

RICHARD L. MEEHAN

热带岩土工程

顾问工程师

50 年经验 • 坝安全 • 工程地震学

meehan@stanford.edu

2020 年 4 月 17 日

致： 美国北卡罗莱纳州安石维尔市

包容发展国际组织 (IDI)

**关于：达尹里矿业公司(DPM) 矿址风险及尾矿处理安全**

尊敬的 IDI：

**总结：** 在未经现场访问的情况下，我根据现有信息，对 DPM 在北苏门答腊达尹里县矿山尾矿坝的稳定性风险提供评论。

2005 年，DPM 矿获得了印尼环境许可，但自此以后，矿山计划发生了改变。现在拟建的矿山，比最初计划规模大出了很多。这意味着管控有毒尾矿将有更大挑战。我的理解是，印尼环境与森林部已通知 DPM 申报新的环境许可，但新许可尚未授予 DPM。

根据 DPM 最新信息，我的估算是，“湿”尾矿处理，要求大约 1,800 万立方米的地上贮存设施。然而，DPM 矿位于世界上地震风险最高的地区之一，发生大级别地震的风险很高，而且这些地震可能延续时间很长。在其它地方，人们发现，这样时长的地震，对于像尾矿坝这样的任何土木结构，尤其危险。

DPM 矿也坐落在一个洪水和滑坡风险很高的地区。对于一个 10 平方公里的水域来说，1 平方公里的尾矿池，需要能应对暴雨发生时水位上涨 5 到 10 米，这在尾矿基本储量之上又增加了 5 mcm 洪水贮存要求。滑坡将对任何尾矿坝设施提出更高要求。

将需要建设尾矿坝的地区，地质构成也很复杂，是沉积材料和较为年轻的火山凝灰岩。这样的地质状况，对于任何尾矿坝设施都是重大担忧。

在这样的环境里，DPM 似乎抵触信息公布，监管环境又比较弱。这样的因素，再加上地震和洪水风险，在我看来，使得 DPM 矿山具有极高的在未来某些时候发生灾难性尾矿坝溃败的风险。鉴于矿山下游有一些社区，这就对人身安全构成了严重威胁，也构成了对环境的严重威胁。

本信件就达尹里铅锌矿尾矿贮存设施的岩土安全性做出报告。该矿坐标为印度尼西亚苏门答腊西北 2.78, 98.15。我的理解是项目建设已在 2020 年早期开始。我尚未访问过矿山。我的评审，是基于新闻发布信息以及源于 DPM 的信息。在缺乏公开信息时，我使用了 DPM 以前有关矿址状况和运营的估计、我本人

在类似项目的经验、对卫星图片的研究、已出版的地质报告、土地征收地图、以及远程或报道的首期建设运营信息。

过去 20 年里，这一矿山的规模，发生过重大变化。2005 年时期，项目描述是对一个较小的（6mt）高品质、易开采的铅锌矿体进行开采。随着时间推移，项目扩大了很多，到最高为 30mt，并增加了低品质、不易开采的矿体。

矿山必需的重大地表废弃物处理设施的可行性和安全性的详细信息，似乎都没有公之于众。这让人很惊讶，因为：

1. 大型尾矿贮存项目存在重大的地震风险，这一点已在全球得到公认（Cai, Wang, et al Liquefying-damage of mine tailings dams in earthquakes）。
2. 旨在减少上述风险的新技术，尚未取得成功。《华尔街日报》最近一篇文章指出了这一事实（2019 年 12 月 22 日：After Deadly Dam Spills, Miners Seek a Better Way—It Isn't Working Out）。所以，废弃物处理问题，已成为限制新矿和扩大现有矿山运营的首要问题。

## 我的资历

在麻省理工学院和皇家学院毕业并获得工程学位之后，我曾在泰国东北的热带地区设计并建设堤坝项目。1960 年代后期，我曾为智利铜矿公司 Sociedad Minera El Teniente 担任水电及尾矿坝坝址现场顾问（继 1965 年著名的 El Cobre 尾矿坝由地震引发的灾难性溃败后）。1970 年代回到加州后，继在洛杉矶由地震引发的 San Fernando 水力冲填坝溃败事故后，我和著名工程师 Thomas Leps 一起，对很多水力冲填尾矿坝的地震安全性进行了评估。我还与合伙人 Douglas Hamilton 一起，与澳大利亚工程师组成了一家合伙公司，为在澳大利亚和 Bougainville 布干维尔的几座尾矿坝进行了规划。此后，我们帮助斯坦福大学建立了一个工程地质新项目。我在该项目任教多年，现在还和其 Blume 地质研究中心保持着联系。

自此以后，我的工作一直集中在与坝和核电站安全相关的地震问题。我最近的一个项目，是对老挝 Xe Pain Xe Namnoy 项目 2018 年事故进行评估。达尹里矿这一项目，除了很高的地震风险之外，似乎与老挝这一项目具有很多共同的地理条件和问题。因为发表了老挝项目评估结果，包容发展国际组织请我提供以下报告。

## 项目描述

达尹里矿是一个拟建的地下铅锌矿，坐落在苏门答腊 Medan 市西南的乡村山区（图一）。根据现有信息，就 DPM 计划，我能做出的最好的推断如下：

**2003 年：** Middleton 计划 (Middleton, 2003) 和环境影响评估 (EIA) 指出，安靖潭矿体为 6 mt @ 1mtpy, 1/3 固体进入上部尾矿处理区

**2003-2011 年：** 对“可能”补充矿体进行进一步勘探和设定

2011 年：项目修改扩大为 25-30 mt@ 1mtpy，要求更大的尾矿区。

最近的新闻发布内容显示，从 2020 年开始，项目预计 30 年期，年产量 100 万公吨 (mtpy)。项目计划把采矿产生的部分液态泥浆废弃物 (约 2000 万立方米) 转化为膏体，用来填充和稳定采矿产生的地下空穴。余下的尾矿，将作为湿泥浆，永久贮存在地表，通过尾矿坝进行管控。膏体回填常见做法，是把 50%的废弃物都在地表贮存。DPM 项目的一些初步但过时信息显示这一比例可能会低一些，约为 35%。但无论如何，一个大型、永久废弃物湖将会出现。

根据目前 30 mt 的规划，我的估计是，在地表贮存的泥浆型废弃物的量将达 10 mcm。此外，为了安全起见，还需空间来贮存暴雨雨水、滑坡泥石 (见下) 以及任何其它富余高度 (储备容量)。把这些都加起来，我的总体估计是，贮存设施全部能力将为 18 mcm。如果这个数字不错的话，将要求图 2 [作者估计尾矿情形] 所示的尾矿设施。请注意，我的估计是基于膏体回填计划完全成功的前提下，而这一回填计划能否成功，无论从经济方面 (需要几百万吨的昂贵的水泥)、技术方面 (尚未显示一个成功的混合方法) 以及安全方面 (膏体填充物有可能提高有毒化学物质从废弃矿井渗漏到环境里的可能)，都未得到证明。

尾矿坝，包括那些据称容纳了更多现代安全措施尾矿坝，即便在不发生地震的情况下，溃败率也很高 (全球每年 2-5 起) (见以下有关达尹里地震风险的具体讨论)。2014 年加拿大 Polley 山尾矿溃败，就是一个出名的例子，因为鉴于加拿大安全监管机构的严格监督，这一事故人们原本认为是不会发生的。事故原因在于采矿公司未能探查挡水坝地基的一个薄弱区 (冰川湖相沉积)。

最近巴西 Brumadinho 尾矿贮存设施的溃败，吸引了世界的关注。其自发的崩溃 (没有地震的发生) 被人们通过一个惊心动魄的视频<sup>1</sup>记录了下来，显示了一个“湿尾矿”贮存设施破裂后，其破坏力的速度



Figure 2. View of author's estimate of tailings

<sup>1</sup> [www.youtube.com/watch?v=ul4Lq3Lf\\_yw](http://www.youtube.com/watch?v=ul4Lq3Lf_yw)

和延伸地理范围，包括 200 多人的死亡。请注意，这样的隐患不会随着时间消失。100 年后，项目“关闭”很久以后，同样的溃败风险依然存在。

地震之外的其它环境条件，也会威胁到尾矿坝的安全。高降水量会导致尾矿上面山丘地表的崩塌，引起滑坡和泥石杂物的逆流。湿润的气候，使得尾矿无法干燥，导致尾矿即含水量高，又储留水分，从而大幅提高了即便有小裂缝时的不稳定性和流动性。就像我在老挝 Xe Pian Xe Namnoy 坝调查中所显示的 (Meehan 2019, fig 5a herein)，热带条件严重削弱了对重型结构的地基支持，也使得强大的地下水压力积聚，从而破坏了稳定性。所有这些和水相关的条件，在达尹里拟建尾矿区都很显著（见以下有关达尹里洪水隐患的讨论）。

虽然采矿业从 1960 年代著名尾矿溃败事故起，鉴于有关消除尾矿设施的广泛呼吁（见“华尔街日报”2019 年 12 月 22 日报道），就试图开发更好的建设和管理程序，但全球尾矿的安全记录，事实上多年来反而恶化。这一让人惊讶的趋势，原因在于矿业公司开始开采矿物含量不丰富的矿体，使得更大量尾矿产生。另外，尤其在矿物价格下跌时，企业不得不采取极端的减少尾矿处置成本的手段。在很多矿业项目周期后期，产权和人事经常发生变动，管理监督力度下降。作者本人曾有过在这样的情况下，试图指导安全措施的个人经历。项目试图用远程摄像检查来代替现场监督，但结果无效，现场矿工被予以很大的奖励来把成本最小化，甚至采用不安全的“临时”措施，而这些“临时”措施，在急于“关闭”设施的压力下，后来从未得到修正。最终结果常常是，企业不提供任何维护已“关闭”尾矿的保证，虽然同样的安全问题继续存在，而且实际上在几年、几十年、甚至几百年后这些问题更为严重。尾矿溃败评审专家们最近呼吁，要加强法律措施，来确保对尾矿安全的长远责任，包括把责任延伸到企业实体和董事。

达尹里项目规模从 6mt 扩大到 30mt，正应了一个利润最终不断下降的矿山，不得不受到上述废弃物处置问题限制的规律。

### 和安全相关的当地地质状况

尾矿坝区地基特点尤其重要。该矿山所在地区地下岩石（其中包含各种矿体），大多是很古老的（石炭二叠纪）岩、炭质页岩和白云石粉砂岩。这些岩石在苏门答腊西海岸板块聚合中发生断层折叠（图 3a 中浅绿色）

[图 3a：项目地区地质特点与据报道尾矿区]。据 Middleton 2003 规划，岩层产状为 EW 走向和约 45 度北向倾角，具有易碎的构造变形引起的断裂。对显示最近（2019 年）Sopokomil 谷道路切割情形的照片进行检查，会发现倾斜岩层系列向北延伸到山谷侧面的山丘里，参见我画的图 3a。



Figure 3a Sketch of general geological features and reported alternate tailings dam disposal areas.

7 万多年前 Toba 火山口的爆发，使这一地区被热灰流淹没（火成岩），这种岩石一般被称为 Toba 凝灰岩（图 3a 中浅黄色）。根据 Middleton 计划（很明显是基于 Aldiss et al, 1983），拟建尾矿所在的 Sopokomil 谷底，下面是 Toba 凝灰岩。这种凝灰岩一般都认为存在不同程度的熔结，但据报道，在地表附近，常以一种轻灰层形式存在，据我看到的照片，在有些溪流岸边岩层里存在。据 Aldiss et al 描述，这些浅层的凝灰岩源自火山灰雨，未经熔结且常常经过河流重塑。此类岩石通常密度较低，易受天气因素瓦解，即便在熔结的地方，也处于断裂状态并易储水。凝灰岩与其下更为古老岩石的交界处（深度未知），常常高度透水，并因其储水能力，构成了潜在的不稳定区。一篇有关 2007 年地震的论文（Gratchev et al, 2011），给出了这一不稳定性的例子。地震发生在离达尹里有些距离但地形相似的地方。地震和大量降雨共同引发的凝灰岩层大规模滑坡，淹没了村庄，导致了很大伤亡。

有专家 (Hamilton, oral communication) 认为，Sopokomil 谷及附近的峡谷，可能是一个更为古老的火山口所在地，其特征是图 4 中可见的一个环形脊线。这样的地形下面，经常是与上升喷出岩浆相关的流纹岩。这样的岩石一般都是断裂和储水的。

对在 Sopokomil 附近测绘地图显示为凝灰岩的地区内河床的检查和照片都显示，岩石冲积层占主体，源于来自上游（包括矿体区）发现的更为古老的岩石的洪水冲积物。

虽然对于可能的（2020）尾矿和挡水坝区域地基稳定性的岩土研究尚未做出，在我看来，现有证据几乎可以确定，地基包含上述诸多地质特征，使其在地震和大量降雨情况下具有高度的不稳定性。

### 地震风险

矿山坐落在世界上最活跃的地震区域之一，沿苏门答腊隐没带的巨型断逆层，很明显靠近在 2004 和 05 年，分别产生了 9 级与 8 级地震的一个三板块交界处 (图 3：历史上的地震)。这些地震使得远在曼谷的建筑物都发生了摇动，对当地造成了严重损害，包括对与尾矿坝行为类似的路堤和桥台的损害。地面运动的强度也摧毁了在 Banda Aceh 的设施，而 Banda Aceh 与达尹里矿距离地震地点的距离很相似。日本研究人员（见 Sorenson et al）发现，损害高达日本气象厅震度 6 级。这一级地震（6.0 – 6.4）产生如下效果：

无法站立、只能爬行、... 桥梁和道路遭受中到重度损坏... 多层公寓楼房部分或全部倒塌... 很多墙壁坍塌，或至少受到严重破坏。有的抗震程度低的建筑物倒塌。甚至高度抗震的建筑也会遭受严重损伤... 地面可能出现裂缝，滑坡发生。

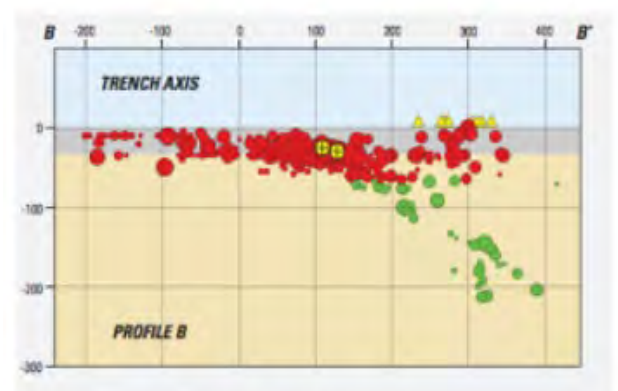
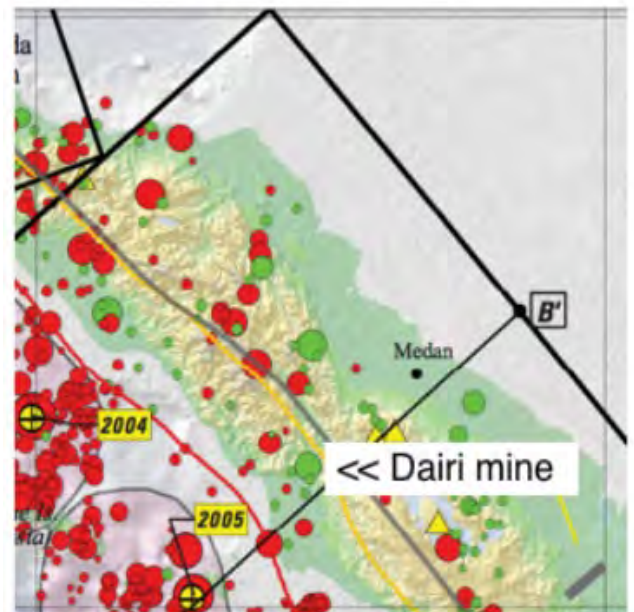


Figure 3. Historical earthquake per

$$a=315-400 \text{ cm/s}^2$$

从美国地质调查局出版的当地地震情况综述 (USGS, 2003) 中, 可以抽出显示历史上地震情况的一个地图和截面图。该地图和很多其它出版物, 就当地地震情况提供的综合信息, 使得我们能够充分评估地震风险。

与大多数地震不同, 这些在海上巨型断逆层的 9 级地震, 产生的地面震动很强烈, 并延续很多分钟。重复或长期震动, 可以完全摧毁在地震时长较短时只会部分坍塌, 能够幸存的结构, 比如 San Fernando 坝 (图 6b: 加州 San Fernando 坝在一个很短的 6.6 级地震中几乎溃败。当时如果再多摇晃几秒, 就会导致很多死亡)。历史档案显示, 如此超级的地震在过去两百年里经常发生过。这样的地震, 肯定也会在达尹里尾矿设施长久的生命周期里重复。

虽然海上断逆层超级地震对诸如尾矿贮存设施等长期结构构成了威胁, 距离达尹里矿山东部只有 15 公里的大苏门答腊地震带, 可能会产生更为危险的地震。根据 Peterson et al (Ref Peterson) 及其他研究人员, 这一断层能够产生 7.5 到 7.9 级的地震, 而在距离如此近的地方, 很有可能产生非常高的、相当于 50-100% 重力的地面加速 (图 5: 距离苏门答腊断层很近的尾矿坝, 当地震高达 7.5-7.9 级, 地面加速相当于 100%g 时的情形)



Figure 4. Path of mud wave if a breach occurs.

对中国汶川地震中的尾矿坝溃败做出的研究显示 ( Ref Cai et al, 图 6c: 对 2008 年汶川地震中一个尾矿坝的分析, 显示该坝在 8 级地震中溃败), 地面运动强度一向都超出一个尾矿设施顶部的基本承受力。要设计一个能够经受这种层次摇晃而不发生裂缝和移位的尾矿控制坝, 极端困难和昂贵, 即便我们假定山谷具有所有最佳的地基状态。这样的假定, 在热带火山地形, 当然不可能存在。

6 到 7 级的地震, 在苏门答腊断层上和附近是家常便饭, 在采矿阶段肯定也会发生, 即便在最佳情况下 — 即在一个坚强的岩层地基上建设的一个强壮的干坝 — 也会对尾矿设施造成至少一些破坏。如果尾矿坝, 尤其是地基, 不能满足这一理想条件 (特别有可能), 损坏将很严重, 并可能导致尾矿坝溃败。更可能的情况是, 地基是由上述不同的火山灰和其它岩层构成, 不会为尾矿坝提供坚实的支持。

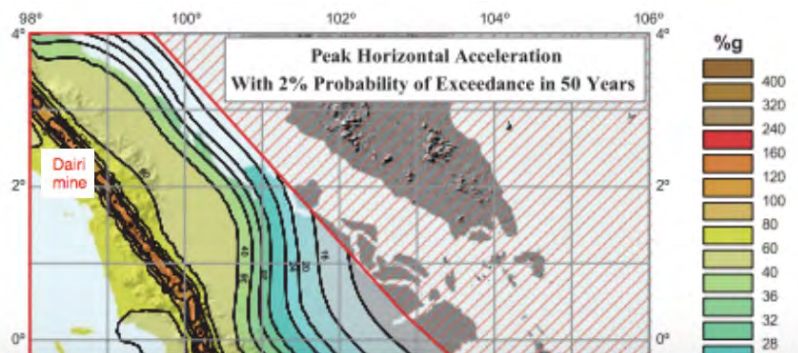


figure 5. Tailings dam very close to Sumatra fault with likely earthquakes up to M 7.5-7.9 and ground accelerations of 100%g

另外重要的一点是，从长远来讲，比如下个世纪或更长时间，尾矿坝会多次受到这些强震的影响。这些地震将引起尾矿坝结构内部移位，破坏内建体系，引发渗漏，并随着时间的推移，增加水压。这一威胁，除了经过良好专业培训并使用特殊仪器对尾矿坝安全进行检测的工程师之外，其他人都无法看到。即便有专家诊断，要对损坏进行修补也将非常困难，甚至不可能，尤其鉴于这些地震会成群出现，即大震之后又有余震（图 6d：达尹里矿山尾矿坝在强震时可能的表现。强震可能会由矿山附近的大苏门答腊断层引起）。

总而言之，拟建的达尹里矿坐落在世界上地震风险最高的地区之一。虽然 DPM 将如何准备应对可能产生的尾矿量，尚不清楚，但我不得不做出结论，在尾矿库“关闭”后几十年里，很有可能发生由地震引发的突发性尾矿坝溃败，宏大的泥石流波浪，将冲向在下游的北方，导致灾难。

## 洪水风险

潮湿的气候，对于尾矿贮存构成了特殊问题。在这样的气候里，无法对尾矿进行干燥而实现稳定性。尾矿、地基、以及控制结构基台的渗漏，对稳定性是一个永远的威胁，而如果内部排水结构和抗渗漏屏障受到地震等破坏，内部侵蚀会随时间推移而恶化。最后，雨季大量的雨水，会增强任何裂口的运动，并延长溃败后泥浪奔涌到下游的距离。

苏门答腊西部是世界上最多雨地区之一，矿山一带降雨量在 3000-5000 毫米。对当地降雨量的分析显示，每天常见降雨量为 300 毫米 (Ref DOOSEUR)。高达年降雨量 10% — 比如 500mm — 的暴雨，有可能在坝址发生。如果按照重大设施国际标准，设计洪水量（有时称为“最大可能洪水量”），可能要远远超出这一水平。对于一个约 10 平方公里的水域，1 平方公里的尾矿池，需要能应对一场暴风雨中水位上涨 5-10 米，也就意味着给尾矿基本储量之上，又增加了 5 mcm 洪水贮存需求。从有关当地的大多数卫星照片中可以看到，洪水中将含有来自多个斜坡溃败的泥石杂物。此外，基岩的热带地质特征，会导致地下严重渗水（参见 Xe Pian Xe Namnoy - Ref Meehan 2018），即便在没有地震的情况下，也为尾矿坝的稳定性增添了更多危险。如果控制堤体系发生裂缝或部分溃败，大量的多余水分，也会加速尾矿坝溃败。

虽然尾矿区域周围山丘里经常有活跃的泥石杂物流动，对于可能存在的、并与该项目发生不良互动的大型半活跃滑坡，尚未有任何研究。

## 尾矿控制体系溃败的后果

湿尾矿控制体系的溃败，在大量雨水进入控制设施的雨季，会最危险。裂缝和挡水结构的移动，起初会像 San Fernando 坝部分溃败（图 6b）的情形一样 (Castro et al 2003)。但 San Fernando 坝只强烈摇晃了几秒钟。7.5 到 9 级的大地震，产生的摇晃将会延续很长时间，使得即便牢固的大坝，都产生很多米的裂缝和移位。这将会使得坝堤承受水流和湿尾矿的冲击，从而使得达尹里尾矿坝溃败，就像 Baldwin Hills 水库（请见视频：<https://www.youtube.com/watch?v=c4sm7DdIMkk>）和巴西的 Brumadinho 矿一样。

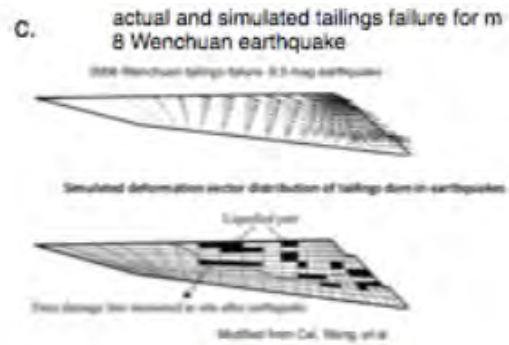


figure 6. a. Failure of Xe Pian dam in Laos 2008; dam breached shortly after this photo with runoff of 500 mcm water flowing 100 km and obliterating 6 villages. No earthquake here, but poorly built dam founded on typical weak leaky tropical soils made dam unable to survive filling of the reservoir b. Near failure of the San Fernando dam in California in a short m 6.6 earthquake. Another few seconds of shaking would have breached this dam with a great death toll. c Analysis by Cai, Wang, et al of a tailings dam in the 2008 Wenchuan earthquake shows that the dam fails in a m=8 earthquake. d. Likely performance of a tailings dam at Dairi mine during a very strong earthquakes, probably from the Great Sumatran fault zone near the site.

## 监管不足和“关闭”的不可能

当前，像智利和加拿大等国家，因为长久和大规模事故的教训，就尾矿设施的部署，开发了更为严格的监督或限制政策。2014年 Polley 山灾难后，加拿大认识到自己原本以为合格的监督并不充分，呼吁对尾矿设施做出新的限制，尤其对可能在达尹里矿出现的那类“湿”尾矿，特别持怀疑态度。负责任的加拿大的审查人员提出了政策变化建议，包括把责任追究到以前想出限制责任方法的董事和“合伙人”身上。印尼只是刚刚开始建设一个具有坝安全知识的监管机构（培训是由联合国出资的），所以在这方面缺乏经验。从新的开采中的矿山（比如达尹里附近的 Martabe 金矿）来看，传统的尾矿处置方法已不被接受。对此金矿应当进行研究，以预测达尹里采矿和监管人员可能考虑接受的标准。

据说尾矿处置设施的“寿命”是 10,000 年。一个尾矿处置设施，只要存留有任何重大隐患（达尹里尾矿地点就是如此），就不应当被认为已经“关闭”。

## 有毒化学物质释放到环境里



矿体硫化物含量高，随着溶解和分解铅，会导致酸和其它危险物质的形成。中国研究人员最近确定，这种情况在铅锌矿不能接受，必须得到预防 (Zhang et al 2012)。达尹里矿址的地质条件，使得包括铅在内的有毒物质，很容易转移到地下环境中。

### 重要数据问题

达尹里尾矿的处置，提出了很多技术安全问题，包括与酸性浸出液、粉尘、滑坡、以及上述洪水/地震相关的问题。但就我评论涉及到的有限内容来说，就存在几项重大数据问题。

1. 在不同场景下要贮存的最大尾矿量，以及膏体回填的成功等（如果 DPM 提供新的信息，我的年产量 100 万吨、30 年期的估值可能需要修改）。
2. 控制坝的场所和设计细节，比如坡度、材料、渗漏控制措施、洪水发生保护等。
3. 尾矿和控制系统下的地基。热带典型的脆弱和漏水的地基，有可能使得任何设计都不安全（图 6a：2008 年 Xe Pian 坝的溃败。这张照片拍摄后很短时间，坝溃败，500mcm 的水倾泻 100 公里，淹没了 6 个村庄。这儿没有发生地震，但地基是典型的热带土壤，坝体建设也很差，导致坝体不能承受水库水量）。
4. 在矿山生命周期以及永久对尾矿设施进行监测和安全评审的计划。

项目如果不提供和公开上述信息，是完全不可接受的。矿址已经具有高风险，而如果不对上述信息进行仔细审查，就很难评估项目的安全性。



Richard L. Meehan

## 参考书目

Zhang X1, Yang L, Li Y, Li H, Wang W, Ye B.

Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China.

Environ Monit Assess. 2012 Apr;184(4):2261-73. doi: 10.1007/s10661-011-2115-6. Epub 2011 May 14.

WALL STREET JOURNAL 12/20/19 "Miners-seek-safer-waste-disposal but-it-hasnt-been-easy"

<https://www.wsj.com/amp/articles/miners-seek-safer-waste-disposalbut-it-hasnt-been-easy-11577016001>.

Also WSJ 12/22/19 "After Deadly Dam Spills, Miners Seek a Better Way—It Isn't Working Out" by Rhiannon Hoyle

Zongjie Lyu ,1 Junrui Chai ,2,3 Zengguang Xu ,4 Yuan Qin ,4 and Jing Cao5

A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History

Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2019, Article ID 4159306, 18 pages

<https://doi.org/10.1155/2019/4159306>

Castro, Gonzalo & Poulos, Steve & Leathers, Francis. (1985). Re-Examination of Slide of Lower San Fernando Dam. Journal of Geotechnical Engineering. 111. 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1093).

Insider Network December 20, 2017– PT Dairi Prima Mineral (DPM), a subsidiary of PT Bumi Resource Minerals Tbk (IDX:BRMS), has obtained a 30-year production permit for Dairi Lead-Zinc Mine in North Sumatra. ....The expected ore production, according to the feasibility study, will be 1 million tons of ore per annum (approximately 3,000 t/day). A second resource on the same concession known as Lae Jahe is expected to contain a similar amount of zinc, lead and silver.

Ivan Gratchev, Masyhurlrsyam, Iku Towhata, Bakhtiar Muin, Hasbullah Nawir

GEOTECHNICAL ASPECTS OF THE SUMATRA EARTHQUAKE OF SEPTEMBER 30, 2009, INDONESIA

SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 51, No. 2, 333–341, Apr. 2011 Japanese Geotechnical Society

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038080620300445>

Terence W Middleton, 2003

THE DAIRI ZINC-LEAD PROJECT, NORTH SUMATRA, INDONESIA, Discovery to Feasibility

SMEDG - Sydney Minerals Exploration Discussion Group

<https://www.smedg.org.au/Tiger/DairiZinc.htm>

Sijing Cai University of Science and Technology Beijing, China Xiaoning Wang University of Science and Technology Beijing, China Wensheng Lyu University of Science and Technology Beijing, China Peng Yang Beijing Union University, China. Liquefying-damage of mine tailings dams in earthquakes

[https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1752\\_23\\_Cai/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1752_23_Cai/)

Sørensen,MB,K. Atakan, and N. Pulido,

Simulated Strong Ground Motions for the Great M 9.3 Sumatra–Andaman Earthquake of 26 December 2004 Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 1A, pp. S139–S151, January 2007, doi:

10.1785/0120050608

Richard Meehan and Douglas Hamilton Xe Pian Xe Namnoy: Land stability and dam failure on the Bolaven Plateau, Laos

<https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/09/11/xe-pian-xe-namnoy/>

U.S. Geological Survey 2013

Seismicity of the Earth 1900–2012 Sumatra and Vicinity

Compiled by Gavin P. Hayes,<sup>1</sup> Melissa Bernardino,<sup>2</sup> Fransiska Dannemann,<sup>3</sup> Gregory Smoczyk,<sup>1</sup> Richard Briggs,<sup>1</sup> Harley M. Benz,<sup>1</sup> Kevin P. Furlong,<sup>4</sup> and Antonio Villaseñor <sup>5</sup> 2013.  
[pubs.usgs.gov/of/2010/1083/l/pdf/OF10-1083\\_L-508.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/l/pdf/OF10-1083_L-508.pdf)

Meehan, Richard, New space data offer instant clues to cause of deadly Laos dam disaster  
<https://blume.stanford.edu/news/new-space-data-offer-instant-clues-cause-deadly-laos-dam-disaster>

H. DOSSEUR D. IBIZA HYDROLOGICAL STUDY FOR MINI HYDROS PROJECTS  
IN WEST SUMATRA (INDONESIA)

[https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers16-07/33800.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-07/33800.pdf)

Petersen, M. D., J. Dewey, S. Hartzell, C. Mueller, S. Harmsen, A. D. Frankel, and K. Rukstales (2004). Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula, *Tectonophysics* 390, 141–158.

Meehan, RL (2012). "Ground rupture in the Baldwin Hills: fracking 2012". Retrieved 2012-12-15.  
<https://www.youtube.com/watch?v=c4sm7DdIMkk> See video minute 1:22 for this failure in progress.