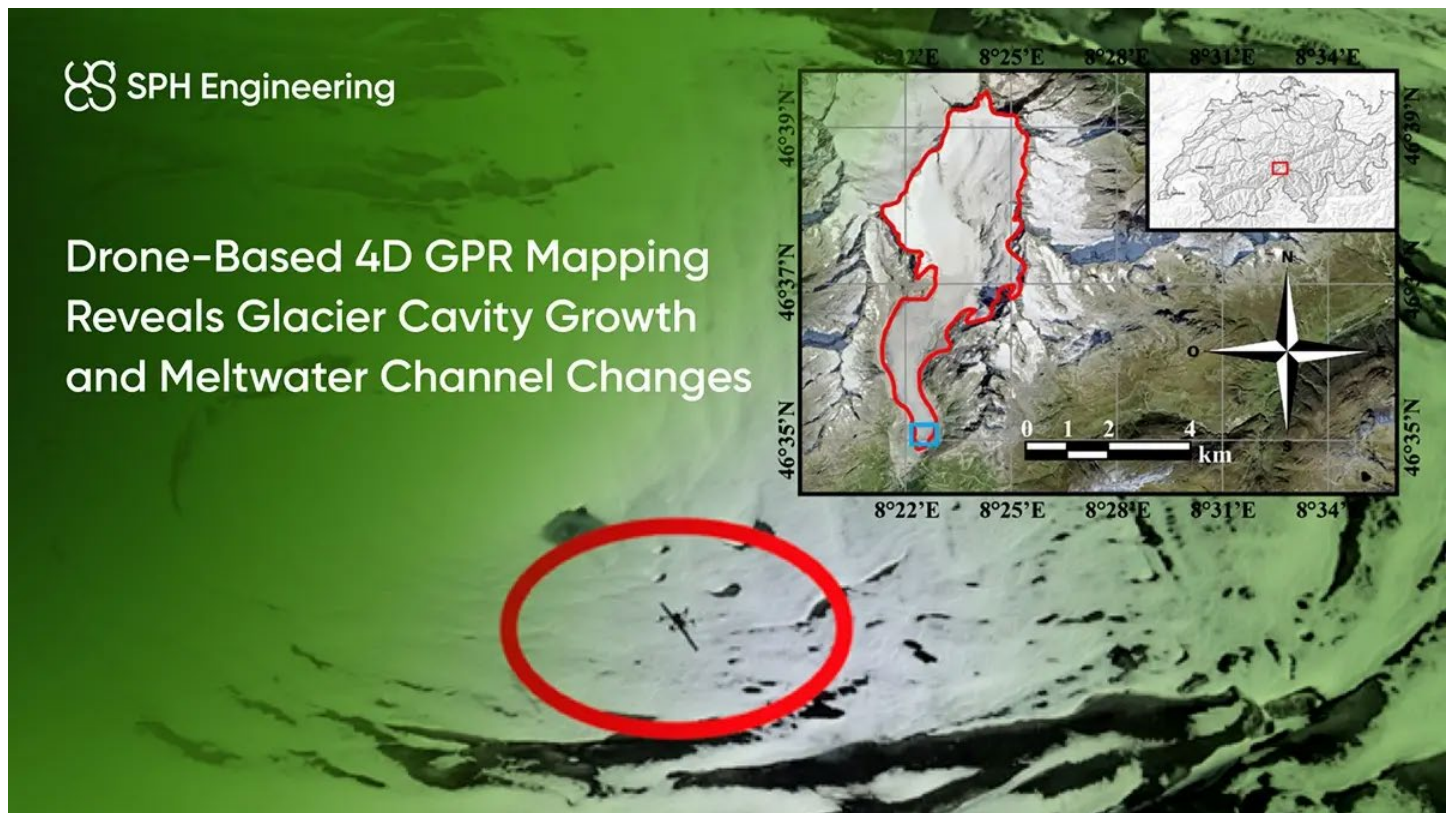


基于无人机的罗纳冰川 4D 探地雷达测绘：揭示冰洞扩张与融水通道演变

2025年10月13日



本案例研究展示了如何利用基于无人机的探地雷达（GPR）系统，对瑞士罗纳冰川（Rhône Glacier）的冰下结构进行精确测绘。通过将搭载于无人机的雷达与自动化飞行计划和实时仿地飞行技术相结合，研究人员获取了高密度的 4D 数据，揭示了传统方法难以触及的冰洞扩张、冰层变薄以及动态融水通道的演变过程。

本案例研究基于洛桑大学 CRAG 研究组的科研论文 Ruols 等人 (2025)。

项目概览

- **地点与时间：** 瑞士罗纳冰川，2022年7月至10月
- **应用：** 冰冻圈测绘领域的无人机探地雷达（GPR）
- **行业：** 冰川学与气候研究
- **硬件：** 搭载定制 80 MHz GPR 天线及 RTK GPS 的无人机（UAV）
- **软件：** 具备**真实仿地飞行（TTF）**功能的 UgCS
- **勘测密度：** 共进行四次勘测飞行，测线间距均为 1米
- **成果：** 建立 4D 冰洞模型，显示冰顶厚度减少了 68%，冰洞扩大了 16%

该项目充分证明了将 GPR 传感器与无人机自动化技术相结合，在实现安全、高分辨率的冰冻圈测绘方面所具有的独特价值。

背景：为何要研究冰川内部？

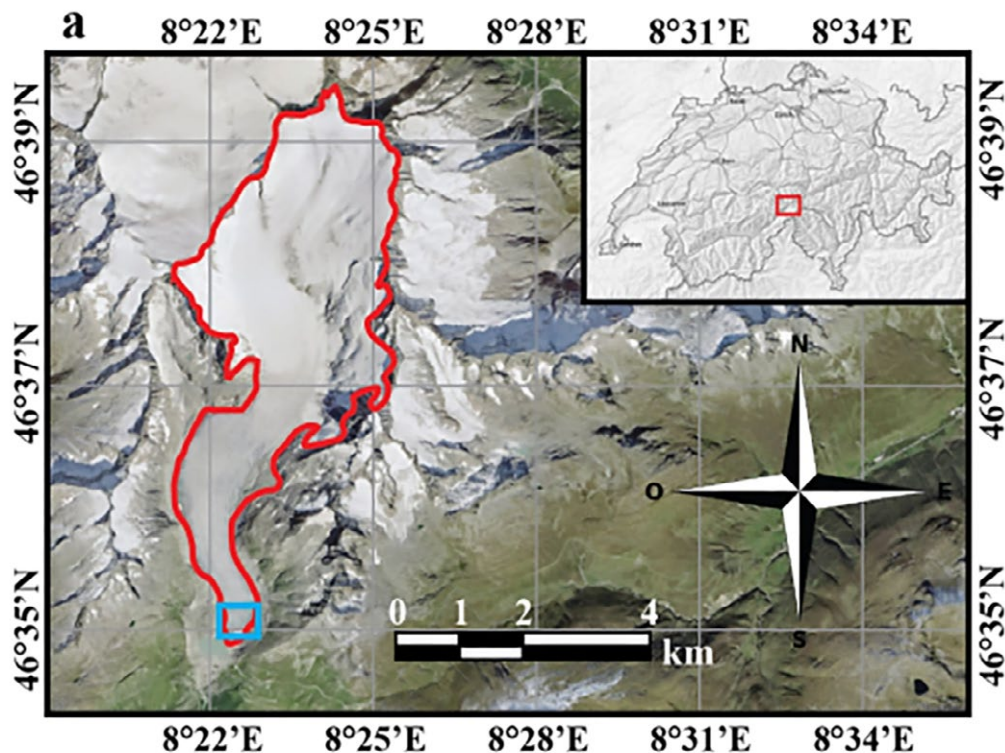
冰川是由冰、水、空气以及底部基岩之间复杂相互作用塑造而成的动态自然系统。这些相互作用深刻影响着冰川的运动、稳定性以及融化模式。在冰川深处，隐藏着排水通道和冰洞等特征，它们左右着冰川的活动，却极难被直接监测。

深入了解冰盖之下的情况，对于预测冰川动态和评估气候影响至关重要。传统的地面勘测和钻孔方法对隐藏冰川特征的探测能力有限且充满风险；同时，冰隙、不稳定的冰面以及低数据分辨率，使得捕捉细微的冰下变化变得异常困难。

位于瑞士的罗纳冰川近期在其末端附近经历了数次严重的崩塌事件。这些崩塌主要是由冰川快速融化、冰层变薄导致的结构弱化，以及冰下水流路径的改变所引发的。

为此，洛桑大学 CRAG 研究组的团队启用了基于无人机的探地雷达（GPR），旨在揭开冰川内部结构演变的神秘面纱。

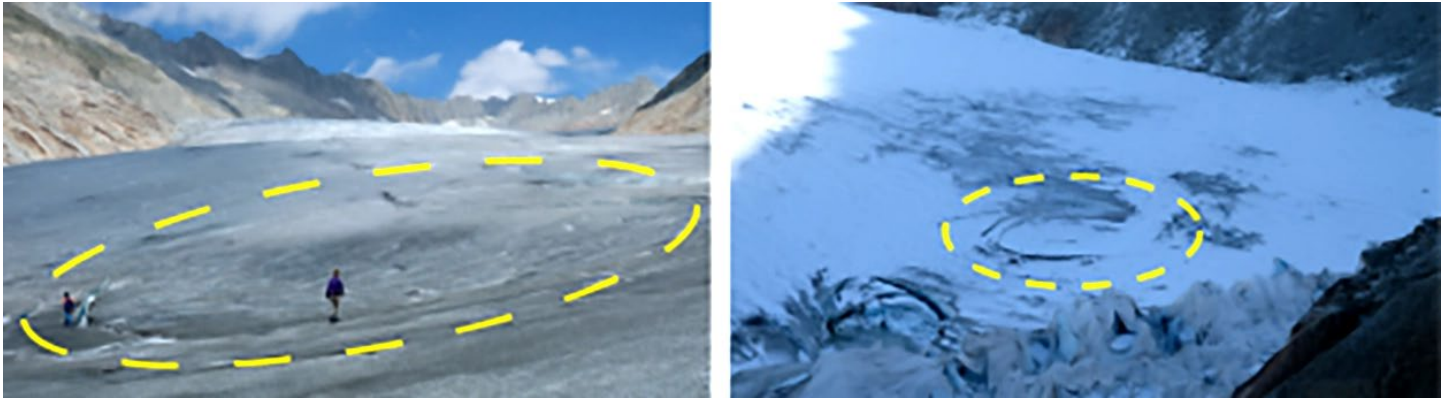
冰下测绘面临的挑战



图片说明：瑞士中部罗纳冰川的位置（红色轮廓）。蓝色方块表示我们的 GPR 勘测区域 - 图片来自 Ruols 等人，2025

使用**精密雷达传感器**监测冰川隐秘的内部构造，面临着诸多环境与技术上的挑战：

- **难以接近**：冰隙和不稳定的地表极其危险，使得科考团队难以安全抵达并研究关键的冰川区域。
- **极高的数据精度要求**：解析冰盖下的冰川特征需要高分辨率的数据支撑。传统方法往往无法提供足够的细节，从而在研究中留下关键的认知空白。
- **随时间快速变化**：冰川内部结构（如水道和冰洞）在短期内可能发生剧变，有时甚至在几天或几周内就会截然不同。这要求进行频繁且一致的监测。
- **数据判读极其复杂**：区分冰洞、裂隙和水道等地下特征是一项复杂的工作。任何误读都可能导致对冰川稳定性和演变过程的错误评估。



图片说明：左图为崩塌特征的早期阶段，冰川表面有明显的凹陷（2022年7月28日）。右图为该特征的晚期阶段，远观清晰可见且被雪覆盖（2022年10月4日）- 照片来自 Ruols 等人，2025

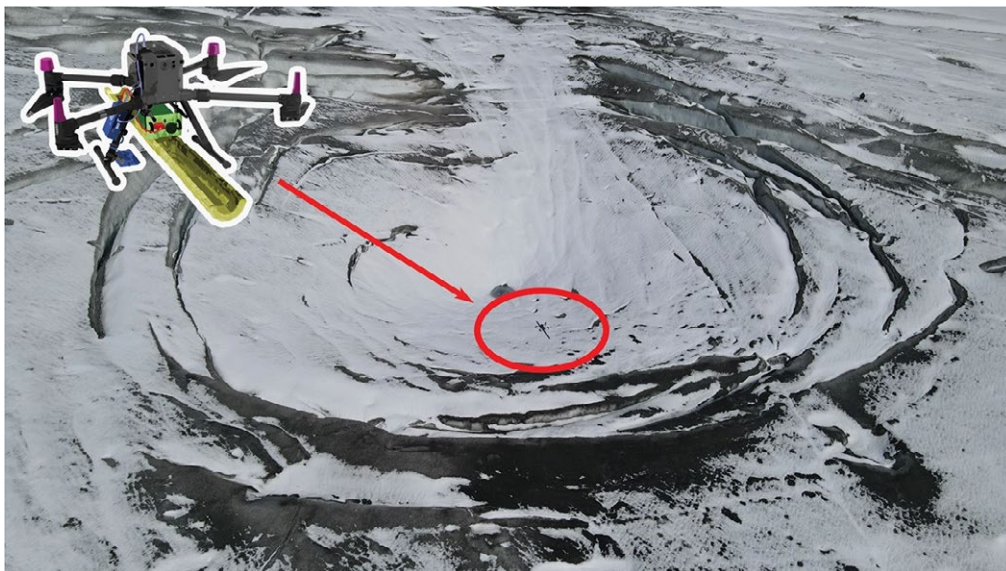
基于无人机的 GPR 勘测解决方案

为了克服上述障碍，研究人员部署了一套专为深层冰体成像设计的**基于无人机的探地雷达（GPR）系统**。

该无人机搭载了定制的 **80 MHz 天线** 和高精度的 **RTK GPS 定位系统**，能够探测地表以下数十米深度的结构。

飞行任务由 **UgCS 飞行计划软件** 及其搭载的 **SPH Engineering 真实仿地飞行（TTF）** 技术实现自动化控制，使无人机即使在崎岖不平的地形上空，也能始终保持 **5米的高度（AGL）**。这不仅保证了雷达耦合的一致性和信号质量，还最大限度地降低了操作人员在不稳定冰面上的安全风险。

在 **2022年7月至10月** 期间，团队进行了**四次测线间距为 1米 的高密度勘测**，成功构建了该崩塌特征的 **4D 数据集**（随时间变化的 3D 数据）。



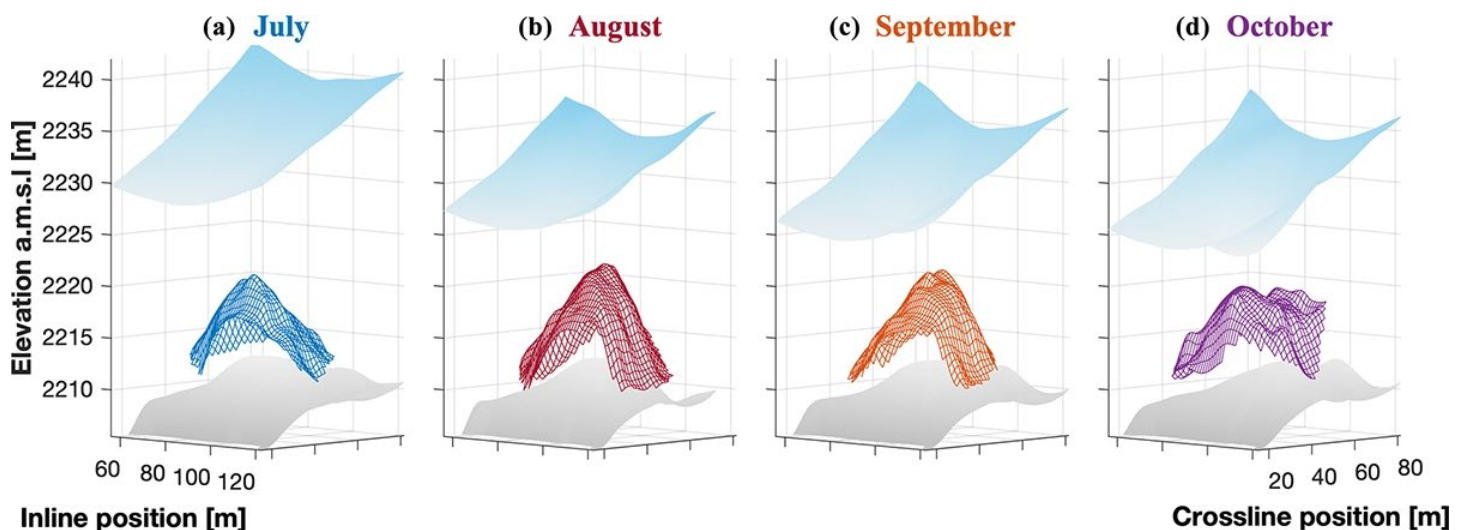
图片说明：基于无人机的 GPR 系统于2022年10月4日在罗纳冰川崩塌特征上方采集数据 - 照片来自 Ruols 等人，2025

勘测成果与数据洞察

精确测量冰洞的形成过程

基于无人机的 GPR 数据清晰地展示了冰盖下方冰洞的扩张过程，记录了冰顶厚度从7月份的 9.6米 锐减至10月份的仅 3.0米。与此同时，冰洞的高度从 15.9米 增加到了 18.4米，凸显了严重的融化和结构弱化现象。

月份	最小冰顶厚度 (m)	最大冰洞高度 (m)
7月	9.6	15.9
8月	6.1	16.8
9月	5.3	16.9
10月	3.0	18.4



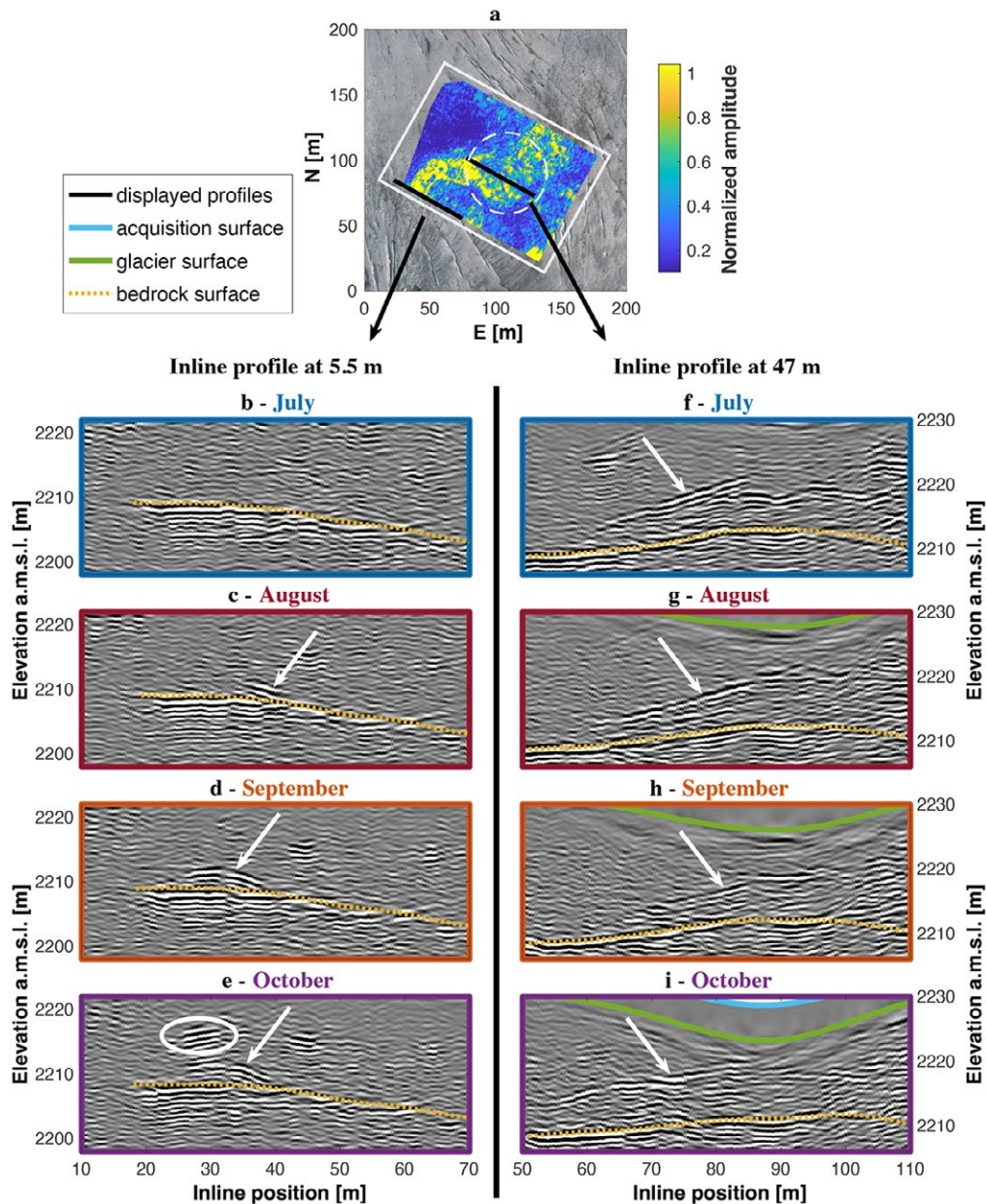
图片说明：2022年7月至10月期间演变中的冰下洞穴的 4D 可视化，清晰显示了冰洞高度的增加和冰顶的变薄 - 图片来自 Ruols 等人，2025

清晰追踪冰下水道演变

通过振幅分析，研究人员精准绘制了冰川下方水道的路线及形态变化。在整个夏季，水道变宽、变直等显著变化被清晰地记录下来，这与冰川前缘融水流量的增加和暖空气的暴露密切相关。

冰川内部结构的详尽可视化

高密度的 GPR 剖面图提供了冰川内部的精细视图，揭示了新产生的裂隙、冰层脱落以及冰洞顶部的逐渐下沉。这些图像以前所未有的清晰度展示了冰川崩塌的发生机制。



图片说明：内部 GPR 剖面图展示了从2022年7月到10月的详细内部变化。剖面 (a-e) 突出了冰下水道的演变，而剖面 (f-i) 则说明了冰盖下方冰洞顶部的逐渐沉降和破裂 - 图片来自 Ruols 等人，2025

结论

该项目有力地证明了使用**先进的基于无人机的 4D GPR 技术进行高分辨率冰川测绘**的巨大潜力。研究人员成功捕捉了罗纳冰川崩塌特征的详细演变过程，突破了传统勘测方法的局限性。

这项研究为冰川下方冰层快速变薄、冰洞扩张以及水道演变提供了**精确的测量数据**。这些发现强调了基于无人机的 GPR 系统在未来冰川研究中的重要作用，将极大地提升我们对冰川稳定性及其对气候变化响应机制的理解。

参考文献

Ruols, B., Klahold, J., Farinotti, D., & Irving, J. (2025). 4D GPR imaging of a near-terminus glacier collapse feature. *The Cryosphere*, 19, 4045–4059. <https://doi.org/10.5194/tc-19-4045-2025>

罗纳冰川研究的补充视频和数据动画：<https://zenodo.org/records/15652968>

了解更多关于 Bastien Ruols 的研究工作：<https://www.linkedin.com/in/bastien-ruols/>

了解更多