



# 挪威隧道水控制

WATER CONTROL IN NORWEGIAN TUNNELLING

挪威隧道协会 编著  
周书明 杨秀仁 贺宁 译



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

WATER CONTROL IN NORWEGIAN TUNNELLING

# 挪威隧道水控制

挪威隧道协会 编著

周书明 杨秀仁 贺宁 译



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

《挪威隧道水控制》由挪威隧道协会编写，主要内容包括：挪威隧道工程水控制简介、无衬砌高压隧道和洞室、水平衡的定义和监控、奥斯陆城市区域隧道施工时的水渗漏控制、城市道路隧道—地表问题的地下解决方案、海底岩石公路隧道水治理的设计和施工、长大铁路隧道水治理的经验和教训、奥斯陆地区铁路隧道渗水量标准、环境敏感区内 25km 特长供水隧道建设规划、岩体注浆——地下工程的安全保障、现代注浆技术、控水工程风险的合理共担，以及隧道水控制工程实例等内容。

本书可供隧道与地下工程的建设、监理、施工单位有关人员使用，也可作为高校师生的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

挪威隧道水控制 / 挪威隧道协会编著；周书明，杨秀仁，贺宁译. — 北京：人民交通出版社股份有限公司，2017.2

ISBN 978-7-114-12049-7

I . ①挪… II . ①挪… ②周… ③杨… III .  
①隧道施工—涌水量—控制 IV . ① U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 024204 号  
著作权合同登记号 图字：01-2017-0111

书 名：挪威隧道水控制  
著 者：挪威隧道协会  
译 者：周书明 杨秀仁 贺 宁  
责任编辑：张江成  
出版发行：人民交通出版社股份有限公司  
地 址：(100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号  
网 址：<http://www.ccpres.com.cn>  
销售电话：(010) 59757973  
总 经 销：人民交通出版社股份有限公司发行部  
经 销：各地新华书店  
印 刷：北京盛通印刷股份有限公司  
开 本：787×1092 1/16  
印 张：9.25  
字 数：160 千  
版 次：2017 年 2 月 第 1 版  
印 次：2017 年 2 月 第 1 次印刷  
书 号：ISBN 978-7-114-12049-7  
定 价：58.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

## ❖ 译者的话 ❖

《挪威隧道水控制》是挪威隧道协会 2002 年编写的技术图书之一。本书的编写目的在于与同行分享挪威隧道水控制技术，以指导隧道安全施工规划和落实。本书详细介绍了挪威隧道水控制的意义、目的，水平衡的定义与监测，隧道水具体控制方法及工程实例等内容。

译者和挪威隧道协会协商，将该出版物翻译成中文版出版，供中国隧道与地下工程的项目业主、顾问、设计人员、施工人员、高校师生等参考。

挪威隧道协会（NFF）免费提供该出版物中文简体版权，译者的领导和家人给予翻译工作极大的支持，周冰洁承担了部分书稿的翻译工作，译者对相关单位和个人表示衷心的感谢！

翻译过程中，遵循英文原稿，一些图片无图名及文字介绍，旨在丰富本书所述内容，因此对这些图片予以保留。

译 者

2016 年 10 月于北京

# ❖ 中文版前言 ❖

隧道或地下洞室容许渗水量由工程环境和使用条件决定。有些项目中，开挖地质条件或泵送能力是隧道或洞室渗水量的主要影响因素。海底隧道的容许渗水量为  $30\text{L}/(\text{min} \cdot 100\text{m})$ 。更多时候，在敏感自然保护区、沉降控制要求严格的城市，进行隧道施工时，应采用更加严格的隧道水控制标准。在这种情况下，必须将残留渗水量限制在  $2\sim 10\text{L}/(\text{min} \cdot 100\text{m})$ 。重要的是应建造防水密封性极好的隧道，以实现具体隧道工程容许渗水量的特定目标。由于采用预注浆的方法，可经济、有效地实现这一目标。在某些情况下，例如，公路隧道，通过渗水过滤系统或“内衬”结构，收集排水岩体或支护结构的残余渗漏水。这样，可实现隧道防水密封，满足使用需求。

本书可为隧道水控制方面的规划、设计和实施提供参考。本书对规划、设计和施工期间所做决策提出建议，对水控制方面的理论、标准、规划、注浆作业、合同管理等进行介绍。

特此告知读者，挪威隧道协会出版刊物仅供参考。文中观点和结论秉承信息来源可靠、诚信原则得出。任何情况下，挪威隧道协会不承担由于使用该信息导致的直接、间接或附带损失。

挪威隧道协会免费提供该书稿中文简体版权，如需引用，请检索英文稿原件。

挪威隧道协会

2016年8月

# 目 录

1 挪威隧道工程水控制简介 .....	1
1.1 挪威隧道水控制的意义 .....	1
1.2 隧道施工地下水控制的目的 .....	2
1.3 挪威水文地质特点 .....	2
1.4 隧道工程概述 .....	3
1.5 费用 .....	5
本章参考文献 .....	6
2 无衬砌高压隧道和洞室 .....	9
2.1 简介 .....	9
2.2 电站总体布局 .....	10
2.3 基于有限元模型的设计图 .....	11
2.4 地形评估 .....	12
2.5 地质条件限制 .....	12
2.6 水力顶压测试 .....	13
2.7 带无衬砌水路的地下水电站 .....	13
2.8 从无衬砌压力井和隧道运行中获得的经验 .....	15
2.9 从气垫调压室运行中获得的经验 .....	16
2.10 本章小结 .....	18
本章参考文献 .....	19
3 水平衡的定义与监控 .....	21
3.1 简介 .....	21
3.2 “水平衡”方程 .....	22
3.3 水平衡方程中的参数 .....	23
3.4 水平衡的恢复 .....	26
3.5 植被图 .....	26
3.6 水平衡监控 .....	27
3.7 本章小结 .....	29
本章参考文献 .....	29



4	奥斯陆城市区域隧道施工时的水渗漏控制 .....	31
4.1	简介 .....	31
4.2	控制渗漏的隧道工程和措施 .....	32
4.3	黏土填充凹陷处隧道渗漏和孔隙压力的关系 .....	35
4.4	确定沉降的可能性 .....	37
4.5	水控制的隧道衬砌经验 .....	38
4.6	为弥补渗漏,使用地下水抽排措施 .....	39
4.7	本章小结 .....	40
	本章参考文献 .....	40
5	建设城市道路隧道——地表问题的地下解决方案 .....	42
5.1	简介 .....	42
5.2	隧道预注浆项目 .....	43
5.3	项目成果 .....	50
5.4	本章小结 .....	52
	本章参考文献 .....	52
6	海底岩石公路隧道水治理的设计和施工 .....	53
6.1	简介 .....	53
6.2	隧道水治理的设计原理 .....	55
6.3	地质条件和实地勘测 .....	56
6.4	施工方法 .....	58
6.5	运营 .....	61
6.6	本章小结 .....	62
	本章参考文献 .....	62
7	长大铁路隧道水治理的经验和教训 .....	64
7.1	简介 .....	64
7.2	项目说明 .....	65
7.3	Romeriksporten 隧道规划阶段的预调查及功能性要求 .....	66
7.4	Romeriksporten 隧道掘进的经验 .....	67
7.5	Lieråsen 隧道 .....	69
7.6	项目总结 .....	69
8	奥斯陆地区铁路隧道渗水量标准 .....	73
8.1	简介 .....	73
8.2	地下水水位的下降及一条隧道的渗水量计算 .....	74
8.3	Jong-Asker 项目隧道分段 .....	75

8.4	数值建模 .....	77
8.5	水平衡 .....	78
8.6	注浆和地下水监测策略 .....	78
	本章参考文献 .....	79
9	环境敏感区内 25km 特长供水隧道建设规划 .....	80
9.1	工程简介 .....	80
9.2	规划过程 .....	81
9.3	前期地质勘查 .....	82
9.4	地质情况 .....	82
9.5	识别对地下水排水有不同敏感度的自然区域 .....	84
9.6	地下水流向隧道所受到的限制 .....	87
9.7	水文地质条件 .....	89
9.8	岩体注浆和防水隧道衬砌范围评估 .....	92
	本章参考文献 .....	94
10	岩体注浆——地下工程的安全保障 .....	95
10.1	注浆的重要性 .....	95
10.2	岩体注浆的目的 .....	96
10.3	建造地下洞室 .....	96
10.4	注浆对岩石质量的影响 .....	98
10.5	预注浆的成本和计划 .....	98
10.6	注浆策略 .....	99
10.7	材料要求 .....	100
10.8	注浆效果 .....	101
	本章参考文献 .....	101
11	现代注浆技术 .....	102
11.1	技术简介 .....	102
11.2	岩体注浆的一般因素 .....	103
11.3	岩石预注浆的施工方案 .....	105
11.4	决策流程图 .....	111
12	梅罗克 (Meråker) 项目——12 个月完成 10km 隧道 .....	113
12.1	简介 .....	113
12.2	工期 .....	114
12.3	合同 .....	114
12.4	TBM 施工段工程地质 .....	114



12.5	TBM 选型 .....	114
12.6	TBM 机器优化 .....	115
12.7	掘进性能 .....	116
12.8	刀具磨损 .....	117
12.9	渣土运输 .....	118
12.10	组装 / 拆卸 .....	118
12.11	现场组织与管理 .....	118
12.12	围岩支护 .....	119
12.13	本章小结 .....	119
	本章参考文献 .....	119
13	奥斯陆峡湾海底隧道注浆 .....	121
13.1	简介 .....	121
13.2	水密封性标准 .....	123
13.3	初步注浆探测及注浆改进 .....	124
13.4	合作需求 .....	125
13.5	注浆效果 .....	126
13.6	余下的奥斯陆峡湾连接工程 .....	129
13.7	本章小结 .....	129
	本章参考文献 .....	130
14	控水工程风险的合理分担 .....	131
14.1	挪威隧道施工合同 .....	131
14.2	风险分担的原则 .....	132
14.3	调整施工时间的规定 .....	134
14.4	岩体注浆后期的合同编制 .....	134
14.5	注浆控水经验 .....	135
	本章参考文献 .....	136

# 1 挪威隧道工程水控制简介

## Eivind Grøv

O. T. Blindheim AS

**摘要：**岩体属于非连续介质，水力特征差异很大（从不透水坚固岩石到高渗透性地带），其具有相对的隔水性能。依据环境敏感性分析可知，应对隧道水进行控制，以避免其对隧道施工带来影响。挪威隧道工程实施的标准规程是以岩体预注浆，以使达到规定的密封性为基准。该规程根据早期奥斯陆城市地铁隧道施工制定，其涵盖无衬砌高压水电输水隧道工程、地下储油（气）库和海底岩石隧道工程，以及城市隧道工程。

本章列出了进行水控制的意义、目的，并概述了过去十余年间挪威隧道工程水控制的成本效益。本书中的其他章节将进一步细化这些方面。

## 1.1 挪威隧道水控制的意义

从挪威南部到挪威的东北角，挪威全长约 2100km。一方面，西部的山脉和山谷、深邃的峡湾以及广泛分布的人口，为基础工程建设带来了不少挑战。一直以来，确立一种能促进现代基础设施发展（要克服此类极端条件）的隧道掘进技术，十分重要。另一方面，挪威的气候和地势为水力发电的发展提供了巨大潜力。水力发电工程要求大量使用隧道和地下洞室，这促进了此类隧道工程水控制理念的发展。20 世纪 70 年代，挪威进入了油气时代，地下设施被用于运输和储存碳氢化合物产品。挪威隧道工程的特点是成本低、效率高，具有适应不同地面条件的灵活性、使用者的内部环境安全性，并可实现对外部环境的保护。

一直以来，以下因素对挪威隧道工程水控制技术的发展很重要：

- （1）岩体预注浆，以实现隧道水控制。
- （2）利用岩体的自承能力。
- （3）设置排水支护结构。

通常，岩体本身就是一个巨大隔水层，就致密性特点而言，其拥有显著能力，但就性质而言，其并不同质，特性差别巨大。



某些情况下，隧道允许的流入水量，由掘进方法和泵送能力决定，其可能导致地下水位下降。挪威海底公路隧道（这有无尽的供水来源）流入隧道水量的最大常用数值是  $30\text{L}/(\text{min} \cdot 100\text{m})$ （折合  $0.432\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ）（Blindheim 等，2001）。

对周围环境的要求可能会限制地下水位的下降。该要求适用于城市地区，以避免建筑沉降。已完工程的允许渗水量范围为  $2\sim 10\text{L}/(\text{min} \cdot 100\text{m})$  [折合  $0.0288\sim 0.144\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ]（Davik，2001）。首要目标是使隧道密封性好。

典型的挪威隧道工程施工质量取决于隧道作业的决策、隧道施工人员的能力，以及承包人和业主合作时的相互信任（Blindheim，2001）。根据预先规定的岩体支护和岩体注浆规程，授权隧道施工人员根据具体的岩体条件进行设计。在挪威，合同履行风险主要通过使用大量不同材料和制订合理的作业单位费率来分担。

## 1.2 隧道施工地下水控制的目的

为什么要使隧道或地下孔洞干燥呢？原因包括以下三方面：

（1）防止对内部环境的不利影响。由于各种原因，隧道和地下孔洞施工质量均受到严格要求，以获得安全、干燥的内部环境。在大多数情况下，不允许内部墙壁上或隧道顶部存在水。

（2）为防止因外部周围环境带来不可接受的影响。由于隧道施工降低地下水水位，隧道工程可能会对周围环境造成不利的影晌（其可能造成市区建筑和地面建筑的沉降，并影响休闲区内的生物类型、自然湖泊以及池塘）。

（3）保持水压力控制。无衬砌地下洞室主要用于油气存储、冷藏、压缩空气隧道和洞室、核废料存储库，等等。“水封隧道”为存储产品提供水密封，避免存储产品受泄漏水 and 汽的侵蚀。

## 1.3 挪威水文地质特点

挪威水文地质条件的主要特点是地下水水位高，其形成了朝向地下洞穴的天然水力梯度作用，这使得利用无衬砌地下存储设施成为可能。隧道工程施工可能具有扰动地下水的风险，因此存在对地面建筑和植被、动物生存环境，造成不利影响的可能性。

挪威岩石不透水性方面，其渗透性系数范围实际上为  $10^{-12}\sim 10^{-11}\text{m/s}$ ，个别接缝的渗透性系数范围为  $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{m/s}$ 。因此，岩体就是典型的裂隙含水层，水在渗透性最高的间断点或在隧道中沿岩体移动。岩体的渗透性包括致密岩石和裂隙的渗透性，典型渗透性系数为  $10^{-8}\text{m/s}$ 。这意味着应鉴定并处理岩体中传导性最强的区域；应确定适当

的解决方法，处理此类区域，避免隧道开挖时引起地下水水位下降的情况发生。

## 1.4 隧道工程概述

### 1.4.1 地下控水

近年来，已进行环境易损性和敏感性的分析，尤其注重将水平衡研究与本地生物类型的结合（Grepstad, 2001；Kveldsvik 等, 2001）。Johansen（2001）指出，地下水波动的数值模拟已成为此类分析和传统实验公式推导的宝贵工具。地面建筑土地沉降和潜在损害的实验公式同样可用（Karlsruud, 2001）。这些都是确定隧道渗水量最大可接受水位时应考虑的重要因素。

在采掘工作面之前通过使用钻探，随后进行岩体预注浆，从而实现控水（Garshol, 2001）。预注浆方案，旨在通过降低岩体渗透性，在隧道外围确立不透水区域。该区域确保将完整静水压力从隧道外围疏导至预注浆区域外。通过已注浆区域时，水压逐渐下降，隧道边界和隧道衬砌上部的水压接近于零。此外，预注浆也是提高注浆区域稳定性的重要方法（Roald 等 2001）。

隧道工程施工流程应以预先规定的注浆标准为指导。在达到这些标准后，方可开始隧道施工，其可能需要不止一次注浆。在对地下水波动高度敏感的区域，应根据隧道工程施工进度，持续实施钻探和预注浆。例如，根据工程特定要求，各孔组间隔 20~30m，并按规定重叠。典型预注浆孔组包括 10~30 个孔，这些孔以特定类型钻取，在岩体中形成喇叭形障碍物，如图 1-1 和图 1-2 所示。注浆孔的长度从 15~35m 不等。



注浆混合料搅拌



注浆工作站流程控制

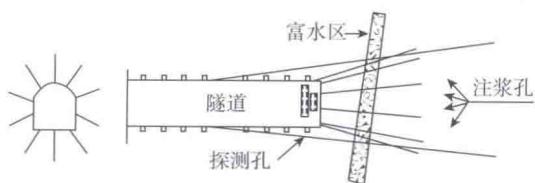


图 1-1 典型探测孔和预注浆布置





若按规定进行连续注浆，则在各注浆孔组之间搭接 6~10m。预注浆方案应 360°全面覆盖隧道，并包括控制孔规程和注浆作业合格标准。迄今为止，与后注浆相比，预注浆方法更可取。后注浆流程通常复杂、费时、昂贵，而且后注浆方案的结果可能更不确定、更加多变。

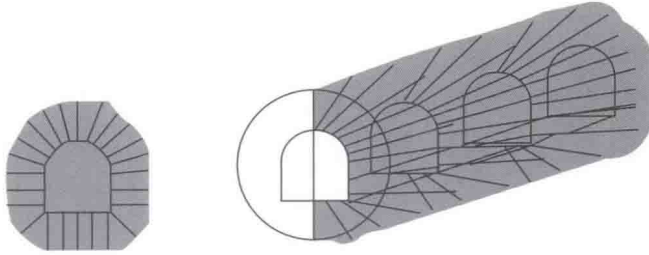


图 1-2 预注浆区域图

确保地下水控制的另一个典型方法是采用人工的方法将水加压注入，或通过渗透的方法使水穿过水幕进入地下孔洞。该方法常用于油气存储和水电站的无衬砌气垫式调压室中（Broch，2001）。通过这种技术可以使朝向孔洞的水力梯度表现为外部的水压力大于洞内的压力。这样在无衬砌的存储空间内，存储的产品将被水幕封闭。通过注水也可以恢复意外降低的地下水水位。

地下水随季节而变化，且在数年间不断循环。因此，应确定隧道可接受的渗水量水位，该水位可恢复水平衡。在挪威，有人提出一项新的规则，即不允许剩余流量超过集水区域年平均流量的 5%~15%。这是确定隧道最大允许渗水量的另一种方法。

应在实施注浆方案后，对其实施适当的监控计划。这一监控计划一般包括隧道内渗漏测量、岩体内地下水水头测量或邻近表面井、专用观察孔或湖泊/池塘的水位测量（Grepstad，2001）。

#### 1.4.2 岩体的自承载能力

大部分岩体都具有一定的自承载能力，但此能力差别很大。存在“自稳”时间这一事实说明岩体在一定时段内并非恒载，因此处理时不应以岩体恒载来处理。当设计永久支护时，应考虑到岩体的自承载能力。岩体自承载能力弱时需要岩石进行加强，以保证岩石的稳定性。在挪威，岩石永久支护一般包括锚杆和喷射混凝土支护（Grøv，2001）。

#### 1.4.3 排水隧道结构

在挪威的隧道中，岩体和岩石支护构成了排水结构。这意味着已安装支护措施的隧道设计或建造并非用于承受外部水体压力。因此，不允许采取岩石支护措施后，仍存在

多余水积聚。

然而，在已进行预注浆的隧道内，仍会发生渗流。可通过在渗漏点、隧道更大范围或隧道全范围内安装水保护和排放系统，实现环境干燥。在此环境中，要求隧道表面无可见渗流和潮湿斑块；要求在隧道外围和喷射混凝土衬砌之后，控制和处理额外水。额外水通过管道输送至隧道集水系统，或由水保护系统进行处理。可通过安装局部收集设施，并通过管道将水输送至隧道排水系统，实现排水。在挪威，根据隧道交通量的大小，已测试过许多水保护和排放的不同解决方案（Broch，2001）。这些方案的共同点是：它们对岩体支护措施并没有影响。

同时，还使用了可喷涂薄膜，以便在岩石表面建造排水结构，或被用作喷射混凝土两个连续层面之间的夹层。

## 1.5 费用

考虑到标准费用，Garshol（1997）研究表明，混凝土内衬隧道和纤维增强喷射混凝土隧道的成本比率大约是 500 : 225（开挖费用是 100）。

Aagaard 等的文章（1997）表明，费用变量是实际岩体条件的函数。根据岩体等级，混凝土内衬与喷射混凝土 + 锚杆 + 加强肋条的成本比率，从差围岩的 4 : 1 到极差围岩的 4 : 3 不等。图 1-3 表示无衬砌与现浇筑混凝土衬砌的成本比较。在不利岩体条件中，就费用比较而言，两者几乎相等。

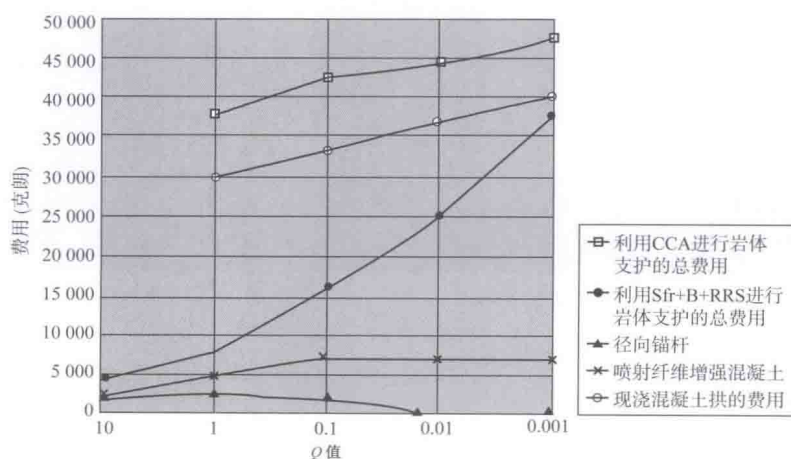


图 1-3 可用方法费用比较

就示例情况而言，可对成本方面进行估计。对体积为  $60\text{m}^3$ 、岩体状况一般的隧道，可得出表 1-1 所示的费用数字。





表 1-1 费用比较 (挖掘费用设定为 100)

应用支护要素	现浇筑混凝土衬砌	挪威隧道工程
临时岩石支护 *	30~80	—
岩体探测 / 注浆	50~150	100~250
岩体探测 / 注浆 **	NA	80~200
防水膜	20~30	—
混凝土衬砌 (400mm) ***	180~330	—
总费用	280~590	180~450

注: \* 表示点锚杆和弓形结构上的喷射素混凝土;

\*\* 表示系统岩石锚杆和纤维强化喷射混凝土;

\*\*\* 表示现浇混凝土衬砌应用于表面之后。

应用表 1-1 费用近似值, 使用喷射混凝土和预注浆支护隧道, 是现浇混凝土隧道费用的 60%~80%。

采用两班倒工作制, 每班工作 10h, 每周工作 5.5d, 横截面面积为  $60\text{m}^2$  的典型隧道工程进度为每周 50~60m, 包括完成所有永久岩石支护。严格的注浆要求可能会影响工程进度, 但隧道规程一般包括系统探测 / 注浆进度表, 其可减少延误, 并保持较高的隧道掘进率。

图 1-4 为激光控制方向, 图 1-5 为准备乳化液体注浆。

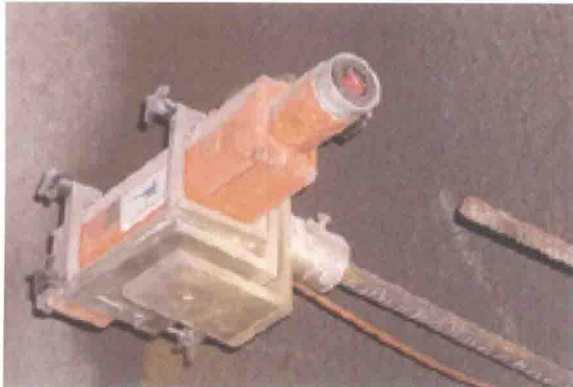


图 1-4 激光控制方向



图 1-5 准备乳化液体注浆

## 本章参考文献

- [1] Aagaard B, Blindheim O T, Grøv E. Sprayed Concrete as Part of Rock Support Systems for Adverse Rock Mass Conditions[J]. Rock Support, Norwegian Society of Chartered Engineers, 1997.
- [2] Beitnes A. Lessons Learned in Long Railway tunnels[J]. NFF Publication No.

- 12, 2001.
- [3] Berge K O. Water Control, Reasonable Sharing of Risks[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [4] Blindheim O T, Skeide S. Determination and Cooperation is Crucial for Rock Mass Grouting in Order to Satisfy Strict Environmental Requirements[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [5] Blindheim O T, Øvstedal E. Design Principles and Construction Methods for Water Control in Subsea Road Tunnels in Rock[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [6] Broch E. Inner Lining in Norwegian Road Tunnels[J]. Intl. Symp. Application of Geosystem Engineering for Optimal Design of Underground Development and Environment in 21st Century. Seoul Oct. 18–19,2001 Korea, 3–13.
- [7] Broch E. Unlined High Pressure Tunnels and Caverns[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [8] Davik K I, Andersson H. Urban Road Tunnels, a Subsurface Solution to a Surface Problem[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [9] Garshol K. Single Shell Sprayed Concrete Linings, Why and How[J]. Intl. Symp. Rock Support. Norway. Norwegian Society of Chartered Engineers, 1997.
- [10] Garshol K. Modern Grouting Techniques—methods and measures[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [11] Grepstad G K. Water Balance—definition and Monitoring[J]. NFF Publication No. 12, 2001.
- [12] Grøv E. Active Design in Civil Tunnelling Using Sprayed Concrete as Permanent Rock Support[J]. Int. Conf. Sprayed Concrete. Tasmania. Balkema, 2001.
- [13] Johansen P M. Inflow Criteria for a Railway Tunnel in the Greater Oslo Area.NFF Publication No. 12, 2001.
- [14] Karlsrud K. Control of Water Leakage When Tunnelling Under Urban Areas in the Oslo Region[J]. NFF Publication No. 12, 2001.

- [15] Kveldsvik V, Holm T, Erikstad L, et al. Planning of a 25 km Long Water Supply Tunnel in an Environmentally Sensitive Area[J]. NFF Publication, No. 12, 2001.
- [16] Roald S, Barton N, Nomeland T. Grouting—the Third Leg of Underground Construction[J]. NFF Publication, No. 12, 2001.
- [17] Closing the Ring in Oslo[J]. Tunnels & Tunnelling, 2001.