



Research  
Tunnel Engineering—Review

## 软土机械化隧道开挖——冰积层开挖模式的选择与土壤改良添加剂的运用

Rolf Zumsteg<sup>a,\*</sup>, Lars Langmaack<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Gruner AG, Basel 4020, Switzerland

<sup>b</sup> Normet International Ltd., Hünenberg 6331, Switzerland

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 29 March 2017

Revised 21 August 2017

Accepted 22 September 2017

Available online 29 November 2017

#### 关键词

土壤改良

土压平衡盾构

泥水盾构

机械化隧道开挖

### 摘要

高山区地层历史受冰川活动影响，冰川活动对该区域地下工程的影响很大。机械化隧道开挖必须适应可靠和蚀变岩石，必须适应同一条隧道沿线软硬不均土层（透水砾石—软黏土沉积物）。本文主要介绍在瑞士使用隧道掘进机（TBM）的经验，重点介绍穿越软硬不均软土过程中的土壤改良问题。过去大部分隧道均采用泥水模式（SM）掘进，该模式下不同添加剂的使用主要限于高渗透性困难地段和更换工具及改装等需要停止掘进时。对于不太常见的土压平衡模式（EPBM）掘进，连续泡沫改良及额外采用聚合物和膨润土经证明是成功的。调节添加剂的使用使泥浆分离（对于SM）和开挖土料处理（对于EPBM）时面临新的挑战。如果在设计和开挖模式评估阶段提前考虑按符合环境法律规定的方式处理土压平衡（EPB）掘进过程中产生的经化学处理的软土料，则EPBM有利于冰积层隧道掘进施工。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

软土中地下水位以上和以下的机械化隧道开挖有两种主要作业模式，采用泥水模式（SM）施工时，隧道开挖面的支护辅助以膨润土泥浆；采用土压平衡模式（EPBM）施工时，直接用开挖土料向开挖面传导稳定压力。泥水盾构的发展始于20世纪70年代的日本，之后很快频繁地被欧洲所采用[1]。1974年，日本首次采用土压对盾构进行支护。随后在亚洲的数个项目中采用了此方法，然后这一技术于20世纪80年代初传入欧洲。由于这种方法潜力巨大，这一技术的研发受到大力推动。开挖过程中注入的化学土壤改良剂（如泡沫和聚合物）的研制和运用使这一技术的应用极限不断得到拓展。

目前，高山区的许多隧道仍采用泥水支护进行掘进。其使用与全球趋势不一致，世界上生产的用于软土开挖的隧道掘进机（TBM）中，超过90%为土压平衡式掘进机[2]。一般来说，TBM的设计越来越倾向于在同一台TBM上优化，采用各种组合开挖模式[3]。双模式或多模式TBM能够在数分钟或数秒钟内在敞开模式与密闭模式之间自由转换[4]。事实上，泥水、土压平衡组合模式和这两种模式的切换能力可在同一台掘进机上实现。

本文介绍了在瑞士松散岩土中机械开挖大直径隧道的经验，重点介绍土壤改良问题。本文探讨的项目均具有以下共性：地质条件不均一；土层大多粒径分布不均，超出开挖方法的原始最优作业范围。本文着重强调

\* Corresponding author.

E-mail address: [rolf.zumsteg@gruner.ch](mailto:rolf.zumsteg@gruner.ch) (R. Zumsteg).

瑞士采用特殊土压平衡（EPB）模式大直径隧道开挖中所用化学药剂的作用，从中得出一些结论，给未来类似土壤条件下的施工项目提供借鉴。

## 2. 背景

### 2.1. 土壤改良要点

就地质条件而言，泥水盾构和EPB盾构均有最优（或原始）应用范围。判断一种方法是否合适通常以原位土壤的粒径分布为依据[2,5-7]。

高渗透性岩土中采用泥水盾构法开挖时，单纯用膨润土悬浮液无法保证形成必需的滤饼。必须加入填料或高分子量聚合物才能维持隧道开挖面的压力[8,9]。开挖黏性土时，在开挖过程中，各个部位（如刀盘、泥水回路或泥水分离设备）均存在阻塞风险。这种情况下，可添加聚合物来降低阻塞的可能性[10]。特别是采用分散聚合物可改变膨润土悬浮液的流变性[11]，同一洞段内普遍存在不同土层时，这种流变性会带来一些弊端。EPB盾构法要求土壤中要有一定的细粒材料（粒径小于0.06 mm的材料至少达到10%）。细粒含量可保证泥土具有一定程度的内聚力和阻力，从而实现其作为开挖面支护介质的功能。细粒含量太低时，可添加高分子量聚合物、膨润土或填料。大多数EPB掘进还使用泡沫添加剂来减少掘进机的磨损、阻力和压力波动。通过泡沫发生器输送表面活性剂使其体积扩大10~20倍，然后注入刀盘处，表面活性剂可抵抗机械损坏。表面活性剂具有优化土壤膏状性能的作用。添加不同土壤改良剂的全球经验使这些开挖方法的应用范围不断得到扩展。有许多化学添加剂可用于地下工

程，表1列出了使用的主要聚合物类别及其特性和应用。这些聚合物的工作机制有所不同，除黏土与聚合物之间的静电作用外，吸附作用、离子交换过程与络合反应也可发挥一定的作用[12]。

### 2.2. 土壤改良研究

由于土壤改良剂对隧道开挖实践的重要性和潜力越来越大，全世界都在大力研究土壤改良剂对土壤性能的作用。自Milligan发布技术现状报告[13]以来，许多采用标准实验装置的实验室和其他采用新研发装置的实验室[14,15]，均进一步探明了不同产品的工作机理及不同土壤相应生成的土壤性状[16,17]。在这些进步的基础上，对在富含黏土土壤中开挖隧道的阻塞可能性及缓解措施进行了评估[18]，对新型化学物的工作机理和研发进行了分析[12,19]。并特别关注了压力仓内土壤性能的测量和建模[20-22]。本文对瑞士运用土壤改良剂的情况进行综述，未涵盖近年来土壤改良方面的所有进步与研究成果。

### 2.3. 环境方面

使用聚合物等化学添加剂会产生经化学处理的土料。每一个项目均须对所使用物质的环境影响（特别是对地下水的影响）进行风险分析。一般来说，所使用的化学物的生态相关性相对较小[23]。这些产品对环境的影响按其毒性对水生生物的影响（ $LC_{50}^{\dagger}$ 和 $EC_{50}^{\ddagger}$ 值）及其生物降解特性的影响进行评判。一般来说，由于其对水面张力的影响，泡沫对于水生生物更加危险，其 $EC_{50}$ 值更低（10~100  $mg \cdot L^{-1}$ ，但当前产品的值更高）。表面活性剂通常能进行生物降解，可在较短时间内降

表1 地下工程使用的聚合物种类概览

Group	Properties and application
Polysaccharides (e.g., xanthan and guaran)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High-viscosity polymers, mainly used as an additive for bentonite suspension</li> <li>• Xanthan: thixotropic behavior</li> <li>• Guaran: reduction of filtrate loss</li> </ul>
Cellulose ether (e.g., carboxymethyl cellulose (CMC) or polyanionic cellulose (PAC))	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulator of viscosity and filtrate loss</li> <li>• Effect is strongly dependent on the molecular weight, polymer charge, and charge distribution</li> </ul>
Polyacrylamide (PAM) and partially hydrolyzed polyacrylamide (PHPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulator of viscosity and filtrate loss</li> <li>• Anionic, non-ionic, or cationic</li> <li>• Effect is variable with polymer concentration, charge, and molecular weight</li> </ul>
Polyacrylates	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anionic, often sodium polyacrylates</li> <li>• Low molecular weight polymers act as dispersants; high molecular weight polymers can enhance viscosity</li> </ul>

<sup>†</sup> LC50 refers to lethal concentration 50; that is, this concentration of the test substance in water is lethal for 50% of the tested organisms during the test period.

<sup>‡</sup> EC50 refers to effect concentration 50; that is, this concentration of the test substance in water causes effects in 50% of the tested organisms during the test period.

解。相比之下，聚合物的生物降解速率较低， $EC_{50}$ 值较高。因此，聚合物可被归入对人类和环境无害的物质。

### 3. 瑞士机械化隧道开挖的经验

#### 3.1. 概况

Grauholz隧道建于1989—1993年，采用混合式盾构，是瑞士第一条大直径（> 10 m）松散岩土掘进机开挖隧道[24,25]。1999年建设的Oenzberg隧道和2000—2001年建设的Zimmerberg基线隧道的松散岩土段均采用SM进行TBM开挖[26]。2007年，瑞士安装了第一台，也是当时唯一的一台大直径土压平衡TBM，用于Biel附近Büttenberg隧道和Längholz隧道的开挖[6,27]。为了开挖Weinberg隧道（2013年）和Eppenbergtunnel，最近又安装了泥水盾构TBM[28]。瑞士的隧道均穿越岩石段（通常为磨砾层）和特性各异的软硬不均松散岩土段（图1）。隧道沿线地下水位通常也有所变化。

表2[6,24,26,27]概括了这些隧道的直径，简单描述了各隧道遇到的地质条件。图2显示了相应的刀盘。除大直径隧道外，还用TBM开挖了5~10 m直径的隧道，比如图恩湖泄洪洞（直径为6.3 m）和苏黎世机场处的人行隧道（直径为6.3 m）。这些小型隧道的工作面多成功采用SM进行支护。对于图恩湖泄洪洞，地下水位以

下的高渗透性砾石利用重膨润土悬浮液（即配合比高达 $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）进行支护。

#### 3.2. 泥水盾构

##### 3.2.1. Grauholz 隧道

Grauholz隧道沿线的地质条件受冰积层影响很大，软硬十分不均。隧道开挖穿越了地下水位以上和以下的冰碛物以及隧道中部的大部分磨拉石[25]。高渗透性、粉土含量低（< 6%）的部分砂砾占主导地位。级配曲线带宽如图3所示。

泥水支护法开挖过程中未遇到重大问题。然而，在高渗透性岩土中更换工具具有很大的挑战性。这种情况下，通过施加空气压力来保证工作面的稳定。有两种情况下，隧道开挖面发生了失稳。为了防止停止掘进导致空气损失，对支护用泥水进行了以下改良[25]：

（1）通过仅对泥水进行部分分离，人为地使悬浮液中粉土含量保持在高水平，含细粒的泥水密度变大，保证了较小的泥水穿透深度。

（2）向膨润土悬浮液中添加锯末和聚合物导致孔洞的阻塞和密封，人工创造的膜有助于保证隧道开挖面的稳定。

##### 3.2.2. Zimmerberg 基线隧道

Zimmerberg基线隧道沿线遭遇了冰碛石、砾石和黏

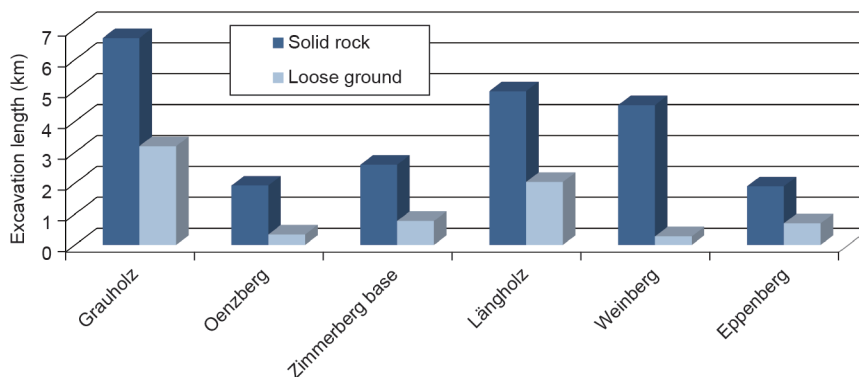


图1. 瑞士的大直径（> 10 m）、松散岩土段和必需的全断面支护的TBM开挖隧道汇总。

表2 瑞士松散岩土大直径隧道的直径和地质概况（参考文献[6,24,26,27]）

Tunnel	TBM	Diameter	Geology
Grauholz	Mix shield	11.60 m	Molasse, Quaternary gravels, sands
Oenzberg	Mix shield	12.30 m	Molasse, moraine, glacial and fluvial gravels, sands
Zimmerberg base	Mix shield	12.36 m	Molasse, fluvial gravels, lacustrine clays
Längholz	EPB shield	12.60 m	Molasse, lacustrine clays, moraine, silty sands
Weinberg	Mix shield	11.20 m	Molasse, gravel, moraine, lacustrine clays
Eppenbergtunnel	Mix shield	12.75 m	Molasse

土层组成的混合物(图4)[9]。特别是这些砾石的渗透性非常高( $k > 1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),有块石和漂石互层。该洞段部分位于地下水位以下。

由于存在高渗透性地带,泥水支护的可靠度具有不确定性。因此,泥水支护开挖期间采取了以下措施[26]:

(1) 采用膨润土( $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )、砂( $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )、聚合物(煤胶体C190,  $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )和哌嗪(膨胀蛭石,  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )对泥水进行部分改良。与聚合物和砂一起使

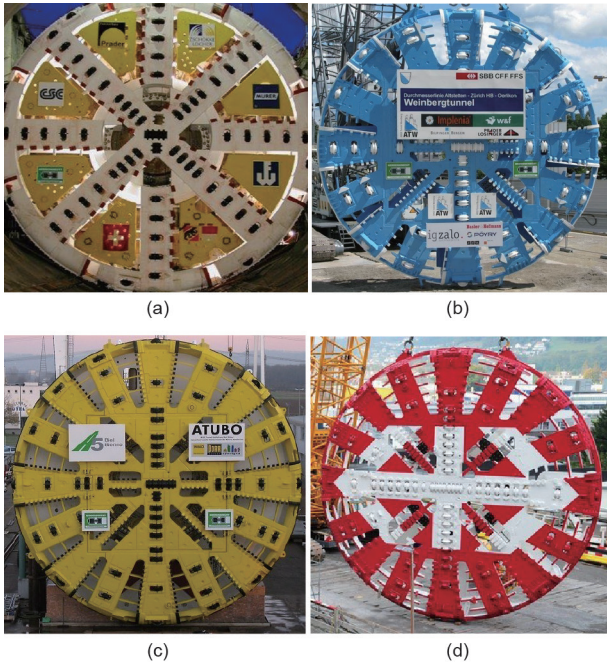


图2. (a) Zimmerberg基线隧道(1999年)和Oenzberg隧道(2001年)使用的刀盘; (b) Weinberg隧道(2008年)使用的刀盘; (c) Büttenberg隧道和Längholz隧道(2008年)使用的刀盘; (d) Eppenbergtunnel(2016年)使用的刀盘。

用时,蛭石对砾石孔洞的阻塞和滤饼的形成有影响。由于使用了添加剂,大大阻碍了泥水的分离过程;因此,箱式压滤机的性能限制了开挖的效率。因此,只有在特殊情况下才使用经改良的悬浮液。

(2) 其他额外的支护措施(如注浆)确保停止掘进和盾头更换工具时工作面坍塌和严重沉降的风险较低。

### 3.2.3. Weinberg 隧道

Weinberg隧道穿越上层磨拉石,有280 m的洞段穿越特性各异的松散土层。冰川底砾(含漂石和部分细砂)上覆黏土层。还观测到高渗透性( $k = 3 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )Limmattal砾石。初步试验中确定了不同地质条件下采用的支护泥水的组成,汇总在表3中[28]。

高渗透性地带的开挖未遇到重大问题,但存在以下小问题:

- (1) 开挖开始后,泥水回路管道接头处出现泄漏;
- (2) 由于箱式压滤机的性能不佳和土层中细粒含量较高,磨拉石中的开挖速度较小( $3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ );
- (3) 由于土壤阻塞钻头需要冲洗加以清除,出现长时间的开挖中断;
- (4) 空气压力进口处黏土层的压力损失;
- (5) 地基中既有结构构件(如挡土墙或泥水墙)造成的磨损和阻碍。

## 3.3. EPB 盾构

### 3.3.1. Längholz 隧道松散地段的地质条件

Längholz隧道沿线的地质条件也具有软硬不均的特

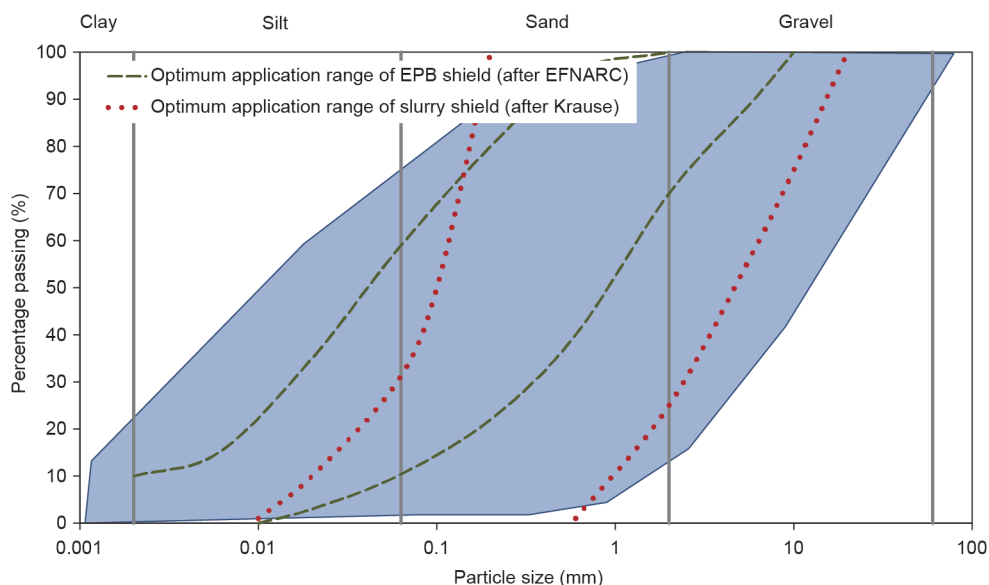


图3. Grauholz隧道级配曲线带宽(参考文献[25])。

点[6,27]。共发现12个不同的土层，包括砾石、粉砂和湖积黏土。这些土料是在末次冰期沉积而成的，因此已预固结。同一洞段内，特性各异的不同土层占主导地位。此外，水文条件为困难条件，地下水位介于洞顶上方3~10 m。图5显示了不同土层级配曲线的带宽，该带宽是采用不同钻孔材料在实验室进行确定的。在垂直

覆盖层最下部约6 m厚度范围内，有两大不同的土层占主导地位（砂砾层和砂质粉土层）。各土层单独看级配曲线，不是EPB掘进的理想条件，但整个断面（结合两个土层）的级配曲线位于最优范围内（图5）。对于EPB掘进，整个隧道断面混合土料的特性非常重要，可抵消问题土层的极端特性（如高渗透性）。

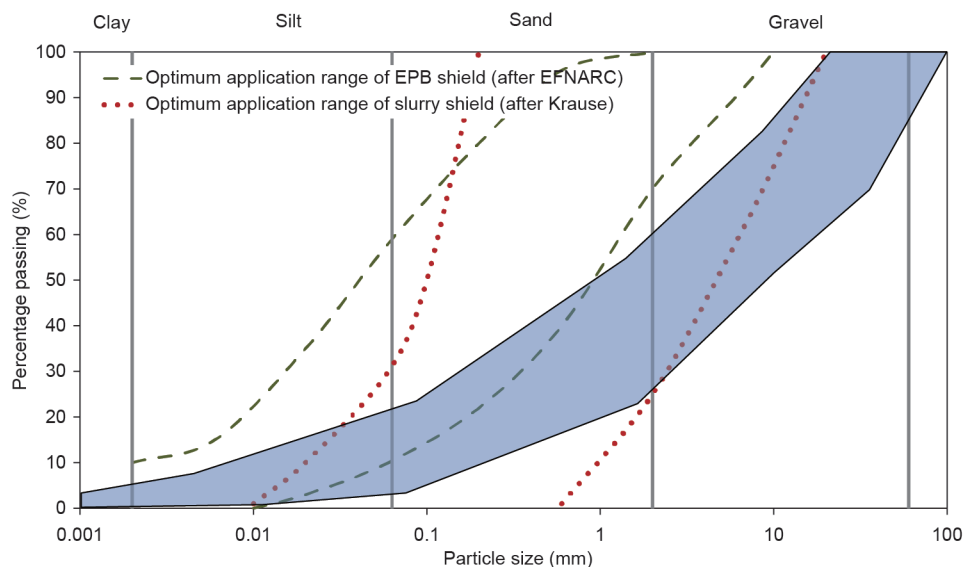


图4. Zimmerberg基线隧道级配曲线带宽（参考文献[9]）。

表3 Weinberg隧道开挖采用的泥水（参考文献[28]）

Soil layer	Slurry used
Molasse	Water + bentonite ( $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Moraine	Water + bentonite ( $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Clay deposits/gravels	Water + bentonite ( $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Soil layers/gravels with $k > 1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Possible addition of Ibeco Seal or the polymer Carbogel C190

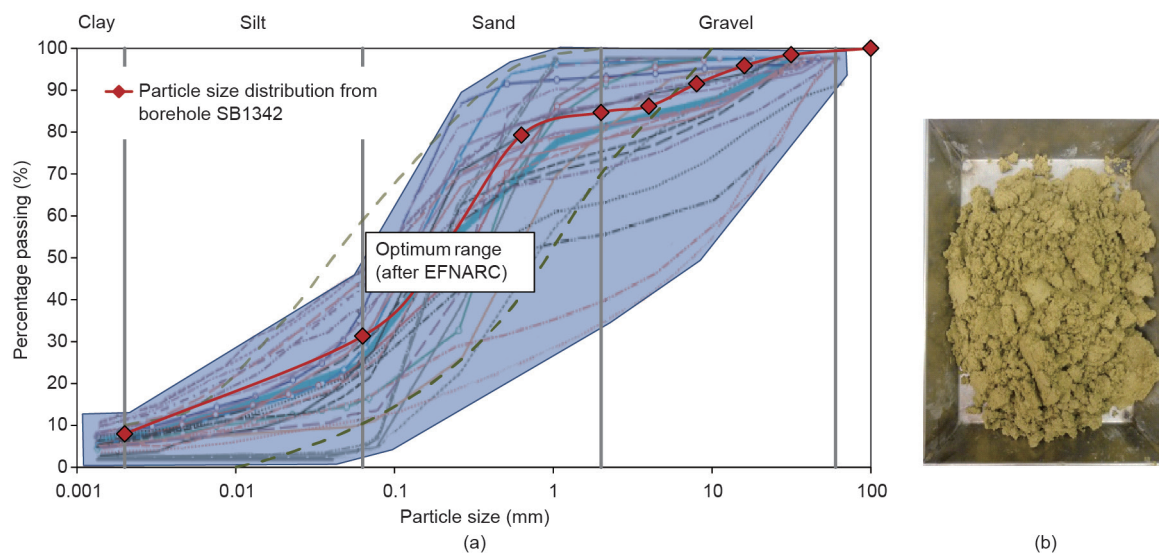


图5. (a) 松散岩土段沿线不同土层的级配曲线带宽与SB1342处洞段平均级配曲线带宽；(b) 原位含水量土样（粒径为4 mm）。

### 3.3.2. 改良对土壤特性的影响

为了维持开挖过程中的支护压力，可注入改良剂。注入改良剂产生的主要效果如下：

(1) 加入的泡沫保证开挖土体具有一定的压缩性，从而减小压力波动；

(2) 其润滑特性有利于产生更均质的泥浆，使泥浆更均匀地通过机器。

一般基于坍塌度试验、剪切试验、圆锥下降试验等实验室改良试验对最优改良参数进行评估。选用何种试验取决于地质条件和添加化学物想要实现的效果。以下简易坍塌度试验提供了施工现场钻孔SB1342取得的原始土料数据以及使用的其中一种添加剂数据。土壤制备程序采用参考文献[12]给出的一般制备程序。采用霍巴特砂浆搅拌机配制混合料，方法是将不同用量[即泡沫注入比(FIR)]的泡沫与含水量一定的碱性土壤混合在一起进行搅拌。根据这些试验，可估算出土壤改良参数的效率和范围(表4)。

泡沫的效果如图6所示。添加泡沫提高了Biel土壤的气隙比( $V_{\text{空气}}$ )，注入的泡沫相对来说可抵抗压力仓内的机械作用，使泡沫能够融入土壤基质。这导致FIR为20%~40%条件下土壤中的空气体积增加15%~25%(这两个参数均与原位土壤体积有关)。较高的 $V_{\text{空气}}$ 有利于更好地控制仓内压力，其作用与泥水盾构中的气垫类似。

经改良的土料必须通过TBM压入，产生尽可能小的扭矩和磨损。另外，一定的土壤阻力对于保证隧道开挖面的支护压力至关重要，该支护压力确保开挖面稳定以及地表和周围土壤的沉降尽可能小。泡沫改良对钻孔SB1342取得的土样变形特性的积极影响在坍塌扩展度试验中得到了展示(图7和图8)。不添加改良剂时，粉土无塑性。可确定土壤稠度由固态变为液态的临界含水量。该处原位土无塑性指数也证明了这一特性。添加泡沫主要有两种效果：减少了减小土壤阻力需要添加的液体量；使观测特定塑性范围的发展成为可能。

### 3.3.3. 施工现场的注入速率

根据具体地质条件的不同，注入的化学物数量有很大不同( $0 \sim 1.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ )。为了减小环境影响，使注入速率保持在最低水平。在覆盖层较薄的区域，支护压力控制至关重要；在此类区域掘进过程中沉降一般较小，未遇到问题。为了在仓内开展维修工作，需要设置数个常压入口。通过泡沫注入喷枪向仓内注入膨润土悬浮液，以便形成一层膜，施加空气压力，更换工具及改装工具。

### 3.3.4. 处置与环境问题

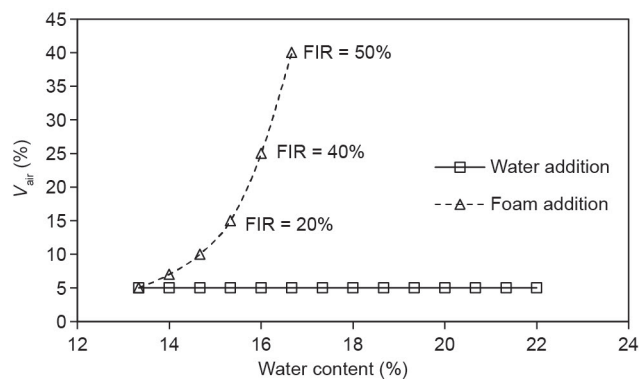
对于Längholz隧道施工现场，在开挖前根据瑞士法规[TVA (F-22)]的规定开展了分批浸出试验。通过这些

表4 实验室试验得到的土壤改良参数

	Parameter
Conditioning chemical	Rheosoil 143
FIR: Injected foam volume related to volume of <i>in situ</i> soil to be excavated (after Ref. [29])	20%–40%
Foam expansion ratio (FER): Volume of foam related to volume of foaming solution (after Ref. [29])	10%
Weight concentration of foaming chemical related to added water-foam mixture	3% (corresponding to $0.6\text{--}1.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ )



(a)



(b)

图6. (a)土样与泡沫混合；(b)添加不同FIR的泡沫对Biel土壤内 $V_{\text{空气}}$ 的影响。

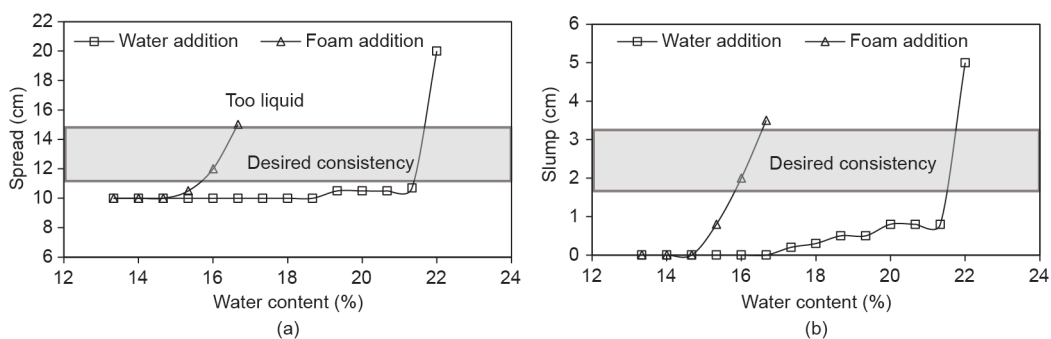


图7. 添加水和泡沫对Biel土壤坍落度的影响（迷你坍落度试验，锥体高度 $H = 60$  mm，锥体下部直径 $D_1 = 100$  mm，锥体上部直径 $D_2 = 70$  mm）。(a) 扩展度；(b) 坍落度。

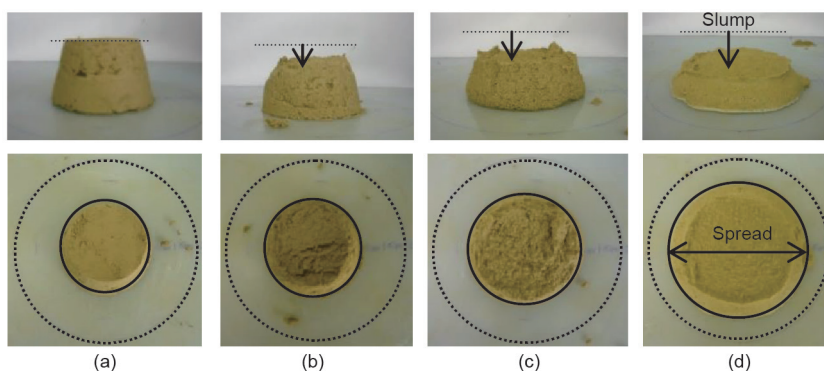


图8. 迷你坍落度试验（锥体高度 $H = 60$  mm，锥体下部直径 $D_1 = 100$  mm，锥体上部直径 $D_2 = 70$  mm）的坍落扩展度试验与不同FIR的混合物（所有混合物的总体含水量相同）。(a)  $FIR=0\%$ ；(b)  $FIR=20\%$ ；(c)  $FIR=40\%$ ；(d)  $FIR=50\%$ 。

试验确定实验室条件下各种添加剂中不同化合物的浸出量。特别值得关注的是溶解有机碳（DOC）的数量；不同等级材料处置的最大浓度均存在对应的DOC阈值。要成为惰性材料，材料中的DOC浓度不宜超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ （分批浸出试验中评估的液体物质的浓度）。进入地下水的DOC最大浓度（ $1 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ）存在对应的阈值（表5）。

表5 DOC最大容许值

	DOC in inert waste	DOC in groundwater
In Switzerland	$20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>a</sup> (B-material <sup>b</sup> )	$1\text{--}4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>c</sup>
In the European Union	$500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry waste <sup>d</sup>	$1\text{--}4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

<sup>a</sup> Evaluated in the leaching test according to TVA (F-22) with distilled water and a liquid/solid ratio of 10:1.

<sup>b</sup> After the Swiss federal regulation *Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen* (December 2015).

<sup>c</sup> After the Swiss federal regulation *Gewässerschutzgesetz* (November 2015).

<sup>d</sup> After the European Environment Agency's guideline *Guidance on Sampling and Testing of Wastes to Meet Landfill Waste Acceptance Procedures* (2005).

通过初步试验测定满足特定处置等级要求的化学物注入临界量。通过开挖过程中的具体沟槽监控对DOC的浓度进行测量，经确认，未超出处置等级对应的具体值。

另一个材料处置问题是软弱（有时几乎为液态）材料的处置，特别是在原位土壤细粒含量低的地质带。如前所述，采用优化的化学物添加法可通过增加塑性、降低水的注入来减小砂土液化的可能性。注入化学物的数量越大，环境污染的程度就越大，处置成本就越高，导致一定的利益冲突。部分开挖料可通过机械方式进行摊铺和压实，如图9所示；但这种机械处理并不总是可行的。

## 4. 结论

瑞士地质条件的变化性要求采用能够适应同一隧道开挖过程中不同土壤组成[如岩石、软岩（磨拉石）和特性各异的各种松散土壤]的开挖方法。TBM技术和化学添加剂的发展大大拓展了机械开挖法的运用范围。这一过程仍在继续；例如，对于高渗透性砂砾中的开挖，最近发展出高密度泥水与聚合物结合的新方法。

对于所有的大直径隧道机械开挖，必须考虑改良剂的应用，不管采用的是哪一种开挖模式（SM或EPBM），必须对其应用进行周密的规划。这些化学物（泡沫和聚合物）的不断发展改善了其应用，增强了土石方工程应



图9. 处置有利稠度的改良土壤。

用中对其特性的控制。在此背景下，其抵抗pH变化和盐的特性及其生物降解特性至关重要。此外，化学添加剂在其环境影响方面不断得到优化；其水生动物毒性值和总有机碳（TOC）的值不断减小。

评估一种开挖方法时，必须研究SM或EPBM的优缺点。现有技术水平下，EPB法具有以下优势：

（1）如果断面上不同土层占主导地位（即混合开挖面条件下），极端条件的土层（如高渗透性土层）不是特别关键。混合工艺产生的人造土壤具有中等特性。

（2）如果地质条件有利于开挖，则TBM的掘进速率不受分离设施和分类工艺的限制。这能够加快掘进速率，降低空间要求，带来经济效益。

及早考虑处置问题对每一个机械开挖隧道项目都特别重要。运用土压平衡TBM会产生大量经化学处理的材料，这些材料必须存放在适当的垃圾填埋场内，避免产生污染地下水的风险。此外，泥水法开挖中应用膨润土和添加剂产生的额外开挖料必须进行处置。尽早对潜在渣场进行评估并开展适当的环境风险分析至关重要，可防止项目后期出现进一步的问题。处置方案中还应考虑开挖后材料稠度的处理，开挖后用石灰或其他和易性改良法对开挖料进行二次处理是有益的。

环境风险分析与考虑改良和处置问题是每一个项目的关键参数；这些因素可影响开挖模式和TBM的选择，因此宜在决定采用EPB还是泥水盾构之前开展环境风险分析并考虑改良和处置问题。项目早期宜保持具体开挖模式的可变性。

## Compliance with ethics guidelines

Rolf Zumsteg and Lars Langmaack declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Herrenknecht M, Thewes M, Budach C. Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart. *Geomech Tunneling* 2011;4(1):11–35. German.
- [2] Maidl B, Herrenknecht M, Maidl U, Wehrmeyer G. *Mechanised shield tunneling*. 2nd ed. Berlin: Ernst & Sohn; 2012.
- [3] Willis D. Nächste Generation Hybrid-TBM für wechselnden Baugrund. *Tunnel* 2013;3(32):20–6. German.
- [4] Bäßler K, Burger W. Innovation track of multi-mode machines for complex ground conditions. In: *Proceedings of the Swiss Tunnel Congress 2016*; 2016 Jun 15–16; Luzern, Switzerland; 2016. p. 122–129.
- [5] Budach C, Thewes M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. *Tunn Undergr Sp Tech* 2015;50:296–304.
- [6] Häfliger P. Choice of driving methods in soft ground. In: *Proceedings of the Swiss Tunnel Congress 2013*; Luzern, Switzerland. 2013. p. 178–201.
- [7] Krause T. *Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erddruckgestützter Ortsbrust* [dissertation]. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig; 1987. German.
- [8] Guglielmetti V, Grasso P, Mathab A, Xu S. *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. London: Taylor and Francis; 2007.
- [9] Fritz P. Slurry shield tunneling in highly permeable ground. In: *Proceedings of the 12th panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering and the 39th US rock mechanics symposium*; 2003 Jun 22–25; Cambridge, MA, USA. Essen: Verlag Gluckauf GmbH; 2003.
- [10] Langmaack L. *Chemische Additive für den maschinellen Tunnelvortrieb*. In: *Proceedings of the Swiss Tunnel Congress 2009*; 2009 Jun 17–18; Luzern, Switzerland; 2009. German.
- [11] Zumsteg R, Puzrin AM, Anagnostou G. Effects of slurry on stickiness of excavated clays and clogging of equipment in fluid supported excavations. *Tunn Undergr Sp Tech* 2016;58:197–208.
- [12] Zumsteg R, Plötze M, Puzrin AM. Reduction of clogging potential of clays: new chemical applications and novel quantification approaches. *Géotechnique* 2013;63(4):276–86.
- [13] Milligan GWE. *Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipe jacking and microtunnelling: a state-of-the-art review*. Report. London: Geotechnical Consulting Group; 2000.
- [14] Peila D, Oggeri C, Vinai R. Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations. *J Geotech Geoenviron Eng* 2007;133(12):1622–5.
- [15] Merritt AS, Mair RJ. Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: model tests. *Géotechnique* 2006;56(9):605–15.
- [16] Vinai R, Oggeri C, Peila D. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research. *Tunn Undergr Sp Tech* 2008;23(3):308–17.
- [17] Peila D, Oggeri C, Borio L. Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications. In: *Proceedings World Tunnel Congress 2008*; 2008 Sep 22–24; Agra, India. New Delhi: Aravali Printers & Publishers; 2008. p. 881–91.
- [18] Thewes M, Hollmann F. Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. *Tunn Undergr Sp Tech* 2016;57:122–8.
- [19] Jefferis SA, Merritt AS. Exploiting physic-chemical modification of soils in closed face tunneling. In: *Manassero M, Dominijanni A, Foti S, Musso G, editors. Coupled phenomena in environmental geotechnics*. London: CRC Press/Balkema; 2013.
- [20] Galli M, Thewes M. Investigations for the application of EPB shields in difficult grounds. *Geomech Tunn* 2014;7(1):31–44.
- [21] Yu H, Mooney MA, Bezuijen A. A simplified chamber pressure model for EPB TBM tunneling in granular soil. In: *Proceedings of 9th international symposium*



- sium on geotechnical aspects of underground construction in soft ground; 2017 Apr 4–5; Sao Paulo, Brazil; 2017.
- [22] Merritt AS, Mair RJ. Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: a theoretical model. *Géotechnique* 2008;58(2):79–94.
- [23] Egli H, Langmaack L. Erddruckgestützter Schildvortrieb-Chancen und Risiken. *Felsbau Magazin* 2008;3:149–54. German.
- [24] Jancsecz S, Steiner W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions. In: *Proceedings of tunnelling 1994*; 1994 Jul 5–7; London, UK. Boston: Springer; 1994. p. 531–50.
- [25] Steiner W. Slurry penetration into coarse grained soils and settlements from large slurry shield tunnel. In: *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Rotterdam: Balkema; 1996. p. 329–333.
- [26] Kovári K, Bosshard M. Risiken im Tunnelbau: Analyse und Handhabung am Beispiel Zimmerberg-Basistunnel. *Tunnel* 2003;22(6):10–31. German.
- [27] Sennhauser U. Lockergesteinsstrecke des Längholtunnels—Wahl des Vortriebsverfahrens. *Kolloquium Maschinelle Tunnelvortriebe im Lockergestein*. Report. Bern: Bächtold & Moor AG; 2008 May 5. German.
- [28] Bosshard M, Bolliger J, Kobel R. Zurich cross rail, Weinberg tunnel—the challenges of the loose ground section and passing under the river. *Geomech Tunn* 2011;4(6):651–64.
- [29] EFNARC. Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock. Surry: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems; 2005 Apr.