

TBM장비의 ITA 재활용 가이드라인 해설



지왕률
해외기술공사(KCI)
부사장

오늘날 터널공사에서 중고장비 재활용을 통해 TBM 장비를 재사용하는 것이 세계적으로 일반화 되고 있는 추세이다. 환경문제 및 경제적 이유로 값비싼 TBM기계의 재사용은 한번이상 사용한 굴착 경력이 있어, 보다 신뢰할 수 있는 안전한 해결책이라고 할 수도 있다(그림 1).

최근에 국제터널학회(ITA)에서 2015년 5월 발간 한 ITATECH 가이드라인은 지정된 TBM 장비 계약 조건에 맞춘, 재활용 TBM 기계의 정의와 최소 사용기준을 정립하고 있다. 따라서 부족한 국내 TBM 기술력 및 전무한 TBM 장비의 재활용 기준으로, 활용될 수 있기를 바라며, 기준 없는 무분별한 TBM장비의 재활용도 재활용 기준에 따라 새로 정립이 되어야 할 것이다.

1. TBM 재활용 개요

지금까지 터널 공사에서는 재사용 기계의 최소 품질 기

준에 대한 구체적인 가이드라인이 없었다. 기계의 재활용을 위한 품질수준에 도달하려면 아래 두 가지 재활용(rebuild) 수준과 그의 최소조건을 구체화해야 한다.

- 재제작(Remanufacturing)



〈그림 1〉 여덟 번째 사용된, 동일 Robbins 재활용 TBM

• 재보수(Refurbishment)

참고로 터널 프로젝트를 위한 굴착 및 지원 시스템 혹은 TBM 종류 선정은 조사 시 예상된 지반조건 및 지하수 상태에 따라 큰 영향을 받는다.

TBM 장비의 재사용은 재활용업자(rebuilder)와 지반 조건의 사항을 고려하여 협의를 통하여 결정된다.

2. TBM 재활용 가이드라인 범위

이 가이드라인은 쉴드 TBM과 무쉴드 TBM(Open TBM)와 이의 백업 장치에 관한 내용을 담고 있다. 또한 무인 소구경 TBM 터널기계와 이와 관련된 장치(캘리포니아 스위치, 가압펌프장, 지상 지반 전원함, 콘트롤 저장소 혹은 재킹 프레임)도 이 가이드라인 범위에 포함된다(그림 2).

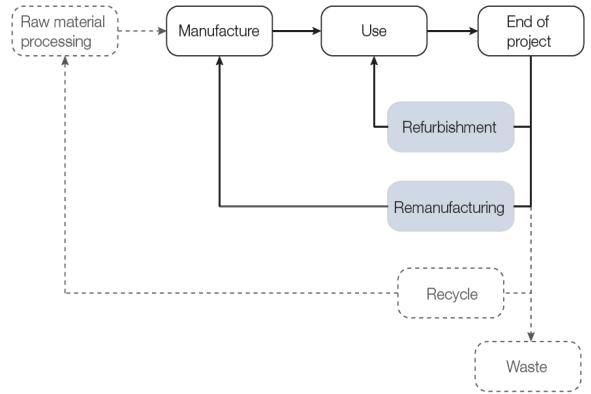
재활용 TBM의 국가별 사용범위에서는 만약 재활용하려는 TBM장비 사용국가가 최초 동일 TBM 장비가 사용되었던 국가와 다르면, 먼저 국제 기준과 규정에 일치하는지 여부를 확인해야 한다.

이 가이드라인은 전기계, 각 하위부품과 기계의 전 구성요소에 적용될 수 있으며, 유압 및 전기 시스템의 일반적 필요조건도 언급되어 있다.

감압실, 압력용기, 피난실(refuge chamber) 및 크레인 시스템은 이 가이드라인의 범위 안에 포함되어 있지 않다. 이러한 요소의 재사용 자격조건은 사용될 나라의 국가표준과 규제 기준에 따라야한다.

3. TBM 총괄 장비시스템 혹은 하위부품에 대한 재활용 단계의 정의

각 예정된 프로젝트의 조건에 따라(예. 터널 연장 혹은 예상된 사용기간, 지반조건) 다양한 기계장비 사양의 시방서가 있다. 이러한 조건에 따라 기계장비는 다 신장비로 사용할 수도 있고 혹은 프로젝트 일정과 경제적 요건



〈그림 2〉 가이드라인에 포함되는 전체 라이프 사이클 절차(full life cycle process)

에 따라 재활용 TBM장비를 사용할 수도 있다.

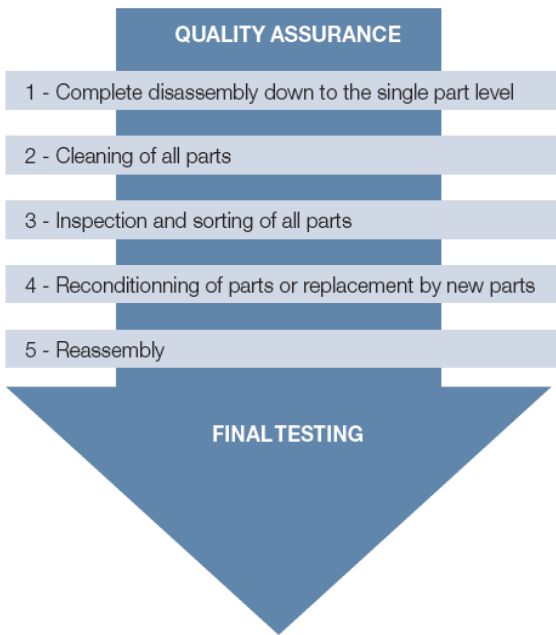
재활용 TBM장비를 사용한다면 가장 고가의 재활용 수준을 지정할 필요는 없다. 따라서 이러한 상황을 고려하여 장비 재활용 절차에 두 가지 단계로 설립되어야 하고 이는 제품의 수명 사이클 단계에 각 부분에 따라 진행된다(그림 2).

- 재제작(Remanufacturing)
- 재보수(Refurbishment)

이러한 재활용 단계의 최소 재활용조건은 가이드라인에 포함되어 있다. 각각의 제직사 혹은 장비 재활용업자의 지정된 보증조건을 달성하기 위해 추가적인 조치를 요구할 수도 있다.

3.1. TBM 재제작(Remanufacturing)

재제작을 TBM 장비총괄시스템 혹은 하위부품을 다른 프로젝트에서 원본 상태 혹은 변경상태로 사용되는 TBM을 말한다. 재제작 절차의 기본적 원리는 새로운 터널프로젝트를 완성할 수 있는 새로운TBM 장비 수명 사이클을 갖추도록 하는 것이다.



〈그림 3〉 재제작 절차 단계

참고로 재제작은 전체부품수명(full component lifetime)을 갖출 필요가 없거나 “최첨단” 및 특별한 사양의 필요조건이 없는, 즉 특수한 조건이 없는 프로젝트에 일반적으로 적용가능하다.

재제작 현장에서 볼 때, TBM 혹은 소구경 TBM의 몇 개의 지정된 하위부품 및 주요 구성부품 요소를 한정하여, 이를 재제작 장치와 함께 재사용을 허용하는 것이다. 재제작 과정에서 대다수의 경우에 이러한 하위부품 및 구성요소의 “필수적인 새로운 조건”은 프로젝트 발주자가 정의하고 재제작 기계장비 사용이 허용되는 프로젝트에서는 TBM 공급자가 이러한 복합적인 선택권을 사용 할 수 있다.

참고로 이러한 복합적인 장비선택에는 주요 구성부품의 수명 연장 조건과 기계의 특수적인 필요조건이 있는 “**대단면(High Profile)**” 프로젝트에만 일반적으로 적용된다.

일반적으로 계약 조건 혹은 기계공급 제안 시, 기계의 주 혹은 핵심 구성요소(예, 메인 드라이브, 베어링 및 실

(Seal) 시스템, 실드 구조 등) 혹은 지반조건 관련 요소(예, 커터 헤드, 암반 지보재 설치 등)가 “필수적인 새로운 조건”으로 새로운 부품으로 지정되거나, 별도로 특별히 제작되어 한다. 참고로 ‘새롭다는 것은’ 구성부품이 새롭게 제조되어 한 번도 사용되지 않은 것을 이야기한다. 이는 이전 프로젝트에서 먼저 제조되어 예비부품재고에서 빼온 새로운 부품도 해당된다. 재고 물량에서 빼온, 새로운 부품 중 제품의 수명시효(aging)가 해당되는 부품의 남은 수명은 최소한 프로젝트 기간의 2배가 되어야 사용할 수 있다.

3.1.1. TBM 재제작 단계

TBM 재제작 단계는 그림 3과 같다.

1단계: 분해는 단일부품 수준으로 진행된다. 이는 원래 초기 TBM 조립시의 단일부품 정의와 같다. 분해단계에서 재활용할 수 없는 부품을 폐기하고 일반적으로 실과(seal)과 같은 재사용되지 않을 부품과 재활용할 수 있는 부품을 분리한다.

2단계: TBM장비 세정 및 청소(cleaning)는, 폐석/토양/파편; 탈지(degreasing), 녹제거와 이전 페인트 제거 과정들을 포함한다.

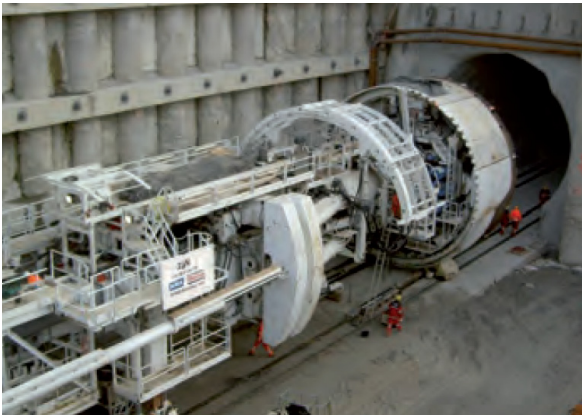
3단계: 단일부품의 점검은 부품의 분류에 따라 다르며, 이는 외관검사 혹은 그 외 검사 방법(균열검사, 전기검사, 압력손실 및 누수검사) 통해 진행된다. 이 단계에서 부품의 재활용가능성, 재생가능성 혹은 검사로 인한 재활용불가능성의 여부는 사전 설립된 기준을 통해 판정되어야 한다.

4단계: 부품의 재생은 새로운 장비제작과 유사하거나, 같은 제조 절차들을 적용될 수 있다. 조금 더 기술적인 해결책 혹은 구조적 보강에 기여할 수 있는 부품개선이 이 단계에서 이뤄질 수 있고, 이 절차에는 재사용이 불가능한 단일부품을 새로운 부품으로 대체하는 과정이 포함되어 있다.

5단계: 재조립 단계는 원래 최초 조립 방법과 같고 이



〈그림 4〉 TBM 재제작/재보수 과정



〈그림 5〉 스위스 Gotthard Base터널의 Amsteg 갱구부 굴착을 끝나고, Gotthard tunnel의 Erstfeld 부분 굴착에 재사용될 Gripper TBM의 재보수 후 모습

는 최초 조립과 동일한 절차와 도구를 사용한다. 재조립 후 최종적 검토도 동일한 절차, 검토기준 혹은 입증 필요 조건도 최초 조립과 동일한 방법으로 진행이 된다.

3.2 TBM 재보수(Refurbishment)

재보수 TBM이란 이전 시스템과 하위부품을 다른 터널 프로젝트에서 원래의 구성상태나 작은 사양 수정을 한 후 사용하는 TBM을 말한다. TBM 재보수 작업은 주로 “완전

정비”(full maintenance) 및 “불량부품 혹은 불량기능 수리 및 교체” 절차를 진행하고 최종 기능 검사를 진행한 다음 이의 완전 장비시험기록절차를 진행한다(그림 4).

참고로 재보수작업은 일반적으로 비슷한 터널프로젝트를 완수하고 특수한 조건에 맞춘 TBM기계가 필요 없는 프로젝트에 적용가능하다. 따라서 원 TBM 장비를 재보수하여 유사터널 프로젝트에 적용할 경우 재사용이 가능해진다(그림 5).

3.3 TBM 유압시스템

TMB 유압시스템의 재보수 및 재제작 기준은 표 1과 같다.

〈표 1〉 유압시스템 재보수 및 재제작 기준

	재보수	재제작
유압유	새로 교체	새로 교체
필터 카트리지	외관 검사	새로 교체
호스	외관 검사 수명 초과 혹은 파손될 경우 교체	새로 교체
관(piping)	외관 검사, 세정(물청소)	새로 교체
오일 저장탱크 (oil reservoir)	외관 검사, 세정	분해, 세정, 실 새로 교체, 재조립
유압 실린더	외관 검사, 유압 시험	분해, 세정, 실 새로 교체, 마모부품 새로 교체, 유압시험
유압 모터 > 150 cm ³ 변위 부피	외관 검사, 기능 시험	분해, 세정, 실 새로 교체, 마모부품 새로 교체, 대상시험
유압 모터 < 150 cm ³ 변위 부피	외관 검사, 기능 시험	외관 검사, 단상 대상시험(bench test)
유압 펌프 > 100 cm ³ 변위 부피	외관 검사, 기능 시험	분해, 세정, 실 새로 교체, 마모부품 새로 교체, 대상시험
유압 펌프 < 100 cm ³ 변위 부피	외관 검사, 기능 시험	외관 검사, 단상대상시험
밸브, 밸브 बैं크 (valve bank)	외관 검사, 기능 시험	분해, 세정, 실 새로 교체, 마모부품 새로 교체, 대상시험

3.4. TBM 전기 시스템

TBM 전기 시스템 재보수 및 재제작 기준은 표 2와 같다.

〈표 2〉 전기 시스템 재보수 및 재제작 기준

	재보수	재제작
케이블 > 1000V	외관 검사, 절연 시험	외관 시험, 절연 시험
케이블 < 1000V	외관 검사, 절연 시험	외관 시험, 절연 시험
케이블 드럼 > 1000V	외관 검사	분해, 세정, 전기 시험
고압 스위치기어	외관 검사	분해, 세정, 전기 시험
저압 스위치기어	외관 검사	분해, 세정, 전기 시험
변압기	분해, 세정, 전기 시험	분해, 세정, 전기 시험
전기 모터	외관검사, 전기시험	분해, 베어링 새로 교체, 전기시험
PLC 하드웨어	기능 시험	구식 부품 교체, 기능 시험
PLC 소프트웨어	기능 시험	새로 교체, 새로 업데이트
센서	기능 시험	기능 시험
안전 관련 부품	기능 시험	새로 교체, 기능 시험

4. TBM과 소구경 TBM의 시방조건

4.1. 임시 지보재로 사용되는 쉴드 구조체 및 기계 부품

터널 굴착 시 임시 지지대로 사용되는 기계 부품(예, 터널 Crown부 지지구조물) 및 쉴드 구조물이 지반과 지하수에 의해 가해진 하중을 버틸 수 있는 능력이 있는지를 확인해야 한다. 또한 이러한 부품을 예정된 프로젝트에 재사용 시, 굴착 터널 프로젝트의 지하 및 지하수 조건도 고려해야한다.

4.2 지반지보재 설치

암반 지보재 설치장비가 제공되는 무셜드 터널굴착기에서는 현재 있는 장비의 종류와 암반 지보재가 위치되

어 있는 설치공간도 굴착예정 프로젝트에 가용여부도 확인해야 한다.

프리캐스트 세그먼트 설치 능력을 갖고 있는 쉴드 터널 굴착기계에서는 쉴드-라이닝 인터페이스뿐만 아니라 핸들링 수용력과 세그먼트 설치 장비의 운전자의 인체공학적 안전성이 예상 사용방법 및 세그먼트 설계와 현장에서 일치하는 여부도 확인해야 한다.

4.3 메인 베어링

TBM의 메인 베어링은 고가치 핵심부품이자 교체사용 수명이 매우 길다. TBM 메인 베어링의 일반적인 설계수명은 10,000h 혹은 그보다 크다. 이러한 설계수명 수치는 TBM 사용의 관한 예상 굴착조건에서 가정된 하중을 고려한 수치다.

하지만 대다수의 메인 베어링은 처음 적용할 때 설계수명에 가까이 도달하지도 않아 다음과 같은 조건만 만족하면 재사용이 가능하다.

- 메인 베어링의 운영 시간이 기존설계수명의 약 50%에 도달하지 않았을 때
- TBM 데이터 기록 시스템에서 이전 프로젝트에 “경험한” 하중 조건 및 운영시간을 예상된 하중 조건 및 운영시간에 합하여 이의 새로운 설계수명 수치가 예정 프로젝트에 사용가능하다고 확인되었을 때
- 완전한 베어링 검사와 재생을 진행하고 기존 베어링 제작자 혹은 같은 자격을 갖춘 기관에서 “사용가능” 조건이 주어졌을 때

이에 해당하는 베어링 검사의 최소필요조건은 다음과 같다.

- 축방향 및 방사성 베어링 간극 측정
- 베어링의 완전 분리와 세정

- 모든 베어링 부품의 외관검사(raceways, rollers, cages, bolting thread 그리고 bull gear(bull gear가 베어링의 일부분일 때)
- Raceway와 bull gear(bull gear가 베어링의 일부분일 때)의 균열 시험
- 위 검사의 결과 기록 및 필요보충사항 기록

이러한 필요조건외의 최소안전기준으로 모든 실(lip 실, O-링)은 베어링을 재조립할 때 모두 교체되어야 한다. 또한 여기서 적절한 부식방지 조치도 진행해야 한다.

메인 베어링 재생의 실현가능한 방법 중 하나는 Raceway를 다시 갈아서 가공(regrinding) 하거나, Roller를 새롭게 설치하는 것이다. Regrind 깊이의 한계를 일반적으로 0.5mm로 최댓값을 설정한다. 정확한 베어링 간극의 재조정 은 재생과정의 일부분이다. 이러한 작업은 자격이 있는 베어링 제작자나 기존 베어링 제작자가 실행해야 한다.

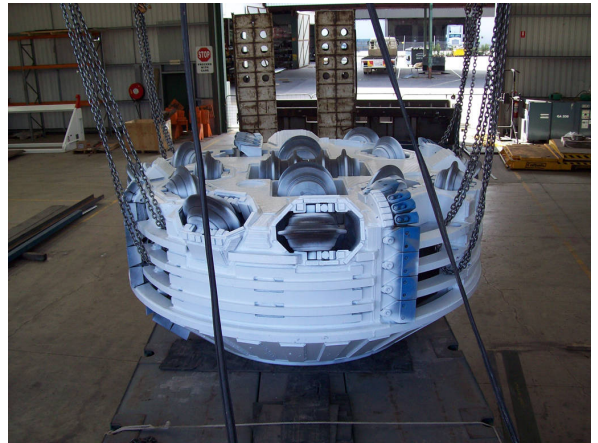
4.4 커터헤드, 도구 및 폐석 처리 장치

TBM - 지반 상호작용, 굴착 및 초기 버력운송 과정의 주 부품 및 하위부품은 프로젝트 장비 사양 특성에 따라 달라진다. 또한, 이러한 부품들은 마모에 매우 노출되어 다른 터널 프로젝트에 재사용하기에 적합하지 않다.

암반용커터는 소모성 부품으로, 디스크 커터처럼 지정된 OEM 재활용 절차가 따로 없을 시 새로운 커터로 교체해야한다.

커터 헤드 구조물은 TBM 구조 자체와 구조에 통합된 커터집(Tool Socket)에 의해 높은 하중을 받고 연마마모에 노출되어 있다.

각 구조물의 구체적인 시험과 보수 계획 및 보수 절차를 필수적으로 기록해야한다. 또한 이러한 마모를 방지하는 고정된 마모방지 요소(부품)들이 있는데 이들의 상태와 예상되는 사용 혹은 마모한계가 50%에 도달했을 때 교체되어야 한다. 더구나 커터 헤드 구조물의 설계는 지정



〈그림 6〉 TBM Cutterhead 재활용정비

된 프로젝트의 예상 지반조건과 크게 관련과 있다. 도구 종류와 형태, 커터 크기와 간격, 커터 면판의 열림 비(opening ratio), 버력 유동, 분포 조건 혹은 flushing port와 같은 지반과 관련된 설계 고려사항은 전체 구조에 큰 영향이 있다. 따라서 커터 헤드 재활용은 최초사용과 장치 예상사용의 지반 조건을 고려해 보며, 이를 비교하여 그 타당성이 있음을 증명되어야 한다.

1차적 버력 처리 요소와 쇄석기, 나선형 컨베이어, TBM 벨트 컨베이어 혹은 실드 슬러리 파이프 배관 시스템과 같은 버력 이동방법은 포괄적인 연마마모에 노출되어 있다. 따라서 각 구조물의 구체적인 시험과 보수 계획 및 보수 절차를 필수적으로 기록해야한다. 고정된 마모방지 요소들은 그의 상태와 예상되는 사용 혹은 마모한계가 50% 도달했을 때 교체되어야 한다. 교체할 수 있는 마모방안요소 혹은 파쇄도구는 소모성 마모부품으로 지정되어 장치 재활용 시 새로운 부품으로 모두 교체되어야 한다(그림 6).

4.5 보수 기록(Records)

4.1절과 4.4절에 포함된 TBM 재활용 과정, 구조검토

과정 그리고 핵심 부품의 품질보증기록뿐만 아니라 이의 관련된 모든 기록(예, 이전 사용 기간 기록, 이전 프로젝트 기록)을 잘 보존해야 한다.

5. 장비 재활용업자의 자격과 보증수리

5.1 장비 재활용업자(Rebuilder) 자격

터널 굴착에 사용되는 기계장치는 매우 복잡하지만 이의 재활용(rebuild) 절차는 높은 수준의 숙련된 기술이 필요하지는 않는다. 기계적 혹은 전기적 부분 외에 안전운 영도 이에 관련되어 있다.

3.1절과 3.2절에 정의된 TBM 재제작과 재활용 절차는 주문자 상표 부착 생산자(OEM)에 의한 재제작 혹은 재활용이 가장 바람직한 해결책이다. 이러한 구성으로 기존 제작자의 소유기술력과 기존 설계 혹은 제작 서류, 도면일 식, 계산과정, 제어 소프트웨어와 PLC 프로그래밍을 모두 다 재활용(rebuild)절차에 제공되고 사용할 수 있는 것을 보장하기 때문이다.

조항 3.1절과 3.2절에 정의된 TBM 재제작과 재활용(rebuild) 과정을 같은 산업계의 동등한 대체 제작자가 실행할 시 이도 허용가능한 해결책이다. 단, 재제작/재활용 과정을 진행하는 제작자는 TBM 장비에 대한 적절한 기술 기록물을 접근할 수 있어야 한다.

조항 3.2절에 정의된 TBM 재제작과 재활용(rebuild)을 중장비 건설기계취급 및 재생 자격/경험이 있는 기관이 실행할 시 이도 허용가능한 해결책이다. 단, 재제작/재활용 과정을 진행하는 기관이 TBM 장비에 대한 적절한 기술기록물을 접근할 수 있다는 조건이 필요하다.

5.2 품질 보증

TBM 재활용(Rebuild) 절차를 진행 혹은 지원하는 기

관에 따라 예상된 장비에 따른 다양한 품질보증 수준을 갖는 것이 일반적이다. 이러한 조건은 재활용 계약에 따른 각각 협상에 달려있다.

만약 OEM으로 인한 장비 재활용을 진행할 시 품질 보증은 새 TBM장비와 비슷한 수준에 도달한다.

참고문헌

1. EN 16191 "Tunneling machinery - Safety requirements."
2. IEC 62309 "Dependability of product containing reused parts - Requirements for functionality and test."
3. ISO 16714 "Earth-moving Machinery - Recyclability and recoverability - Terminology and calculation method."
4. ITAtech Report No 1 "Guidelines on standard indication of load cases for calculating of rating life (L10) of TBM main bearings."
5. ITA Report No 14 "Guidelines for the provision of refuge chambers in tunnel under construction."
6. ITATECH Guidelines On Rebuilds Of Machinery For Mechanized Tunnel Excavation, ITAtech Report No. 5, May, 2015.
7. "Mining Engineering Equipment and Tunnelling Products," Calbah Industries, accessed November 7, 2017, <https://www.calbah.com/mining-industry-engineering-fabrication-services>
8. "Rebuilt, Refurbished, Remanufactured: Designing a TBM to Live for Generations," The Robbins Company, accessed November 7, 2017, <http://www.therobbinscompany.com/rebuilt-refurbished-remanufactured/>
9. "Rebuilt Robbins TBM for water supply," Tunnel Talk, accessed November 7, 2017, <https://www.tunneltalk.com/France-27Apr2017-Eighth-project-for-rebuilt-Robbins-TBM.php>
10. "Robbins Completes Factory Testing 1st TBM for Mumbai Metro," The Metro Rail Guy, accessed November 7, 2017, <http://themetrorailguy.com/2017/09/05/robbins-completes-factory-testing-1st-tbm-for-mumbai-metro/>
11. Rolf Steinhilper: "Remanufacturing", 1998, Fraunhofer IRB VERlag, Stuttgart.
12. Tunnels and Tunnelling, International Edition, Nov. 2017, p. 4.