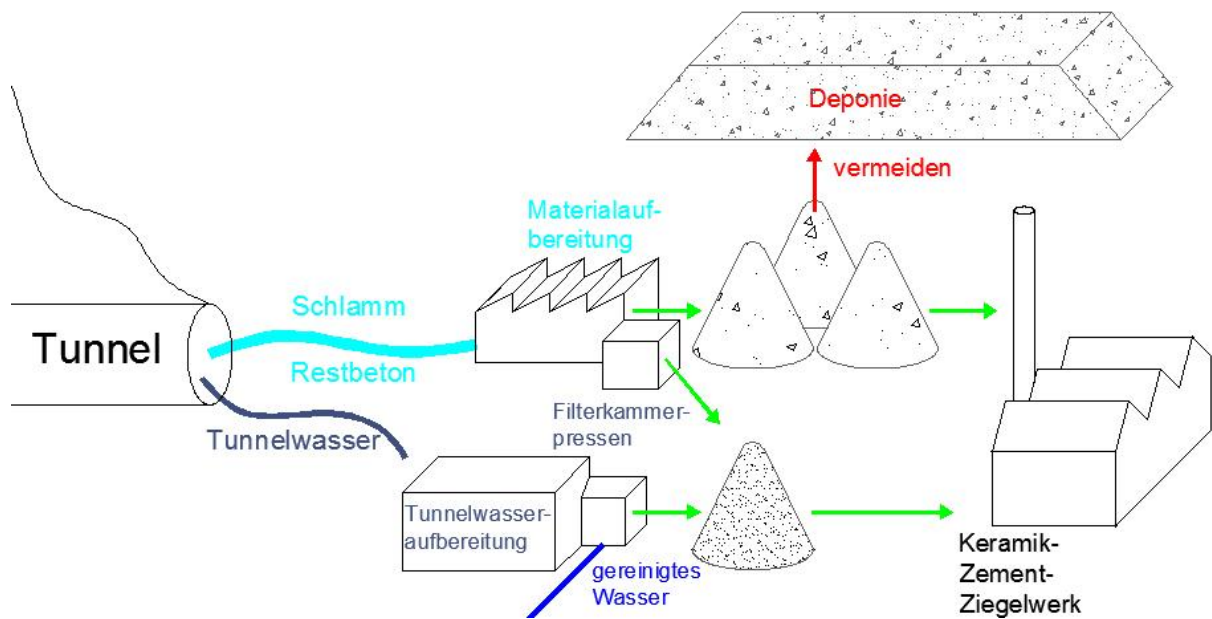


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Schlammentsorgung über die Industrie (Kuc)

### 6.6.1 Herstellungsprozess von Zement

(Hitz, et al., 2006) (Holcim, 2012)

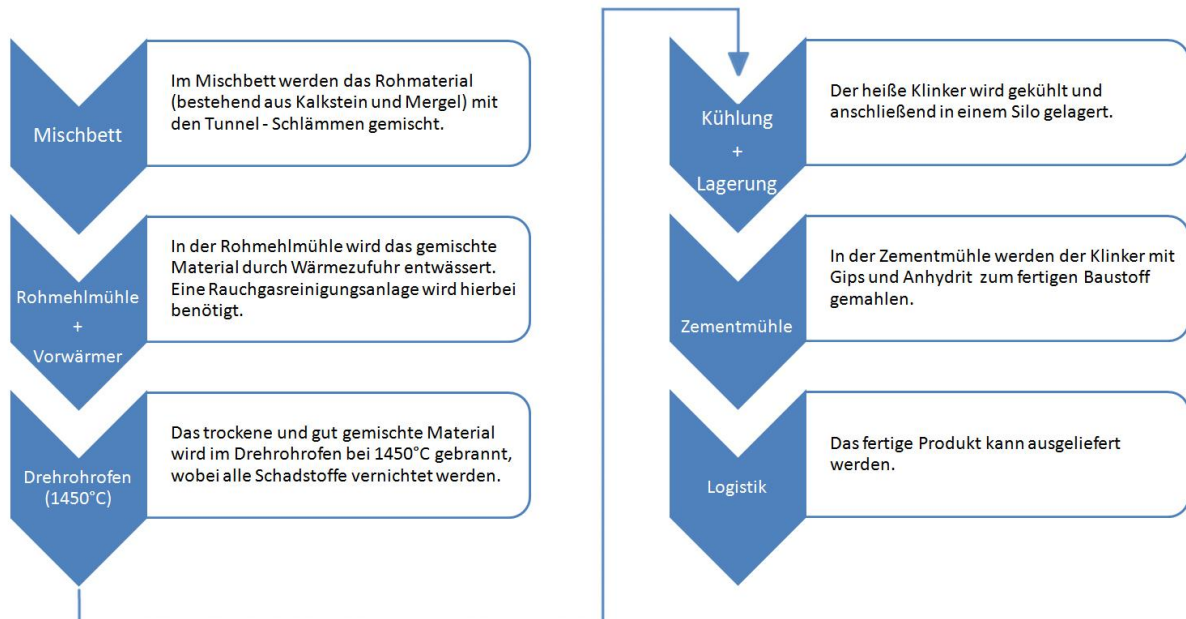


Abbildung 59: Herstellungsprozess des Zementes mit Schlammbeimengung (Kuc)

Abbildung 59 veranschaulicht den Herstellungsprozess des Zementes mit einer Schlammbeimengung. Der Tunnelschlamm wird gemeinsam mit dem üblichen Rohmaterial (Kalkstein und Mergel) in einem Mischbett zum neuen Ausgangsrohmaterial gemischt und in einer Rohmehlmühle bei gleichzeitiger Einwirkung von Wärme gemahlen. Durch die Wärme, welche zur Erhöhung des

Anlagenwirkungsgrades vom Drehrohrofen abgeführt wird, werden die Materialien getrocknet. Das dabei entstehende Rauchgas muss durch eine Filteranlage (Aktivkohle-, Elektrofilter, etc.) geleitet werden, wobei die festen Filtrerrückstände dem Materialstrom wieder zugegeben werden können. Anschließend wird das Rohmehl in einem Drehrohrofen bei einer Temperatur von 1450 °C - 2000 °C gebrannt, wobei alle Schadstoffe vernichtet werden. Durch eine lange Durchlaufzeit wird Verbrennungssasche vollständig in den Klinker integriert. Säurehaltige Verbrennungsgase werden durch den gegenwärtigen Kalk gebunden. Das nun als Klinker bezeichnete Material wird in einem Klinkerkühler auf unter 200 °C gekühlt und in einem Klinkersilo zwischen gelagert. In einem weiteren Produktionsprozess wird der gebrannte Klinker mit Gips und Anhydrit zum fertigen Baustoff gemahlen. In dieser Produktionsstufe können eigenschaftsveränderte Zusatzstoffe dem Zement untergemischt werden.

#### 6.6.1.1 Beimischungsmengen von Ersatzrohstoffen in einem Zementwerk (Holcim, 2011)

Der Nachhaltigkeitsbericht 2008-2010<sup>15</sup> des Zementproduzenten Holcim AG, welcher auch den Gotthardbasistunnel mit Zement versorgt, gibt einen Wert von 3 %<sup>15</sup> Rohmaterialersatzstoffe, bezogen auf den Gesamtrohstoffbedarf, an. Bei einer jährlichen Produktion von 2,6<sup>15</sup> Millionen Tonnen Zement werden somit 78.000 Tonnen Ersatzrohstoffe verwendet. Zudem existieren immer mehr Einzelanlagen, wie die Société Romande de Recyclage (SRREC) in Genf, die sich auf die Wiederaufbereitung von Gesteinskörnungen aus dem Abbruchmaterial (getrockneter Betonschlamm kann als Abbruchmaterial angesehen werden) spezialisiert haben, die jährlich bis zu 50.000 Tonnen Recyclingmaterial verarbeiten können. Die beim Innenausbau im Jahr 2011 angefallenen 26 Tsd. Tonnen Schlamm könnten demnach problemlos in der Zementindustrie verarbeitet werden.

#### 6.6.2 Herstellungsprozess von Ziegelsteinen

(Hitz, et al., 2006)



Abbildung 60: Herstellungsprozess bei der Ziegelproduktion (Kuc)

<sup>15</sup> (Holcim, 2011)

Abbildung 60 veranschaulicht den Herstellungsprozess von Ziegelsteinen. In einem Ziegelwerk wird das Rohmaterial (Ton und Mergel) unter Wasserzugabe mechanisch zerkleinert. In dieser Phase kann der Schlamm untergemischt und mit dem Ausgangsmaterial homogenisiert werden. In weiterer Folge wird das Material in einer Strangpresse zu den gewünschten Ziegelsteinen gepresst und bei niedrigen Temperaturen bis zu 48 Stunden getrocknet. Nach der Trocknung werden die Steine bei einer Temperatur von maximal 1000 °C in einem Tunnelofen gebrannt. Da diese Temperatur bedeutend niedriger als jene der Zementproduktion ist, empfiehlt es sich schwach belastete Schlämme dem Rohmaterial zuzumischen<sup>14</sup>.

## **6.7 Biologische Behandlung**

Das Kapitel 6.7 baut auf folgenden Quellen auf: (Altec, 2012) (Hitz, et al., 2006)

Bei einer biologischen Behandlung wird der Schlamm in Mieten aufgesetzt und zwangsbelüftet. Im Vorfeld muss das Material vorgetrocknet und mechanisch zerkleinert werden. Ebenso ist eine Zugabe von Zuschlagstoffen in Form von Nährstoffen (kann aus dem Sandfang einer kommunalen Kläranlage stammen) und Strukturmaterial notwendig. Nach der Behandlung kann das Material auf einer Inertstoffdeponie entsorgt oder zu Rekultivierungsmaßnahmen herangezogen werden. Allenfalls können bei der Vorbehandlung eine Nitritentgiftung mit NaOCl und eine Chromatentgiftung mit Eisen (II)-Ionen erfolgen. Entscheidend bei diesem Verfahren sind die Vorbehandlung und der Wassergehalt. Ungenügende Abbauleistungen sind eine Folge von einem mangelnden Nährstoffangebot und zu hohem Wassergehalt. Bezüglich des hohen pH-Wertes bei Betonschlämmen müssten noch weitere Untersuchungen gemacht werden. Des Weiteren kann der vollständige Abbau der Kohlenwasserstoffe nicht garantiert werden.

## **6.8 Noch nicht anwendbare Verfahren**

Im Internet werden eine Vielzahl von Behandlungsmöglichkeiten für schlammartige Abfälle angeboten, welche von einer Verglasung über eine biologisch-chemische Behandlung bis zur Vakuumdestillation reichen. Viele dieser Verfahren befinden sich noch in der Testphase oder erweisen sich als nicht robust genug um Betonschlämme erfolgreich verwerten zu können.

### **6.8.1 Vakuumdestillation**

(Umwelt-Lexikon, 2012)

Eine unterhalb des Atmosphärendruckes ablaufende Destillation wird Vakuumdestillation genannt. Durch das Herabsenken der Siedetemperatur der einzelnen Stoffe können diese vom Materialgemisch getrennt werden. Diese



Anwendung kann in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Zur Zeit gibt es zu wenig flächendeckende Anlagen

## **6.9 Vergleich aller Entsorgungsmöglichkeiten**

In diesem Kapitel findet ein Vergleich der vorgestellten Entsorgungsmöglichkeiten zu einer Deponierung von unbehandeltem Schlamm statt. Es werden sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Aspekte bewertet, wobei als Instrument die Kriterienmatrix (Fellendorf, et al., 2011) Verwendung findet. Pro Kriterium werden bis zu 5 Punkte vergeben. Das Verfahren mit der höchsten Punktezahl gewinnt den Vergleich.

### **6.9.1 Beurteilungskriterien**

Die Kriterienmatrix ist in zwei Bereiche aufgeteilt. In den Deponiespalten werden die Notwendigkeit einer Deponierung, das dabei benötigte Volumen, die damit verbundene Ökologie und die Deponiekosten bewertet. Bei den Zusatzkosten werden die zusätzlichen Energie- und Arbeitskraftkosten einer eventuellen Trocknung und die Annahmekosten eines Keramik-, Zement- oder Ziegelwerkes bewertet.

#### **6.9.1.1 Deponierung**

Ein Verfahren bei dem eine Deponierung des Materials unerlässlich ist, erhält einen Punkt. Verfahren bei denen der Schlamm recycelt werden kann, wird mit der höchsten Punktezahl versehen.

#### **6.9.1.2 Volumen**

Je höher das zu deponierende Volumen ist, desto niedriger fällt die Punktezahl aus. Unbehandeltes Material mit einer Dichte von  $> 1,7 \text{ t/m}^3$  erhält einen Punkt, getrocknetes Material mit einer Dichte von  $1,4 \text{ t/m}^3$  hingegen drei Punkte. Thermisch behandeltes Material mit einer Dichte von unter  $1,3 \text{ t/m}^3$  (0 % Feuchte, siehe Abbildung 35) wird mit zwei Punkten versehen.

#### **6.9.1.3 Ökologie**

Verfahren bei denen unbehandeltes Material einer Deponierung zugeführt werden muss erhalten einen Punkt. Zwei Punkte gehen an das Trocknungsverfahren, da im Vergleich zum unbehandelten Material weniger Masse deponiert werden muss. Verfahren bei denen zwar die Schadstoffe eliminiert werden, jedoch eine Deponierung der inerten Stoffe unerlässlich ist, erhalten 3 Punkte. Alle anderen Anwendungen die ein Recycling als Grundgedanken verfolgen, werden mit der höchsten Punktezahl versehen.

#### 6.9.1.4 Arbeitskraft- und Energiekosten

Diese Kosten ergeben sich durch folgende Annahmen: (siehe Kapitel 6.3.3)

- Energiekosten: 432 CHF für eine Ausgangsmasse von 137 to → ≈ 3 CHF/to
- Arbeitskraft- und Gerätekosten: 200 CHF → ≈ 1,5 CHF /to

#### 6.9.1.5 Bewertung der Kosten

Die Punktevergabe erfolgt in Relation zu den höchsten Kosten der vorgestellten Verfahren. Dies bedeutet, dass das teuerste Verfahren einen Punkt erhält, ein Verfahren dessen Kosten 30 % des Referenzverfahrens betragen erhält hingegen 4 Punkte.

bis 20 %: 5 Punkte

bis 40 %: 4 Punkte

bis 60 %: 3 Punkte

bis 80 %: 2 Punkte

bis 100 %: 1 Punkt

#### 6.9.1.6 Bestimmung der Annahmekosten der Zement- und Ziegelwerke

(Hitz, et al., 2006)

Die Kosten von 125 CHF/to verstehen sich inklusive Transportkosten und ergeben sich als Mittelwert von zwei unterschiedlichen Angaben. Sie beziehen sich auf den Gotthardbasistunnel.

#### 6.9.1.7 Thermische Verbrennung:

Es wurden mehrere österreichische Unternehmen (Rest- und Sondermüllverbrennungsanlagen) mit der Erklärung der Ziele dieser Masterarbeit sowie der Bitte um Bekanntgabe der Annahmekosten gebeten. Leider war die Resonanz sehr bescheiden. Nur ein einziges Werk hat den Annahmepreis bekannt gegeben.

$125^{16} \text{ €/to} + 8 \text{ €/to Altlastensanierungsbeitrag} + 10 \% \text{ Umsatzsteuer} = 146 \text{ €} \rightarrow 175 \text{ CHF}^{17} + 12 \text{ CHF/to}^{19} \text{ Transportkosten: } 187 \text{ CHF/to}$

#### 6.9.1.8 Biologische Behandlung

Annahmekosten:  $90 \text{ €/to}^{18} + \text{Transportkosten: } 10 \text{ €/to}^{19} = 100 \text{ €/to} \rightarrow 120 \text{ CHF/to}^{17}$

#### 6.9.1.9 Gesamtnote

Für ein Unternehmen hat die Wirtschaftlichkeit die höchste Bedeutung, weshalb den Kosten eine Gewichtung von 40 % zugemessen wird. Jedoch sollte umweltbewusstes sowie nachhaltiges Bauen ebenso eine wichtige Rolle bei den Überlegungen spielen. Deshalb werden die restlichen 60 % wie folgt aufgeteilt.

---

<sup>16</sup> Preisinformation: ABRG Arnoldstein

<sup>17</sup> €/CHF Kurs vom 24.04.2012: 1:1,2

<sup>18</sup> (Altec, 2012)

<sup>19</sup> Annahme: 10 €/to

- Deponierung: 30%      Volumen: 10 %      Ökologie: 20 %

Durch unterschiedliche Gewichtungen der einzelnen Kriterien lassen sich verschiedene Ergebnisse kreieren.

## 6.9.2 Kriterienmatrix

Tabelle 25: Vergleich aller Entsorgungsmöglichkeiten

Verfahren	Ökologie			Kosten					Beurteilung	
	Deponierung	Vol	Ökologie	Deponie	Energie	Arbeitskraft	Industrie	Gesamt	Bewertung Kosten	Punkte
	ja = 1 nein = 5			CHF/to	CHF/to	CHF/to	CHF/to	CHF/to		
<b>Wichtung</b>	30%	10%	20 %						40%	100%
Deponierung Personico	1	1	1	21.5	0	0	0	22	5	2.6
Deponierung Spineda	1	1	1	31	0	0	0	31	5	2.6
Deponierung CRER	1	1	1	117	0	0	0	117	3	1.8
Deponierung Reaktordeponie	1	1	1	225	0	0	0	225	1	1
Deponierung Durchschnitt GBT	1	1	1	52	0	0	0	52	4	2.2
Deponierung mit Trocknung Personico	1	3	2	21.5	3	1.5	0	26	5	3
Deponierung mit Trocknung Spineda	1	3	2	31	3	1.5	0	36	5	3
Deponierung mit Trocknung CRER	1	3	2	117	3	1.5	0	122	3	2.2
Deponierung mit Trocknung Reaktordeponie	1	3	2	225	3	1.5	0	230	1	1.4
Deponierung mit Trocknung Durchschnitt	1	3	2	52	3	1.5	0	57	4	2.6
Thermische Behandlung	1	4	3	21.5	0	0	187	209	1	1.7
Biologische Behandlung	1	3	3	21.5	0	0	120	142	2	2
Recycling Zementwerk	5	5	5	0	0	0	125	125	3	4.2
Recycling Ziegelwerk	5	5	5	0	0	0	125	125	3	4.2

Bei den gewählten Gewichtungen sagt die Kriterienmatrix (Tabelle 25) aus, dass das Recycling des Schlammes die beste Lösung darstellt. Werden aber nur die Kosten betrachtet, so ist erkennbar, dass die wirtschaftlichste Entsorgung nach wie vor eine Deponierung von schwach belasteten Schlämmen darstellt. Schlämme, deren Kohlenwasserstoffbelastung gering genug für die Entsorgung auf einer Inertstoffdeponie ist, können in Anbetracht der hohen Industrieannahme- und der niedrigen Deponieannahmekosten weiterhin auf Deponien entsorgt werden. Eine Trocknung des Schlammes auf der Baustelle sollte aber angewendet werden und ist nicht nur in Anbetracht des ökologischen Gedankens (Schonung des vorhandenen Deponievolumens) sinnvoll, sondern macht auch in wirtschaftlicher Hinsicht Sinn (siehe auch Kapitel 6.3.3). Für stark belastete Schlämme sollten alternative Entsorgungsmöglichkeiten gesucht werden. Der Preisvergleich zeigt, dass die Deponierung auf einer Reaktordeponie fast 80 % teurer ist, als die Entsorgung in einem Zement- oder Ziegelwerk.

## 7 Fazit und Ausblick

Die der Menschheit zur Verfügung stehenden Ressourcen sind beschränkt. Das gilt nicht nur für lebenswichtige Rohstoffe, ohne die die Menschheit des 21. Jahrhunderts nicht mehr überleben könnte, sondern auch für das Deponievolumen. Umso wichtiger ist die Erarbeitung eines ressourcenschonenden Umganges mit Baustellenabfällen schon während der Planungs- und Ausschreibungsphase eines Bauprojektes.

Während der Planung einer Tunnelbaustelle sollte der während der Bauarbeiten betriebsbedingt auftretenden Schlammproblematik mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dies betrifft insbesondere die Planung und Ausführung des Vortriebes und des Innenausbaus. Die grundsätzliche Entstehung von Schlamm kann nicht verhindert werden, sehr wohl aber die Kontaminierung mit Schadstoffen. Dabei sollte die Verwendung von nitritarmen Sprengstoffen, chromatarmen Betonen und biologisch abbaubaren Schmiermitteln, Hydraulikölen und Antriebsstoffen forciert werden. Die Verantwortung für eine zeitgemäße, sinnvolle und wirtschaftliche Abfallverwertung sollte auf der Seite und im Interesse des Bauherrn liegen. Die während der Planungsphase erarbeiteten Konzepte sollten in die Ausschreibung mit einbezogen werden. Doch auch während der Bauphase hat die bauausführende Firma für einen fachgerechten Umgang mit dem Schlamm Sorge zu tragen. Dabei stellt die Lagerung der Schlämme in überdachten Hallen ein einfaches und zweckmäßiges Mittel dar.

### 7.1 Im Vorfeld eines Bauprojektes zu beachtete Punkte

Es gibt kein Einheitskonzept, das auf jeder Baustelle übernommen werden könnte. Deswegen müssen die planenden Ingenieure aufgrund der Größe, dem Volumen und den örtlichen Randbedingungen eines Bauvorhabens folgende Punkte beachten.

- Wie hoch werden die Schadstoffbelastungen des Schlammes sein?
- Befinden sich im Umkreis Deponien, welche den Schlamm annehmen?
- Wie hoch sind die Grenzwerte für eine Deponierung?
- Wie viel Schlamm wird pro Zeiteinheit erwartet?
- Gibt es alternative Abnehmer (Ziegel-, Zementwerk)?
- Wie hoch sind die Schadstoffgrenzwerte für eine Verwertung in einem Ziegel- oder Zementwerk?
- Ist die Zusammensetzung des Schlammes für die Abnehmer stabil genug?
- Was ist die geforderte Mindestmenge des Zement-, Ziegelwerkes?
- Ist eine baustellenseitige Vorbehandlung der Schlämme möglich?

- Muss mit saisonalen Randbedingungen, bzw. Witterungsempfindlichkeit bei der Vorbehandlung (Pressen, Trocknung) gerechnet werden?

## **7.2 Empfehlungen für den Umgang mit dem Schlamm**

Aus den im Kapitel 7.1 gestellten Fragen ergeben sich für verschieden große Bauprojekte unterschiedliche Entsorgungskonzepte.

Bei einem kleinen Bauprojekt (Bauzeit < 1 Jahr) kann eine Deponierung des Schlammes aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht am sinnvollsten sein. Ein Zement- oder Ziegelwerk muss gegebenenfalls die Rezeptur, bzw. das Verfahren für eine Schlammverwertung anpassen. Somit rentiert sich eine Modifikation erst nach einer gewissen Zeit, die bei einem kleinen Bauvorhaben möglicherweise nicht gegeben ist.

Allerdings kann eine baustellenseitige Behandlung immer durchgeführt werden. Das Kapitel 6.3 zeigt durch die durchgeführten Versuche und die Wirtschaftlichkeitsberechnung, dass eine Trocknung als wirtschaftlich angesehen werden kann.

Die Verwertung in Recyclingprodukten stellt sicherlich den besten ökologischen Weg dar. Die Wirtschaftlichkeit hängt indes in erster Linie von der Entfernung der Werke und den Annahmekosten in Relation zu den Deponiepreisen ab.

An dieser Stelle wird auf das Kapitel 6 verwiesen, in welchem aus dem Abfallwirtschaftsgesetz zitiert wird. Demnach sollten Verwertungsmöglichkeiten abseits der Deponierung angestrebt werden, solange diese auch wirtschaftlich zumutbar sind. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist mit 25 % Mehrkosten und einer örtlichen Entfernung von 50 Straßenkilometern definiert. Wie die Kriterienmatrix in Kapitel 6.9.2 zeigt, betragen die Mehrkosten der alternativen Entsorgungsmöglichkeiten zwischen 2,5<sup>20</sup> % - 7<sup>21</sup> % bezogen auf Material, welches auf Reststoffdeponien, wie der CRER - Deponie entsorgt werden müsste. Bezogen auf die Reaktordeponie beträgt hingegen das Einsparpotential zwischen 44 % und 46 %.

## **7.3 Empfehlung des alternativen Entsorgungsverfahrens**

Die Zementindustrie stellt, nach Meinung des Autors dieser Arbeit, die beste Verwertungsmöglichkeit für belastete Schlämme dar. Zu einem werden alle Kohlenwasserstoffe bei der hohen Klinkerproduktionstemperatur verbrannt und zum anderen spielt eine mögliche Chromatproblematik keine Rolle. Das verwertete

<sup>20</sup> Biologische Behandlung

<sup>21</sup> Zement-Ziegelindustrie

Material muss nicht, wie nach der biologischen oder thermischen Behandlung, auf Inertstoffdeponien gelagert werden, sondern findet zu 100 % in einem neuen Baustoff Verwendung.

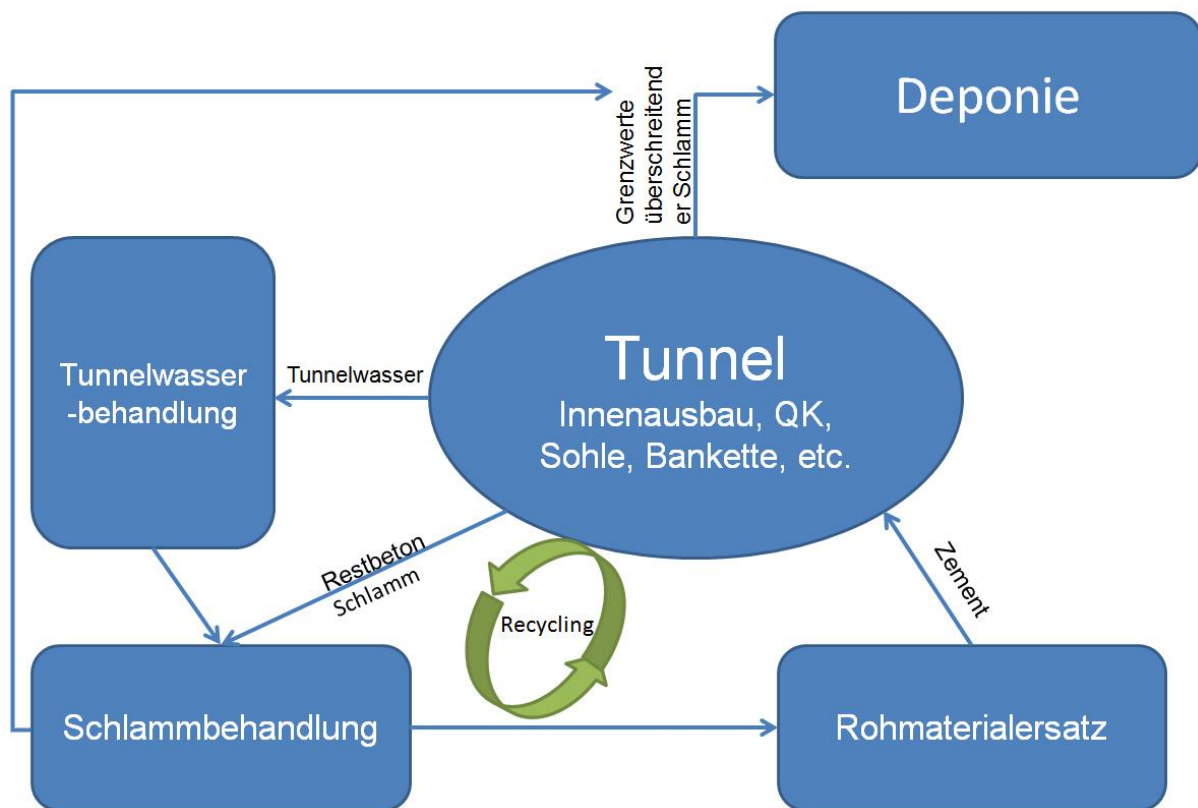


Abbildung 61: Schematische Darstellung der Abfallwirtschaft (Kuc)

Abbildung 61 zeigt eine mögliche Umsetzung auf einer Großbaustelle. Der aus dem Tunnel kommende Schlamm und der Restbeton sollten nach einer Vorbehandlung in dem die Baustelle beliefernden Zementwerk als Rohmaterialersatz für die Zementproduktion verwendet werden. Dabei sollten während der Ausschreibung für das Zementwerk entsprechende Anreize gemacht werden.

## 8 Anhang

### 8.1.1 Probe 1 Tabellarische Auswertung

Tabelle 26: Probe 1

Anfangsvolumen:		320ml	Tara	414g
Gewicht	Volumen	Wassermenge	Dichte	Feuchtegehalt
g	ml	ml	to/m3	%
828	320	0	1.29	0.00
860	315	32	1.42	7.73
915	295	87	1.70	21.01
934	290	106	1.79	25.60
985	350	157	1.63	37.92
1035	409	207	1.52	50.00
1118	506	290	1.39	70.05

### 8.1.2 Probe 1 Proctordichteverlauf

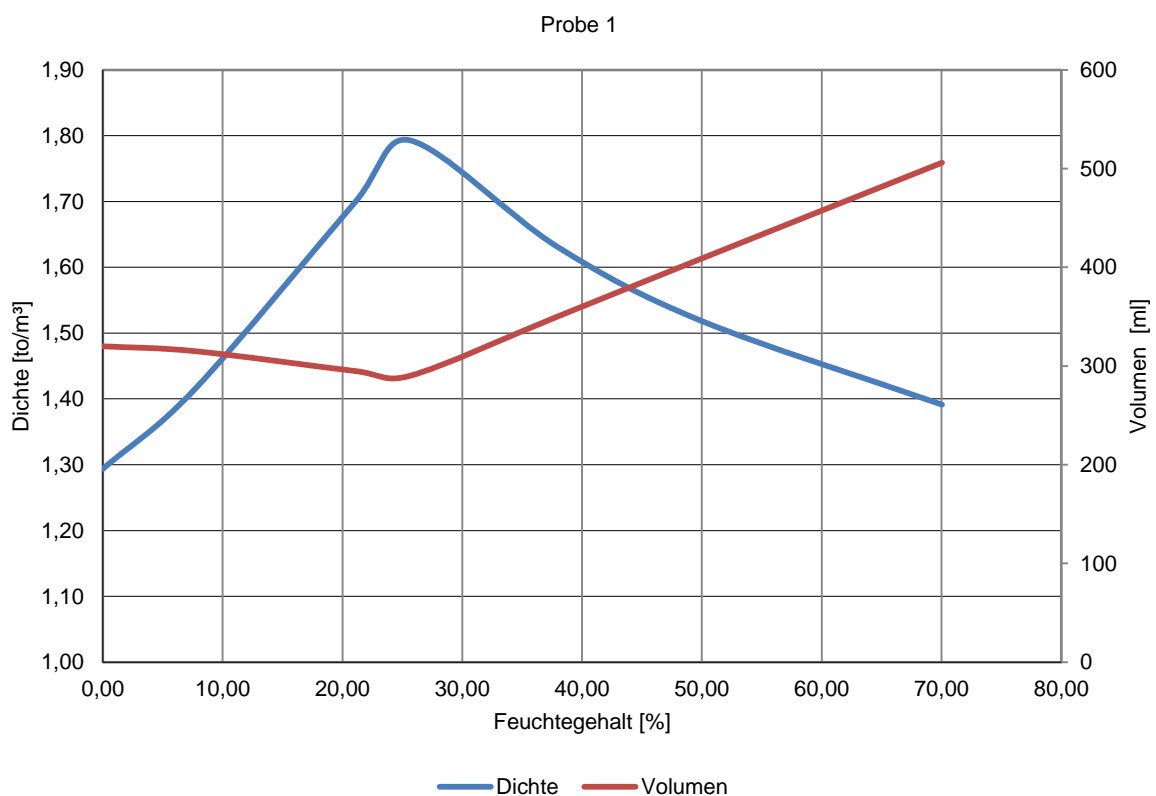


Abbildung 62: Probe 1

### 8.1.3 Probe 2 Tabellarische Auswertung

Tabelle 27: Probe 2

Anfangsvolumen:		200ml	Tara	414g
Gewicht	Volumen	Wassermenge	Dichte	Feuchtegehalt
g	ml	ml	to/m3	%
672	200	0	1.29	0.00
731	190	59	1.67	22.87
761	200	89	1.74	34.50
807	240	135	1.64	52.33
890	320	218	1.49	84.50

### 8.1.4 Probe 2 Proctordichteverlauf

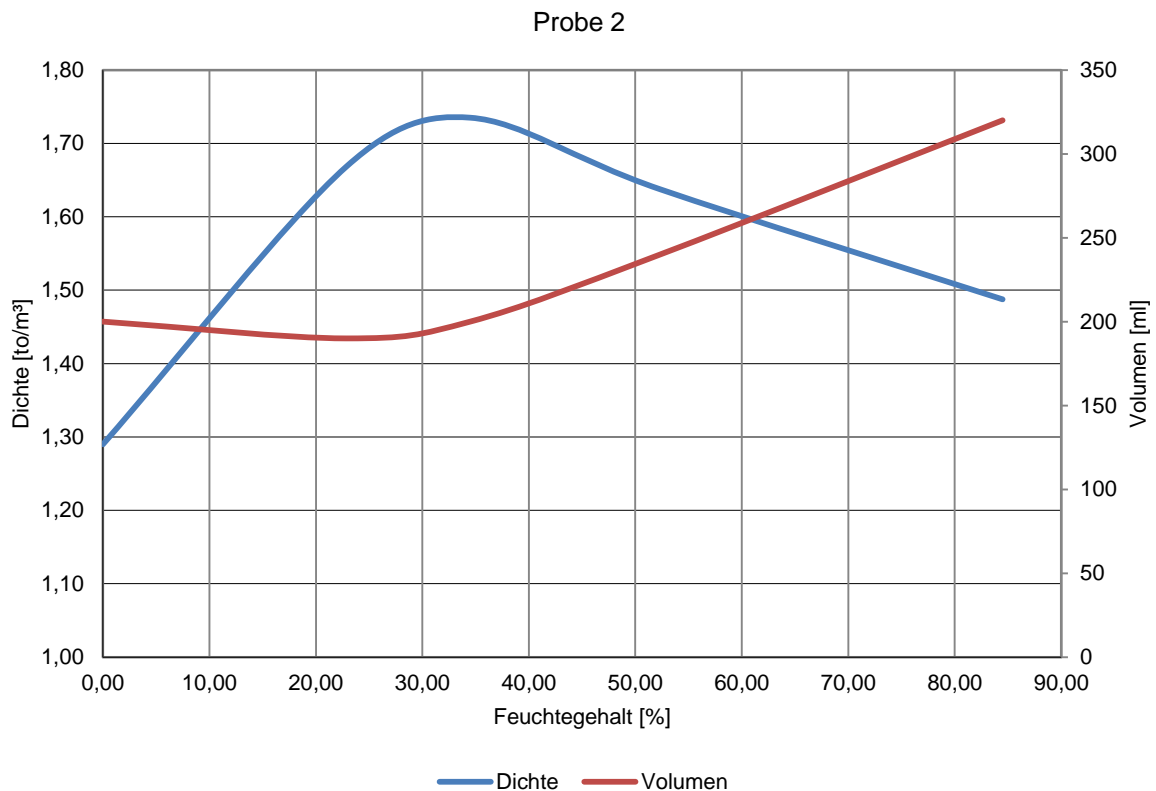


Abbildung 63: Probe 2



### 8.1.5 Probe 3 Tabellarische Auswertung

Tabelle 28: Probe 3

Anfangsvolumen:		200ml	Tara	414g
Gewicht	Volumen	Wassermenge	Dichte	Feuchtegehalt
g	ml	ml	to/m3	%
678	200	0	1.32	0.00
690	200	12	1.38	4.55
736	195	58	1.65	21.97
752	190	74	1.78	28.03
796	210	118	1.82	44.70
862	300	184	1.49	69.70
924	360	246	1.42	93.18

### 8.1.6 Probe 3 Proctordichteverlauf

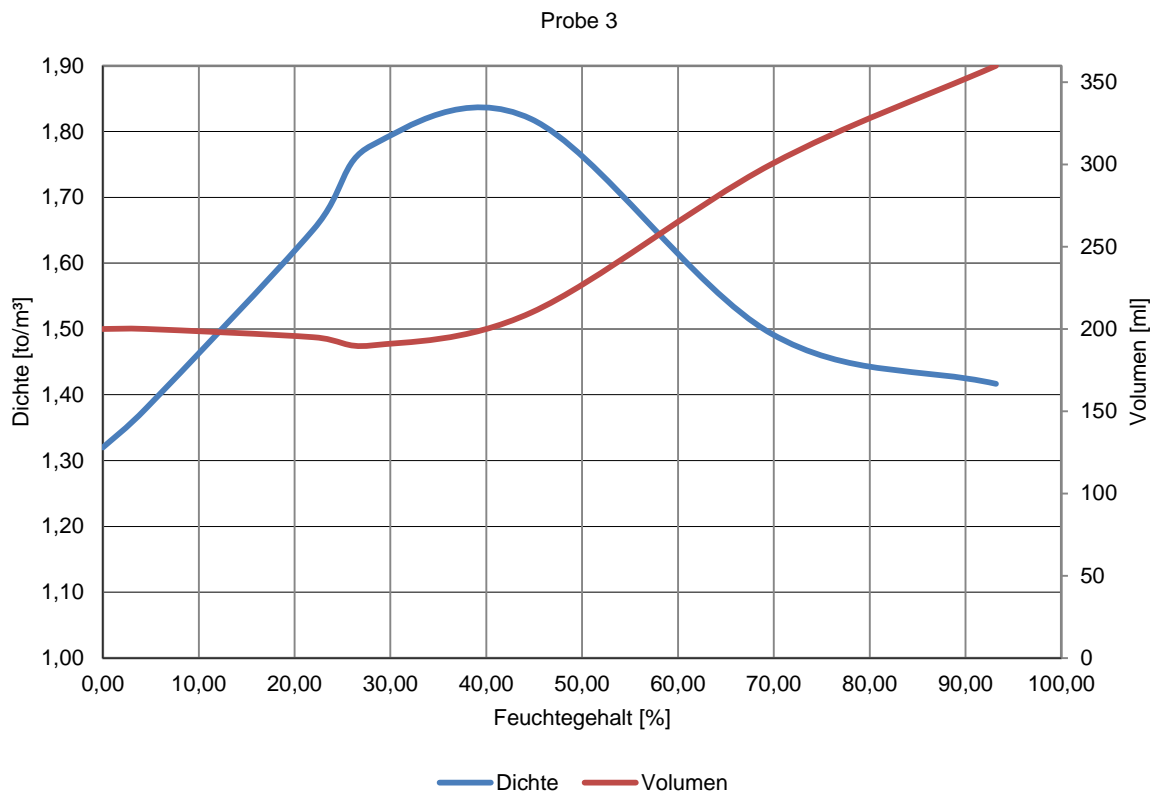


Abbildung 64: Probe 3

### 8.1.7 Probe 4 Tabellarische Auswertung

Tabelle 29: Probe 4

Anfangsvolumen:		200ml	Tara	405g
Gewicht	Volumen	Wassermenge	Dichte	Feuchtegehalt
g	ml	ml	to/m3	%
920	400	0	1.29	0.00
951	400	31	1.37	6.02
1065	390	145	1.69	28.16
1159	410	239	1.84	46.41
1309	590	389	1.53	75.53

### 8.1.8 Probe 4 Proctordichteverlauf

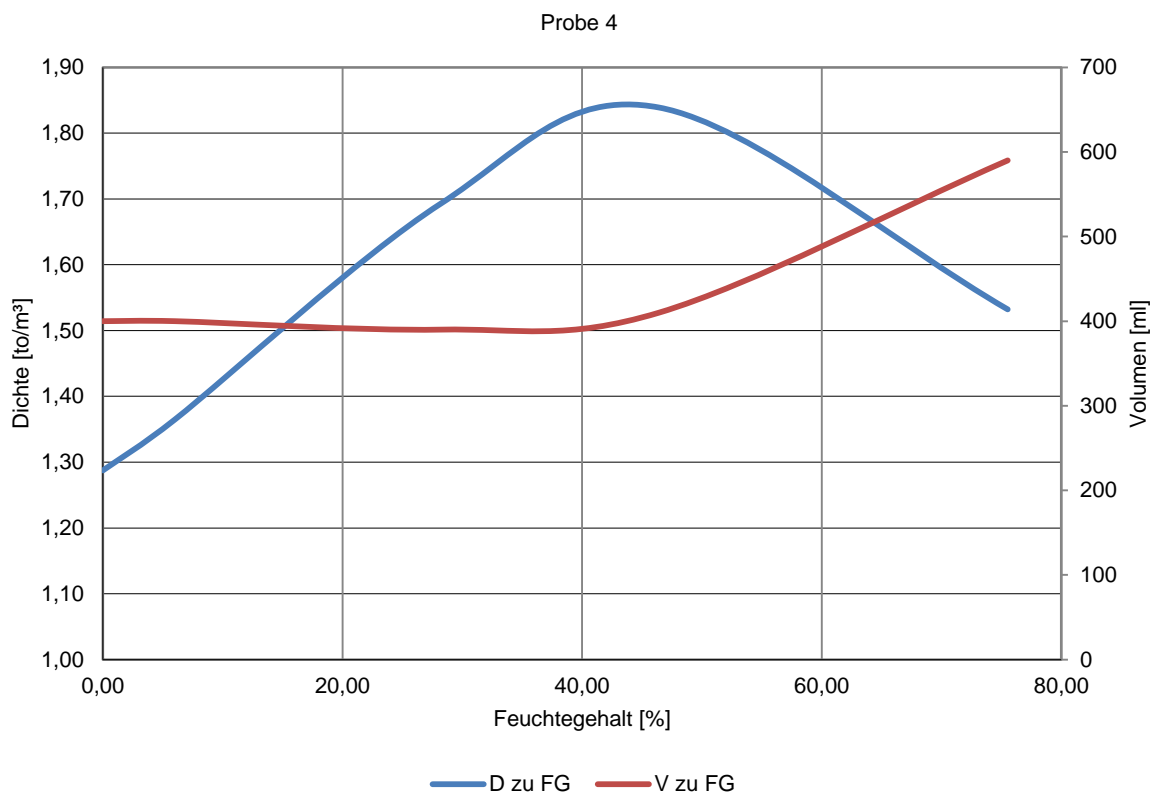


Abbildung 65: Probe 4

### 8.1.9 Feinanteile Tabellarische Auswertung

Zusätzlich wurde eine Analyse der Feinanteile <1mm durchgeführt.

Tabelle 30: Feinanteil

Anfangsvolumen:		1000ml	Tara	180g
Gewicht	Volumen	Wassermenge	Dichte	Feuchtegehalt
g	ml	ml	to/m3	%
1274	1000	0	1.09	0.00
1297	1000	23	1.12	2.10
1345	1000	71	1.17	6.49
1404	990	130	1.24	11.88
1488	980	214	1.33	19.56
1625	950	351	1.52	32.08
1742	990	468	1.58	42.78
1821	1060	547	1.55	50.00
1987	1200	713	1.51	65.17
2144	1340	870	1.47	79.52
2240	1450	966	1.42	88.30

### 8.1.10 Feinanteil Proctordichteverlauf

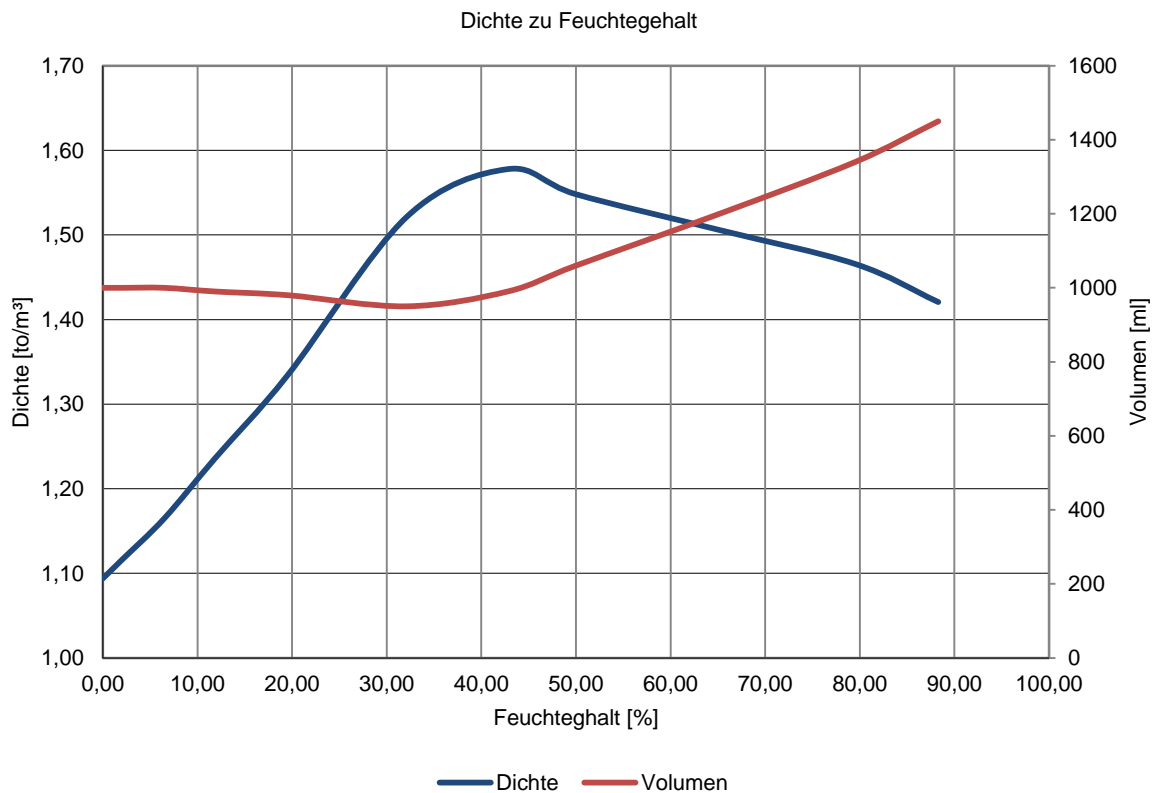


Abbildung 66: Feinanteil

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Linienführung der Gotthardbahn ( (Academic, 2012), bearbeitet: Kuc)	15
Abbildung 2: Veranschaulichung der Linienführung ((Academic, 2012), bearbeitet: Kuc)	17
Abbildung 3: Schienentransportaufkommen an Alpenübergängen (Diagramm: Kuc, Quelle: (BAV, 21.01.2011))	18
Abbildung 4: Straßentransportaufkommen an Alpenübergängen (Diagramm: Kuc, Quelle: (BAV, 21.01.2011))	18
Abbildung 5: Finanzierung der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs (FinöV) (Quelle: (AlpTransit, 12/2011))	20
Abbildung 6: NEAT - Achse Gotthard (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	21
Abbildung 7: Systemschema des GBT (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	22
Abbildung 8: Flucht- und Rettungskonzept (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	23
Abbildung 9: Multifunktionsstelle Faido (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	23
Abbildung 10: Sicherheitskonzept (Quelle: (AlpTransit, 2012)	24
Abbildung 11: Längsschnitt und Geologie (Quelle: (Alp Transit, 12/2011), bearbeitet: Kuc)	25
Abbildung 12: Linienführung des GBT (Quelle: (TAT, 2011) und (AlpTransit, 2012))	26
Abbildung 13: Vergleich Höhenschnitt (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	27
Abbildung 14: Baustelle Bodio (Quelle: (TAT, 2011) bearbeitet: Kuc)	28
Abbildung 15: Baustelle Faido (Quelle: (TAT, 2011) und bearbeitet Kuc)	29
Abbildung 16: Querschnitt des EST (Quelle: (TAT, 2011))	30
Abbildung 17: Querschnitt des EST (Quelle: (Alp Transit, 12/2011))	31
Abbildung 18: Baustellen des GBT (Kuc)	40
Abbildung 19: Materialherkunft Jan. - Dez. 2011	40
Abbildung 20: Materialherkunft Übertage Jan. - Dez. 2011	41
Abbildung 21: Schlammabsaugung (KUC)	43
Abbildung 22: Schlammstadien (KUC)	43
Abbildung 23: Rotationskippe (Kuc)	44
Abbildung 24: Schema der Kläranlage (Kuc)	45
Abbildung 25: Schlammboxen (Kuc)	47
Abbildung 26: Belastung mit KW im Zeitraum Mitte 2008 bis Dez. 2011	49
Abbildung 27: Boxplot der analysierten Proben des Zeitraumes 2008 - 2012	49
Abbildung 28: KW inkl. Deponiegrenzwerten 2008 - 2011	50
Abbildung 29: Boxplot der analysierten Proben für das Jahr 2011	50
Abbildung 30: KW inkl. Deponiegrenzwerten 2011	51
Abbildung 31: Deponierte Massen im Jahr 2011	52
Abbildung 32: Gesamtkosten für das Jahr 2011	53
Abbildung 33: Vergleich Waage Bodio mit Waage Deponie	54
Abbildung 34: Querschnitt Schlammbox (Kuc)	57
Abbildung 35: Graphische Darstellung der Proctordichte	59
Abbildung 36: Siebkurve	61
Abbildung 37: Proctordichte + Z-Hallen-Wert	62
Abbildung 38: Messstation und Portal Süd	63
Abbildung 39: Schlammmasse und Niederschlag	64
Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 1	65
Abbildung 41: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 2	65
Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 3	66
Abbildung 43: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 4	66
Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schlamm 5	67
Abbildung 45: Summe Niederschlag Jan-Sep. 2011	68
Abbildung 46: Ansichten einer Standard BOX	68
Abbildung 47: Modellierung der Oberfläche	69
Abbildung 48: Summe Verdunstung Jan-Sep. 2011	70
Abbildung 49: Differenz zwischen Verdunstung und Niederschlag Jan – Sep. 2011	70
Abbildung 50: Erster Trocknungsversuch (Kuc)	76
Abbildung 51: Ansichten der Rohrhilfskonstruktion (Kuc)	77
Abbildung 52: Optimierte Versuchsanordnung (Kuc)	78
Abbildung 53: Feuchteverteilung innerhalb des Schlammhaufens (Kuc)	78
Abbildung 54: Vorschlag zur Trocknung (Kuc)	81
Abbildung 55: Verfahren der Thermischen Behandlung (Quelle: (Eisenmann, 2008))	82
Abbildung 56: Drehrohrföfen (Grafik: (Eisenmann, 2008) bearbeitet Kuc)	83
Abbildung 57: Wirbelschichtföfen (Grafik (Eisenmann, 2008))	84
Abbildung 58: Schematische Darstellung der Schlammmentsorgung über die Industrie (Kuc)	86
Abbildung 59: Herstellungsprozess des Zementes mit Schlammbeimengung (Kuc)	86
Abbildung 60: Herstellungsprozess bei der Ziegelproduktion (Kuc)	87
Abbildung 61: Schematische Darstellung der Abfallwirtschaft (Kuc)	94

Abbildung 62: Probe 1	95
Abbildung 63: Probe 2	96
Abbildung 64: Probe 3	97
Abbildung 65: Probe 4	98
Abbildung 66: Feinanteil	99

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug aus "Analysenmethoden für Feststoff - und Wasserproben" BAFU 2008	36
Tabelle 2: Gesetzliche Vorschriften für belastete Schlämme in der Schweiz (Schneebeli, et al., 2006)	37
Tabelle 3: Maßgebend Grenzwerte zur Beurteilung der Belastung von Schlämmen (Schneebeli, et al., 2006)	38
Tabelle 4: Gesamt verbautes Betonvolumen	41
Tabelle 5: zur Verfügung stehende Deponien	51
Tabelle 6: Deponiekosten des Jahres 2011	52
Tabelle 7: Schlamm im Bereich des Wurmes	55
Tabelle 8: Schlammanalyse Saugzug	56
Tabelle 9: Schlammanalyse Z-Halle	57
Tabelle 10: Ergebnisse des Proctorversuches	59
Tabelle 11: Berechnung von LKW-Einheiten	60
Tabelle 12: Verifizierung der Dichte	60
Tabelle 13: Siebdurchgang	61
Tabelle 14: Durchschnittswerte des Z-Hallen-Schlammes	62
Tabelle 15: Zusatzkosten durch Niederschlag	69
Tabelle 16: Vergleich Deponie und TAT Massen (Stand Dezember 2011)	71
Tabelle 17: geschätzte Schlamm Masse	72
Tabelle 18: Berechnung der Abweichung	72
Tabelle 19: Berechnung des Tunnelwasser-Jahresvolumens	73
Tabelle 20: Massen sowie Kosten der Kläranlage Bodio	73
Tabelle 21: Vor Trocknung	79
Tabelle 22: Nach Trocknung	79
Tabelle 23: Durchschnittliche Verbesserung gegenüber unbehandeltem Schlamm	79
Tabelle 24: Einsparpotential durch Trocknung	80
Tabelle 25: Vergleich aller Entsorgungsmöglichkeiten	91
Tabelle 26: Probe 1	95
Tabelle 27: Probe 2	96
Tabelle 28: Probe 3	97
Tabelle 29: Probe 4	98
Tabelle 30: Feinanteil	99

## 11 Literaturverzeichnis

**Abfallwirtschaftsgesetz. 2012.** Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - AWG 2002). *Bundeskanzleramt Rechtsinformationssystem*. [Online] 16. 05 2012. [Zitat vom: 2012. 05 16.] <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086&ShowPrintPreview=True>.

**Academic. 2012.** academic.ru. [Online] 2012. [Zitat vom: 12. 02 2012.] <http://de.academic.ru/dic.nsf/eisenbahnwesens/1264/Gotthardtunnel>.

**Alp Transit, Gotthard. 12/2011.** *Neue Verkehrswege durch das Herz der Schweiz*. 12/2011.

**Alpeninitiative. 2012.** Alpeninitiative. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. Februar 2012.] <http://www.alpeninitiative.ch/>.

**AlpTransit. 2012.** Alptransit. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. Februar 2012.] <http://www.alptransit.ch/>.

**Altec. 2012.** altec.at. [Online] 2012. [Zitat vom: 20. 04 2012.] <http://www.altec.at/leistungsspektrum/kontaminierte-boeden/>.

**BAFU. 2008.** *Analysemethoden für Feststoffe- und Wasserproben*. [pdf] s.l. : Bundesamt für Umwelt, 2008.

**BAV, Bundesamt für Verkehr. 21.01.2011.** *Alpenquerender Güterverkehr auf Strasse und Schiene*. [PDF] s.l. : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 21.01.2011.

— **2011.** *Alpinfo 2009*. 2011.

**ChemRRV. 2011.** admin.ch. [Online] 1. 08 2011. [Zitat vom: 20. 04 2012.] <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.81.de.pdf>.

**Eisenmann. 2008.** *Abfall - Entsorgung (Recycling Verwertung Beseitigung)*. 2008.

**Fellendorf, Martin und Luhan, Friedrich. 2011.** *Seminar Konfliktmanagement SS 2011*. Technische Universität GRAZ : s.n., 2011.

**Hitz, Arthur, et al. 2006.** *Verwertung belasteter Schlämme aus dem Gotthard-Basistunnel*. [Pdf] Montanuniversität Leoben : s.n., 2006.

**Holcim, AG. 2011.** *Nachhaltigkeitsbericht Daten und Fakten 2008 - 2010*. Zürich : s.n., 2011.

— **2012.** Verwertung von Reststoffen in der Zementherstellung. [Online] 10. 04 2012. [Zitat vom: 10. 04 2012.] <http://www.holcim.ch/de/editorials/verwertung-von-reststoffen-in-der-zementherstellung.html>.

**Maydl, Peter und Prabitz, Jason. 2007.** *Baustofflehre VA*. Technische Universität Graz : s.n., 2007.

**Schneebeli, Walter, et al. 2006.** *Verwertung belasteter Schlämme aus dem Gotthard-Basistunnel*. Luzern, Zollikon : s.n., 2006.

**Sinniger, Richard und Fechtig, Robert. 2006.** *NEAT - Eine Schweizer Pionierleistung*. s.l. : Stäubli, 2006.

**TAT, Consorzio. 2011.** *Informationensammlung*. Bodio, Faido : s.n., 2011.

**TVA. 2011.** *Technische Verordnung über Abfälle*. s.l. : Schweizer Bundesrat, 2011.

**Umwelt-Lexikon. 2012.** umweltdatenbank.de. [Online] 2012. [Zitat vom: 10. 04 2012.] <http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/vakuumdestillation.htm>.

**Wissenschaften, Lexikon der. 2012.** wissenschaft-online.de. [Online] 2012. [Zitat vom: 12. April 2012.] <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo/12758>.

**Zementwerke, Verein Deutscher. 1999.** *Die Bedeutung des Chromates in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen.* 1999.