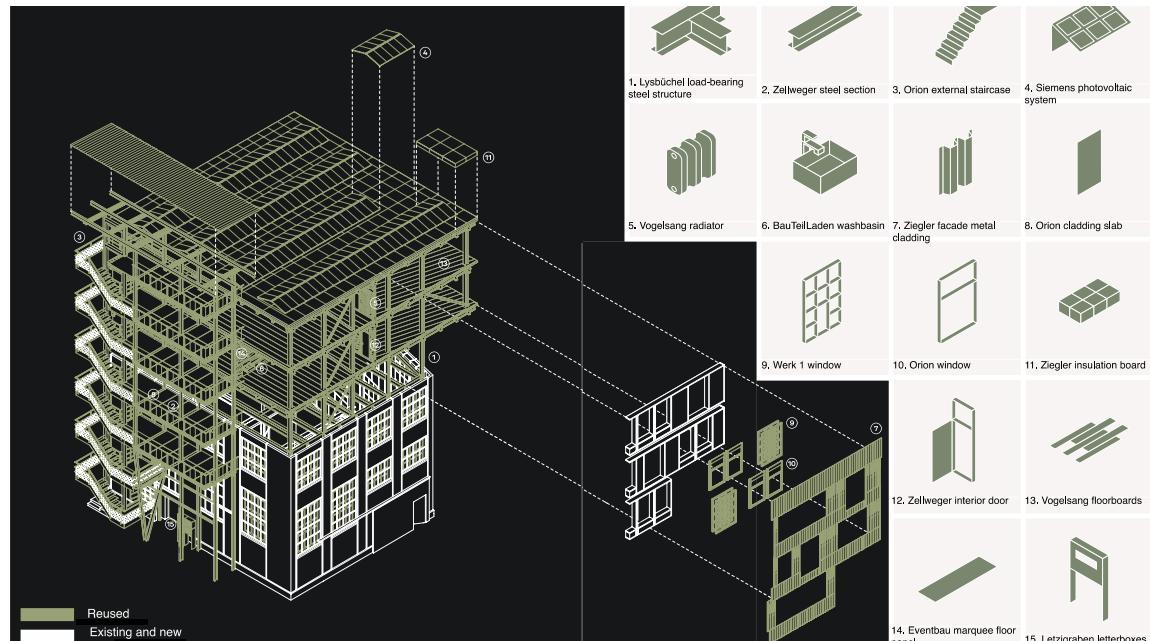


中瑞零碳建筑合作项目

循环建造 - 瑞士经验



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

intep
skat Swiss Resource Centre and
Consultancies for Development

版本说明

编辑信息

2024 年 8 月, 版本 1.0

项目发起与指导方

中华人民共和国住房和城乡建设部
瑞士联邦外交部发展合作署

主要作者

intep 团队

- Roland Stulz
- 路枫 博士
- Wesely Wojtas
- 朱继龙
- Fabienne Hugi
- 王欣昱

IKE 和 IPB ZHAW 团队

- Andri Gerber 博士, 教授
- Patric Fischli-Boson
- Guido Brandi
- Adrian Kiesel
- Yasaman Yavaribajestani

UAD 团队

- 李寅

合作作者

- 上海示范项目团队
- 绍兴示范项目团队
- Willers 团队
- CABR 团队

特此感谢中瑞零碳建筑项目 (ZEB 项目) 上海和绍兴示范项目的投资者和设计团队提供本报告所需的项目数据。

内容

1. 中瑞零碳建筑项目背景	4	6. 循环建造	47
1.1 关于中瑞零碳建筑项目	4	6.1 上海零碳建筑示范项目：市集馆及展览馆	47
1.2 ZHAW 苏黎世应用科技大学 IKE 研究所和 IBP 研究所的角色	4	6.2 陕西留坝蜜蜂博物馆示范项目	57
2. 循环建造	6	附录	74
2.1 简介及定义	6	A1. 术语释义	75
2.2 实现循环建造的五种方法	7	A2. 参考文献	77
3. 再利用：K.118 示范项目	15	A3. 缩写词汇表	79
3.1 项目历史	15	A4. 再利用游戏导则	80
3.2 利用重复使用的构件开展设计	16		
3.3 施工管理	20		
3.4 10 种不同建筑构件的成本比较	20		
3.5 温室气体排放比较	23		
3.6 平面图、剖面图和细部设计图	28		
4. 可拆卸设计	31		
4.1 介绍和定义	31		
4.2 ZHAW 的「家具再利用」教学课程	35		
5. 实地考察报告	38		
5.1 对中国建筑和城市的印象	38		
5.2 2023 年 10 月 18 日研讨会	39		
5.3 第 2 阶段 - 「再利用」桌面游戏	44		
5.4 未来教育	44		
5.5 相关结论	45		

1. 中瑞零碳建筑项目背景

1.1 关于中瑞零碳建筑项目

为了共同应对全球气候变化并加强中国和瑞士在建筑行业减排领域的合作，中华人民共和国住房和城乡建设部与瑞士联邦外交部于2020年11月24日签署了一份谅解备忘录（MoU），该备忘录涉及在建筑能效领域开展合作。在此备忘录框架内，瑞士发展合作署（SDC）启动并资助了中瑞零碳建筑项目。该项目旨在支持中国制定零碳建筑的技术标准以及为建筑行业减碳制定长期路线图。瑞士通过分享不同气候区零碳建筑示范项目的知识和案例，同时开展各种形式的能力建设活动，最终促进中国建筑行业的碳中和发展。

1.1.1 项目目的

- 将现行建筑能效标准升级为零碳技术标准。
- 在4个典型气候区实施示范项目，测试新的ZEB标准并寻找优化潜力。
- 零碳建筑能力建设和知识传播

1.1.2 项目持续时间

第一阶段：2021年3月15日 – 2025年2月28日



图1：瑞士驻华大使贝尔纳迪诺·雷加佐尼 (Bernardino Regazzoni) 于2020年11月24日会见中国住房和城乡建设部副部长倪虹并签署协议，©瑞士驻北京大使馆

1.1.3 项目对气候保护的影响

减少建筑领域的二氧化碳排放

1.2 ZHAW 苏黎世应用科技大学 IKE 研究所和 IBP 研究所的角色

苏黎世应用科技大学（ZHAW）的建筑构造设计研究所（IKE Institut Konstruktives Entwerfen）以及建造技术和施工流程研究所（IBP Institut Bautechnologie und Prozesse）在瑞士循环建造领域的应用和研究上处于领先地位，特别是在既有建筑构件的再利用和建筑构件的可拆卸设计方面。

IKE 研究所和 IBP 研究所作为产学研交流合作中心，力图将其研究成果转化为具体的建筑设计方法并服务于实际建造实践，以此培养通才型的职业建筑师和职业结构工程师。

这两个研究所能够在各个示范项目团队介绍相关设计方案时，可以直接在现场提供多种可用于实践的改进建议。这些建议包括可重复使用的特殊室内隔墙系统、以稻草秸秆作为保温材料的预制式木制外墙、以及遵循可拆卸设计原则的钢结构节点等。

此外，为了在中国考察示范项目期间与设计团队更直观有效的举行会议，IKE 开发了一款桌面游戏：这款桌游基于「严肃游戏」进行开发，旨在解释建筑构件再利用的原则，以及如何转变传统的思维观念，在实际项目更多的采用构件再利用的策略。IKE 的长远目标是希望未来在中国高校和大学中推广这款游戏，培育新一代的建筑师和工程师。游戏导则请见附件 A4。

2. 循环建造

2.1 简介及定义

循环建造意味着给建筑材料赋予新的使用周期，从而充分利用其实际寿命。本文所展示的各种案例中，循环链条越短，对于环境、经济和文化方面造成的损失就越少，循环性与建筑物的融合就越紧密。

将建筑废料回收再造成为新材料，如回收混凝土或回收钢材，主要是材料加工方面的问题，与设计和施工的关联较小，而且这一过程仍然需要大量能源和沙石（就回收混凝土而言）。相比之下，整个建筑构件的再利用和可重复使用，才是对建筑设计的真正挑战，需要考虑建筑可持续性的方方面面，例如如何对既有建筑及其部分建筑构件的修复、再利用和扩建。我们在研究中使用了“保护”(preservation)、“再利用”(reuse) 和 “回收再造”(recycling) 这三个总括术语来描述这三种不同的循环链条，每个术语都可以根据不同的语境（如环境影响、经济性、文化意义等）进一步加以区分。

图 2 展示了再利用的各个阶段 (R 代表 Recycling，包括 R1、R2、R3、R4、R5 五个阶段) 如何融入建筑生命周期模型，该模型基于 SN EN 15804+A1/SIA 490.052+A1 标准，是瑞士建筑环境碳足迹评估的基础。

- 保护 (英文“Preservation”，德文“Erhalt”)：在原址保留建筑整体或部分建筑，以延长其使用寿命。
- 再利用 (英文“Reuse”，德文“Wiederverwendung”)：对建筑构件进行再利用，无论其原有用途和新用途之间的质量标准是否存在差异（可以是拆卸回收的构件，也可以是多余的构件，可以是经过加工处理过的，也可以是未经加工处理的，可以是按原功能再利用的构件，也可以是改变使用功能再利用的构件）。
- 回收再造 (英文“Recycling”，德文“Verwertung”)：通过分解既有建筑材料的原始形态（如粉碎或熔化），将其转化为新的材料或产品。

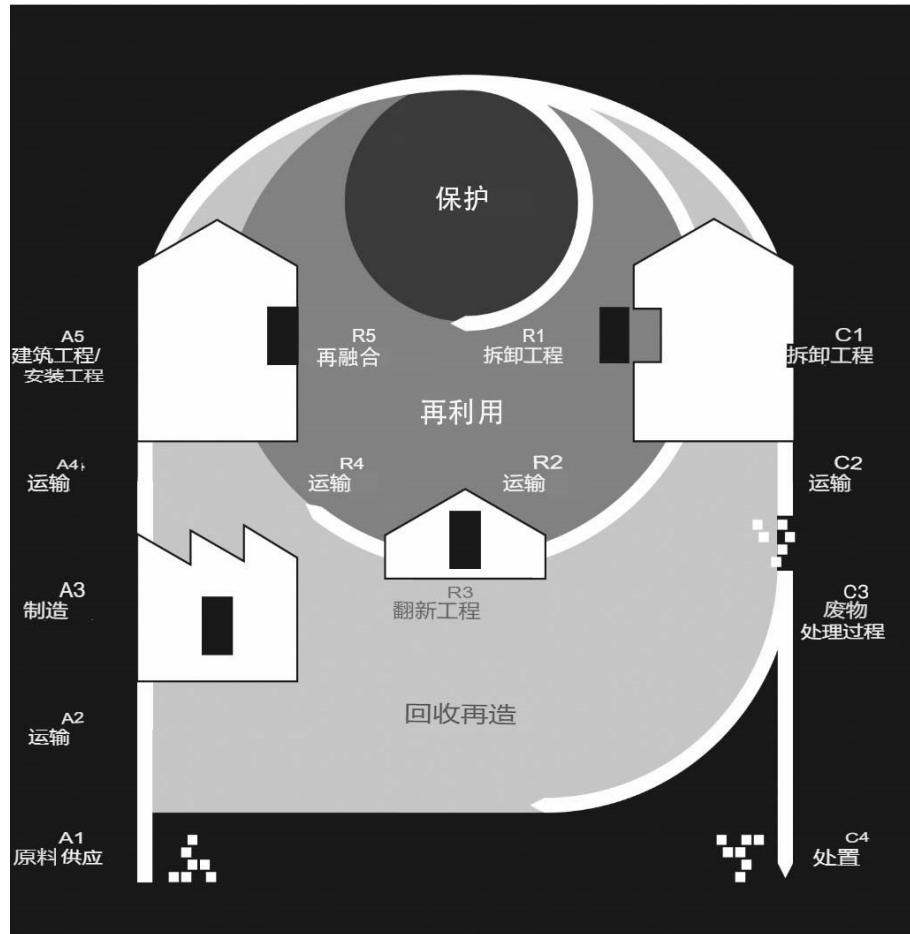


图 2: 生命周期模型图 ©ZHAW

传统的建筑行业线性消费模式中，从 A1 到 C4 的所有阶段都会产生碳排放，而通过循环建造倡导的「再利用」是避免温室气体排放最有效和最直接的捷径。根据当下的建造标准，建筑构件的再利用可以帮助我们节省 90% 的隐含碳排放，其减排成效与其他措施相比更加事半功倍。

2.2 实现循环建造的五种方法

建筑业实现循环建造有诸多方法：尽可能使用回收制造的产品，采用天然材料和本地材料，根据建筑构件的使用寿命进行定制化建造，并确保建筑构件安装拆卸的可逆性。

目前，线性建造过程中使用的所有材料最终都会成为垃圾废物，而循环建造模式则是线性建造模式的逆向概念。如果我们不考虑建筑运营能耗（近年来建筑业已经显著减少运营能耗，其减排效果主要取决于建筑一次能源的生产过程是否清洁，例如绿色电力），那么真正符合循环建造的建筑，其最终目标就是实现一个永不产生垃圾废物的建造过程，由此，建筑中所有的隐含碳都可被保留下来。毫无疑问，实现这一目标将是一个漫长且困难的过程，但同样也应该指出，在从线性模式向循环模式转变的过程中，我们不必一步到位，而是采取许多中间措施，并尝试多种创新设计方法。

本报告通过五个不同的参考案例，提出了五种可能帮助我们实现建筑循环建造的策略。这些策略在某些情况下相辅相成，但也有彼此矛盾的时候，毕竟，建筑设计并不是简单地实施一系列建议。这里所讨论的方法都受到现代主义建筑的影响，也就是与 19 世纪末钢筋混凝土技术发展密切相关，并仍在持续影响着今天的建筑设计和施工建造。循环建筑需要理解现代主义建筑运动，但也要超越它：在此过程中，不应忽视经济上的可行性。毕竟，现代主义建筑之所以能够广泛传播，得益于其设计易于实施、材料普遍存在、以及混凝土建筑所带来的形式自由度和材料出色的防火防水性能。

为了保证循环建造具有足够的经济竞争力，循环建造需要遵循以下原则：

- 尽量减少浪费
- 使用更少但更可持续的材料
- 使用当地生产加工的建筑材料和构件
- 建筑构造各层级的可分离性（例如结构层、保温层、饰面层、防水层，设备层的分离以及少用不可分离处理的复合型材料和复合式构造）
- 便于拆卸的设计

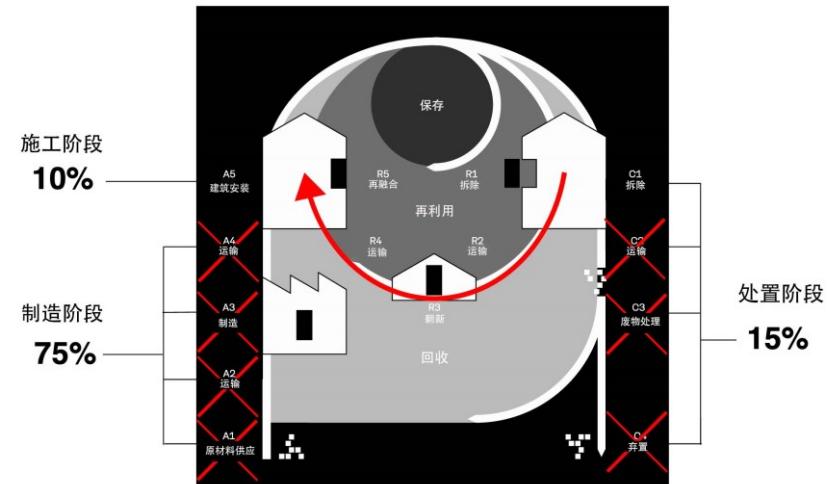


图 3: 强调建筑构件和建筑材料重复使用的建筑全生命周期模型图 ©ZHAW

2.2.1 避免产生建筑垃圾

如果我们要避免产生建筑垃圾，第一步是尽可能地尝试将拆除下来的建筑材料进行重复利用。废弃的建筑构件还蕴含了其制作过程中的工艺技术和设计知识，因此它的内在价值和潜在价值远远超出了作为垃圾废料的价值。在欧洲，我们看到公众不仅对直接使用废旧材料的价值有了新的理解，也对如何组装和拆卸单个组件有了新的认识。例如英国 Assemble Studio（中文直译为“组装工作室”），这是一个由建筑师、艺术家和哲学家组成的跨界设计团体，因其在利物浦的城市更新改造项目“格兰比四街”（Granby Four Streets：该项目通过修复破旧房屋、改造公共空间、社区合作和可持续的经济扶持，成功地将一个衰退的社区转变为充满活力和希望的社区，成为社区再生的典范）而获得国际认可，并赢得了 2015 年的特纳奖（由伦敦泰特美术馆设立的国际艺术奖）。其他例子还包括布鲁塞尔的设计团体 Rotor 和法国的设计团体 Bellastock，后者每年都会在法国各大城市举办「Bellastock 建筑节」，展示各种由废旧材料建造的临时展馆。

米兰 Studio Albori 工作室的 Emanuele Almagioni, Giacomo Borella, 和 Francesca Riva 三名建筑师自 20 世纪 90 年代以来一直在探索这种设计方法。因为痛恨拆除既有建筑和丢弃建筑材料，他们总是尽可能地重新利用现有的建筑构件和建筑材料，从而延续历史。例如，他们为复兴米兰废弃的 San Cristoforo 车站（由 Aldo Rossi 阿尔多-罗西和 Gianni Braghieri 詹尼-布拉吉耶里设计）提出的城市更新方案，以及 2015 年为芝加哥建筑双年展设计的装置展览作品：建筑师用自行车作为交通工具，将废弃的木楼梯分批运输到芝加哥文化中心重新组装，成为互动式的装置艺术品。

在意大利和瑞士交界地带的小镇拉文诺 (Laveno)，Studio Albori 工作室在镇中心重建了一栋家庭住宅，充分展示了工作室的循环建造设计方法。项目初期的设计思路是尽可能多地保留既有的两层住宅的原有主体结构：砖结构墙体、木屋顶、旧门窗以及毗邻马焦雷湖的湖景，仅对室内部分进行改造，并在朝向湖面的外立面设置景观大窗。不幸的是，原有建筑的结构状况非常糟糕，只能选择拆除重建，且新建建筑不得超过原有建筑体量，以符合市政当局严格的建设规范。面对必须拆除既有建筑的现实，Studio Albori 工作室最关心的是如何在新建筑中重新整合利用尽可能多的现有建筑元素：门窗被逐一分类编号，代表当地传统的六角形水泥地砖、石门槛、石台阶、木制楼板、木屋架和木梁都被小心拆卸，并运至建筑承包商的仓库妥善保存，屋顶瓦片和金属栏杆也是如此，而废弃的石块和砖块则被用于回填基坑。接下来，建筑师必须决定用什么材料来建造新的支撑墙：他们选择了 36cm 厚的轻型木结构，木龙骨之间填充稻草秸秆捆（一种天然的农业废弃物）；木材来自当地的木作工厂，与原有的屋顶和地板相得益彰。他们最初设想将旧的六角形地砖重新利用作为面向教堂一侧的外立面装饰面，与湖边村庄传统的典型红白之字形图案相呼应。然而这一设计却遭到了业主的反对，工作室别无选择，只能改为采用业主库存的陶土砖作为外立面。由于漫长的等待、突如其来的变化、与文保官员的分歧，再加上对场地的高度敏感，整个设计和建造过程总共花费了十年时间才完成。这种建筑实践方法虽然不可能成为全球性的普世典范，但至少为既有建筑环境风貌的发展提供了更加可持续和更加详尽细致的设计方法。

拉韦诺住宅

意大利瓦雷泽，拉文诺 - 业主：私人委托 - 建筑师：Studio Albori 工作室，米兰

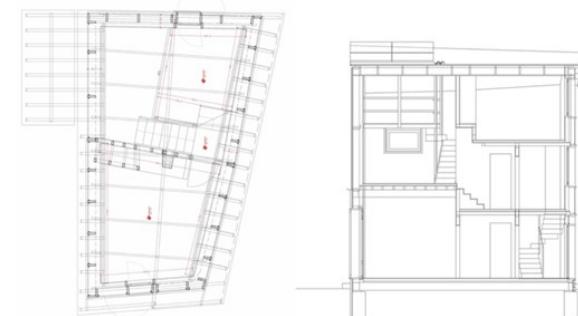


图 4：从左到右：房屋的“新”立面；朝向教堂的北立面；首层平面图；剖面图 ©STUDIO ALBORI

2.2.2 材料性

如今，人们呼吁采用「忠于材料」的设计方法（尊重材料本身、强调材料美学、功能与形式统一、减少不必要的装饰）同时又带有全新的生态考量：采用当地的天然材料进行建造在建材隐含碳排放方面具有巨大的降碳减排潜力。在当今建筑材料选择极其丰富的情况下，建筑师若仅使用少数几种简单的天然材料，会出现

什么样的设计成果？这对建筑的可持续性和循环建造又会带来怎样的影响？

木材可能是用途最广泛的建筑材料：不仅材料本身的隐含碳排放低，而且对其进行二次加工后的产品几乎能满足建筑物的所有结构、隔音和防火要求。不过，即使是木材也需要谨慎使用：应避免使用其衍生产品，并充分展示材料的天然特性。例如由多层木料压制成型的工程木地板铺装在生产过程中的隐含能耗是实木地板铺装的八倍，胶合木地板铺装也同样如此。

在瑞士 Alpnach，建筑师 Patrik Seiler 和 Søren Linhart 建造了一栋宣言式的住宅：在与木业家族企业 Künig 的紧密合作下，几乎全由木材建造。Künig 家族既是这栋住宅的业主，也是实木加工制造商。整个建筑结构——外墙、内墙、天花板和屋顶——都是实木，即交叉层压云杉木（Cross Laminated Timber，简称 CLT），木构件之间仅用榫木榫头连接，不使用任何胶水、化学添加剂或金属连接件。

木材全部取自周边地区，并在 Kungs 木业家族的当地工厂里就地加工。每块单板厚度为 21cm，具有 90 分钟的耐火性能（F90）。两块这样的板材组成的双层板作为实木外墙，无需额外保温，并且能够支撑同样由木钉层压木（Dowel Laminated Timber，简称 DTL，由多层实木板材通过木钉连接而成，而非胶水或金属连接件）制成的楼板。

这是一座在“材料纯粹”的建筑，内外都由未经处理的天然木材构成。木制材料既没有被化学浸渍染色，也没有经过其他加工处理，仍然保持着「原材料」的状态。这意味着，这些材料在建筑寿命结束后可以直接回收再利用。虽然这样的建筑看起来似乎需要耗费大量的材料，但实际上，木制墙体使用的木材质量较低，如果不被制作成墙体，它们将用于生产木材衍生品（例如胶合板，MDF 板，刨花板，层压木板等），并在生产过程中释放大量碳排放。因此，这种建筑方式实际上是跳过了传统生产木材衍生品的步骤，节省了生产过程中的碳排放，并且这些材料并不会被浪费，而是等到建筑寿命结束以后仍可用其继续生产其他木材衍生品。材料上唯一的妥协之处是建筑得混凝土基座，它平整了自然陡坡，承担建筑的重量。建筑师并不强调每栋建筑都要采用单一材料建造，而是根据不同情况使用恰当的材料。但即便是这样，我们仍可以感受到建筑师的创新：这栋房子的混凝土不是用钢筋，而是用竹子作为植筋材料，这意味着以后更容易拆除并回收这些混凝土。

用可再生的竹子代替钢筋的做法可能显得有些矫情，但这恰恰反映出该项目在建筑设计和结构设计上探索结合更可持续材料的严谨态度。

Haus K

瑞士 Alpnach，2018 年 • 业主：私人委托 • 建筑师：Seiler Linhart, Lucerne / Sarnen • 结构顾问和建筑物理顾问：Künig Holzbau, Alpnach • 木结构顾问：Künig Holzbau, Alpnach • 建筑装饰：René Odermatt, Küsnach am Rigi (装饰木作)

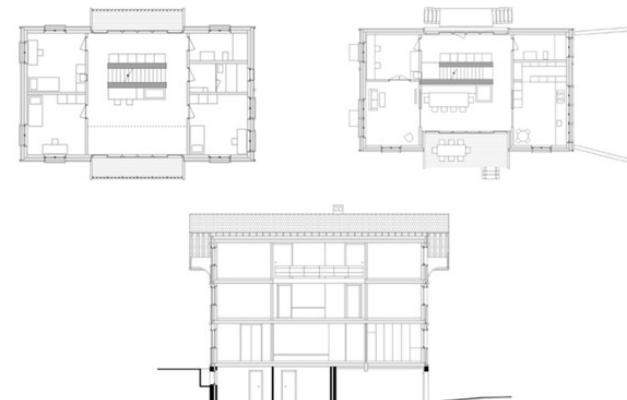


图 5：从左至右：建筑外景；二层的半室外檐廊空间；首层和二层平面图；长向剖面图
©RASMUS NORLANDER

2.2.3 延续地方传统

过去很长一段时间内，人类曾经采用既有的建筑材料和世代沿袭传承下来的手工技艺来建造房屋，这一过程中最重要的是借鉴前人积累的经验。伯纳德-鲁道夫斯基（Bernard Rudofsky）在其著作《没有建筑师的建筑》（1964年）中介绍的乡土性建筑和自发性建筑就系统性地展示了这一点。

随着工业生产的兴起，发现了更多高性能材料（例如钢筋混凝土），而集装箱运输等标准化方法所促进的全球化运输，使得建筑构件可以供应到地球上的任何地方，即使它们对那个地区来说是陌生的。城市作为商业集中化和地理集中化的代表力量，为建筑创造了可互换的概念，即通用性和普遍性：任何事情都有可能，任何建筑材料都可使用，任何建造方法都可实现。战后的法国南部或许是这种普遍性与传统性之间进行对话的最显著案例：在马赛这座被空袭摧毁的城市，两位建筑师实现了各自对未来建筑的设想：勒-柯布西耶 Le Corbusier 建造了他的居住单元概念 Unité d'Habitation（1947-1952年），展示了混凝土的多功能性；而设计了马赛拉图雷特住宅综合体 La Tourette（1948-1953年）和马赛旧港口建筑综合体 Immeuble au Vieux-Port（1951-1955年）的 Fernand Pouillon 则拒绝采用这种新的机械化建筑，转而采用周边地区的常见且易开采的石灰石作为建筑材料进行建造，并与当地企业合作开发出可以快速建造且商业可行的新技术，如“夹心石”pierre banchée 技术。

像 Pouillon 一样，当代法国建筑师 Gilles Perraudin 使用来自法国 Fontvieille 地区采石场的石材，并借鉴历史传承下来的传统建造知识和建造工艺。他的设计展示了如何使用天然材料进行建造，并提升这一类型建筑被低估的建筑价值。这种类型的建筑易于建造和拆卸，经济实用，对环境无害，而且使用寿命极长。

Perraudi 在法国蒙特利马 Montélimar 设计的一栋住宅建筑就是这方面的典型案例：建筑墙体由实心石灰石制成，厚度为 40 厘米，而天花板和屋顶则采用未经处理的松木——从材料选择上避免了工业加工流程，无需防腐剂和防水剂，以减少隐含碳排放和隐含能耗。石灰石砌块的砌筑如同预制装配系统一样简单，用石灰砂浆连接，以便将来拆解并重新利用。由于施工简单，避免了混凝土结构所需要的干燥过程，而且仅使用单一材料，大大加快施工进度。另一方面，使用当地

开采的石材不仅可以保持古老的建筑传统，还有助于维持当地采石场的生存问题和就业问题，也为地处偏远地区的当地经济带来了活力。这样的材料选择还有助于改善房屋的内部舒适度，创造一个“可呼吸的外围护结构”：石材较大的质量密度帮助其有效吸收并储存热量，调节房屋内的湿度和温度，平衡昼夜温差波动。

Perraudi 的实践，就像 Pouillon 在更大尺度上的建筑实践一样，告诉我们传统建筑不仅仅是简单地重复历史，还可以积极地重新诠释这些传统，并将其作为建筑创作和创新的起点。这要求建筑师对建筑材料、当地产业链、施工方法和当地建筑经济都有深入了解，就像 Pouillon 说的那样，建筑师需要承担组织者、经济学家、工程师、发明家和艺术家的角色：成为通才型建筑师。

蒙特利马的石造住宅

蒙特利马，2018 年 • 业主：私人委托 • 建筑师：Gilles Perraudin 建筑事务所，里昂 • 施工咨询和现场监理：WYSWYG Architecture, Nobouko Nansenet，里昂 • 施工：SAS Lionel Roux, Puygiron • 采石场：Carrières de Provence, Fontvieille



图 6：从左到右：建筑外景；带有楼梯的中央廊厅；卧室裸露的石材墙面；轴测图；
©11H45

2.2.4 系统分离 (System Separation)

"时间才是人类的总建筑师",《全球概览》杂志 (Whole Earth Catalog, 1968-1998) 的创刊人斯图尔特·布兰德 Stewart Brand 这样说到, 这本成功的美国杂志长期关注生态问题、DIY 实践和自给自足的适足性生活方式。

布兰德定义了每一个新建项目或重建项目都需要考虑的六个层面 - 场地和基础、建筑结构、建筑表皮、服务设施、空间设计和室内软装 (即家具) - 他认为这些不同的层次应很易于分离, 以便未来更换或修改, 而不会影响整个建筑的使用寿命。然而, 这一原则与尽可能使用单一材料和尽可能标准化建筑构件的设计理念相矛盾; 在此, 每个构件都是根据其独立的功能和使用寿命进行设计。

工业革命时期早期的建筑师们普遍运用后一种理念, 他们意识到需要建造大型的、模块化的和灵活的空间用于机械化生产, 而这些机器可能会随着时间的推移而迅速演进变化, 因此需要不断改造。1900 年左右, 随着汽车的诞生, 底特律的汽车工厂设计开始采用这种实用主义的思维方式。阿尔伯特·卡恩 (Albert Kahn) 为亨利·福特 (Henry Ford) 建造的汽车工厂遵循了工业生产的原则, 并认识到提供高度适应性、采光良好的空间的必要性。这些工厂代表了一种全新的建筑类型, 为工业生产提供可以重复使用的灵活的基础设施。福特工厂的设计遵循重力原则, 从高处运入原材料, 在地面上生产出可供测试的 T 型福特汽车。然而位于意大利都灵的第一家菲亚特工厂却颠覆了这一流程: 在建筑师与工程师贾科莫·马特·特鲁科 (Giacomo Mattè Trucco) 设计的 "Lingotto" 汽车工厂 (1916-1926 年) 中, 汽车在地面上生产, 然后在屋顶测试跑道上进行测试。长宽 510×72 米的建筑物基于 6×6 米的混凝土结构柱网支撑, 并在当中填充砖砌墙, 内部有四个庭院, 历经百年沧桑, 至今仍是都灵市中心的最重要的商业中心之一。它曾是意大利最重要的汽车制造厂, 如今则摇身一变成为展览中心、商业中心、购物中心、博物馆、酒店和大学的所在地。事实证明, 该建筑物长寿的关键并不在于屋顶的测试跑道, 而在于其灵活多变的多功能网格结构。

巴黎的 Lacaton & Vassal 建筑事务采用类似的原则设计了南特建筑学院, 允许学生和教职员根据不同的用途和需求调整空间。从外观上看, 它故意呈现出一种未完成的形象, 类似于夹在各种码头仓库之间的工业建筑。

巨大的主体结构由 $80 \times 80\text{cm}$ 的预制混凝土柱和空腹混凝土楼板组成, 这种结构体系通常用于建造多层停车场设施。因此, 这座建筑还拥有一个坡道式入口和一个从建筑首层蜿蜒盘旋至开放式屋顶露台的公共坡道也就不足为奇了。三层主体混凝土楼板之间的层高约两到三层高, 可以通过轻钢结构建造夹层空间, 将建筑设计竞赛中要求的最小建筑面积增加三倍, 以满足未来的扩建需求。这种次级结构体理论上是可拆卸的, 但实际上却是永久性的, 是建筑结构中的一个额外的独立 "建筑层"。混凝土楼板的承重可达 $1\text{ 吨}/\text{m}^2$, 这意味着建筑系学生甚至可以在必要时建造 1:1 的建筑模型。外部幕墙采用镀锌钢、玻璃和聚碳酸酯板 (PC 阳光板), 使其完全透明且极其轻便, 内部隔墙则由铝制龙骨隔墙和保温隔热玻璃墙组成, 保证单层空间的保温隔热性能, 并将层高较高的区域作为过渡气候区。

根据建筑师自己的说法, 他们并非想要设计创造一栋传统意义上的"建筑"——他们更想将使用这些空间的人放在设计的中心位置。因此呈现为裸露空间, 模块化和均质结构, 就像塞德里克·普赖斯 (Cedric Price) 精心设计的 "欢乐宫" (Fun Palace) 一样, 除了由其不断变化的空间布局所产生的形式外, 建筑本身并没有固定的形式。

南特国立高等建筑学院

南特, 2009 年 • 业主: 法国卢瓦尔河地区文化部 • 建筑师: Lacaton & Vassal, 巴黎 •
 混凝土结构设计: Setec Bâtiment, 巴黎 • 钢结构设计: Cesma, Mérignac • 总承包商:
 Savoie Frères

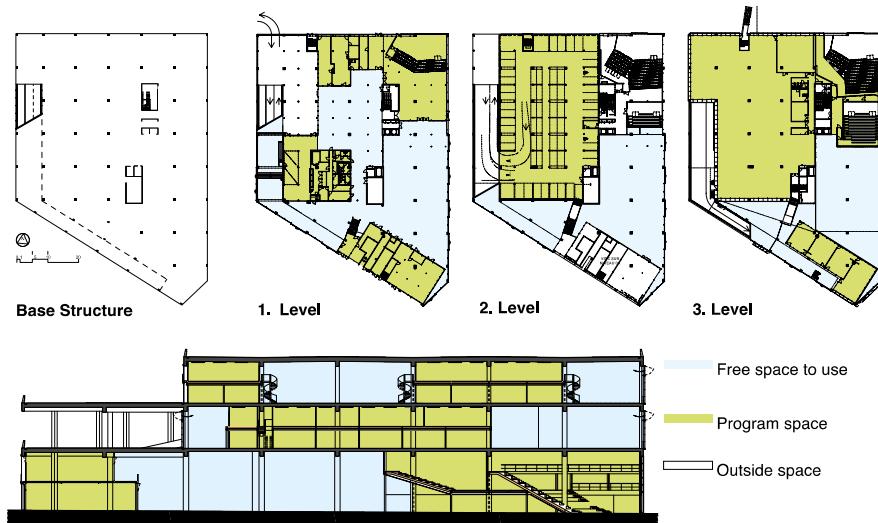


图 7: 各层平面图展示固定空间 (绿色填充) 和灵活空间 (浅蓝色填充); 剖面图展示主要主体混凝土结构 (浅蓝色填充) 和次级钢结构 (绿色填充) ©LACATON&VASSAL

2.2.5 可拆卸设计 (Design for Disassembly)

1851 年，戈特弗里德·森佩尔 (Gottfried Semper) 参观了在伦敦水晶宫举办的大博览会，在“巴比伦式的混乱”中，他看到了一座加勒比海小屋的复制品，这是一个简单的木框架结构，墙体由彩色布料制成。正是这次邂逅启发了森佩尔关于建筑视为“服装”（德语：Bekleidung）的理论。从那时起，当代建筑开始被视为文化演进的产物，其源头就是那座原始的、易于拆卸的小屋：小屋发展成寺庙，寺庙演变为宫殿，宫殿最终发展成为今天的摩天大楼。

然而，这种进化论在今天似乎已经走到尽头，建筑师开始尝试逆转这一演进过程，并回归到一种更简单质朴的建筑，其建筑材料以可逆的方式彼此连接，每个元素都有精确的结构和美学功能。如果回顾现代建筑史，主要是临时展馆和展览建筑在大尺度结构上解决了拆卸问题。最有名的例子也许是水晶宫的铁件和玻璃结构，其他例子也不胜枚举，例如伦佐·皮亚诺 (Renzo Piano) 建筑工作室使用胶合木、聚碳酸酯 (PC 阳光板) 和铝材建造的 IBM 移动展馆 (IBM Travelling Pavilion, 1982-1986)，以及彼得·卒姆托 (Peter Zumthor) 为 2000 年汉诺威世博会设计建造的瑞士馆——两者都是可以拆卸并在其他地方重新组装的轻质结构。此外还有一些大型建筑的案例，例如 Anne Holtrop 为 2015 年米兰世博会设计的巴林馆，该馆完全由混凝土预制构件构成，世博会结束后拆卸并运输至巴林重建。

显然，这类建筑不需要应对复杂的住宅保温隔热标准。另一方面，奥雅纳 (Arup) 的“循环建造”部门 (Circular Building) 旨在提供一个适用范围更广的设计蓝图：他们与 Lendager Group 集团、3XN 建筑事务所和 Vandkunsten 建筑事务所共同开发的简易住宅单元“循环屋”(Circle House) 项目，作为可拆卸设计 (Design for Disassembly) 的实际落成案例。这些项目也说明，提供每个建筑构件的具体信息（如产品细部、施工后变更和拆卸说明）是多么重要；此外，利用 BIM 建筑信息模型和虚拟数字孪生来提供每个构件全生命周期内的并行数字文档将成为标准做法。

在建筑中实现可逆性的一种可行方法是采用标准化组件和统一的连接件。基于这套系统的著名建筑案例包括瑞士建筑师 Fritz Haller 开发的 MIDI 100 系统。西班牙建筑师 Antón García Abril 对结构和设计的研究，则以非正统的方式探索将桥

梁预制件和高架桥预制件用于建筑设计的可能性，为那些希望避免受制于重复系统的人提供了灵感。例如，他设计的 Hemeroscopium House 住宅项目是一个结构上非常优雅的预制住宅，与菜单式标准化的住宅建筑相去甚远。

可拆卸设计中最为棘手的问题是如何处理现场施工过程中的保温层、隔音层和透气层，这些分层构造通常使用胶水或沥青材料粘结在一起，粘结构造是不可逆的，类似的，各种建筑设备和管线也经常不可逆地嵌入墙体或混凝土楼板中。为应对这些问题，需要考虑将设备和管线设计为机械连接或插接连接。但实际上，真正的可拆卸设计 (DfD) 只有一条最简单的基本规则：确保建筑物所有构件的组装过程和组装步骤都能通过逆向的方式进行拆卸。

在可逆建筑设计领域中，建筑师和工程师 Werner Sobek 的自宅是真正的先锋项目，这栋完成于 20 多年前的建筑为研究可逆设计方法提供了极好的起点。该项目在设计之初就考虑到了拆卸和搬迁，但这栋房屋至今仍未拆除，因而尚未在实践中证明其承诺的可拆卸性。尽管如此，其构造原则对任何追求循环建造的设计者而言，都是非常有益的指导。首先，这栋房子非常轻巧（置于混凝土基础上的建筑物仅 40 吨重），并实现了运营阶段的净零能耗。其简洁的矩形建筑体量由标准化的钢构件建成，所有构件均可用车辆运输。外墙由三玻两腔的玻璃制成标准化外墙模块组合而成，通过钢缆和螺钉板系统固定在主体结构上。内墙则避免使用石膏板或砖等难以再利用的材料，实际上仅有卫生间采用了内墙隔断，其铝板墙体通过金属和磁铁系统固定。实木地板由次级实木龙骨支撑，可拆卸的铝板吊顶允许随时维修隐藏在其中的供暖系统和通风系统管线，屋顶覆盖光伏板，既能收集太阳能，又能防雨。现场施工在大约一个月内完成，其中预制结构在十天内就安装完毕。Sobek 设计的自宅在技术上堪称典范，与 20 年前一样，至今仍然具有重要的现实意义。更重要的是，它证明了以可分可拆作为设计理念的建筑仍然可以具有独特的建筑美学。

R128 住宅

斯图加特, 2000 年 • 业主及建筑师: Werner Sobek, 斯图加特 • 结构设计: Wener Sobek 事务所, 斯图加特 • 钢结构顾问和幕墙顾问: SE Stahltechnik, Stammham • 能源顾问: Transsolar Energietechnik, 斯图加特 • 施工单位: Hardwork, 斯图加特

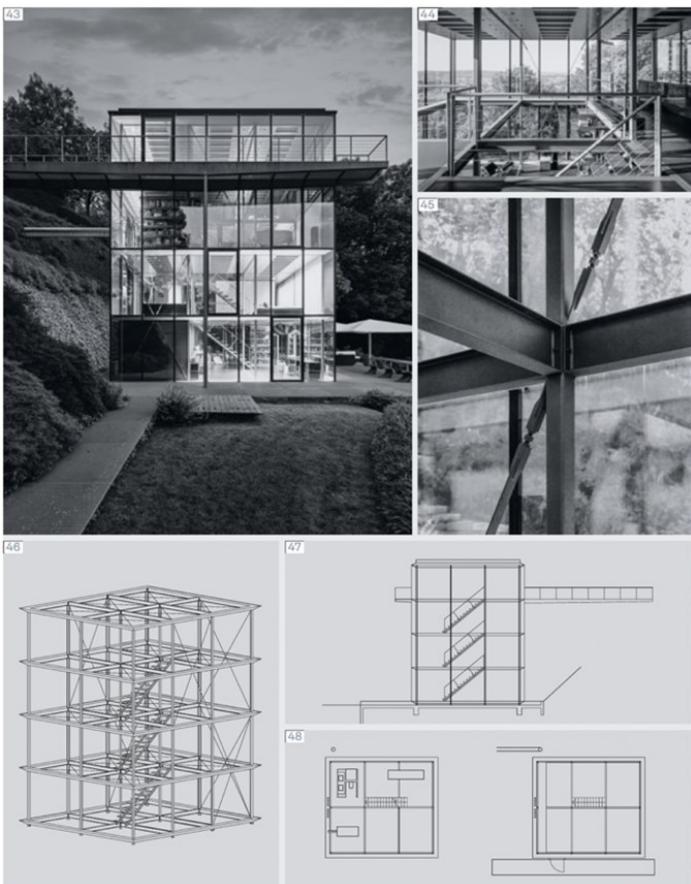


图 8: 从左到右: 建筑外景; 开放的室内空间, 没有隔断墙, 仅由玻璃分隔; 主体结构连接细部; 结构轴测图; 纵向剖面图; 首层平面图及顶层平面图 ©ROLAND HALBE
©WERNER SOBEK

2.2.6 实现循环建造的多种途径

对于每一个建筑设计任务, 都有不止一种合适的解决方案--这里介绍的五个项目仅仅勾勒出一系列可能的应对措施:

Studio Albori 工作室采取了一种激进的原则性立场, 即绝不丢弃任何东西。在设计中他们总是以此作为设计出发点: 尽可能多地修复和再利用现有材料, 从而创造出一种让原建筑的既有结构得以以全新面貌继续存在的建筑。

Gilles Perraudeau 和 Seiler Linhart 都在实践一种新的地域主义建筑, 这种地域主义不仅将项目所在地或周边区域作为建筑原材料的主要来源地, 还包括相应的技术知识。他们使用尽量少的初级建筑材料, 尽可能避免额外的加工步骤, 并试图延续当地建造传统和当地建筑文化。

Lacaton & Vassal 的建筑设计超越了对建筑材料的关注, 强调空间设计和使用灵活性。他们的设计考虑到不同建筑构件长短不一的使用寿命, 将主体结构和二次装修进行明确区分。

最后, Werner Sobek 发展出一套将设计概念与细部构造始终密切联系在一起的建筑设计方法, 二者始终并行不悖。从设计理念到细节执行, Sobek 都严格遵循构造逻辑、体现模块化设计原则、组装和拆卸的可逆性原则, 并将其融入建筑美学之中 - 从微观到宏观, 再从宏观到微观。

在这个相互联系日益紧密的世界里, 人类对自然的影响和自然对人类的影响都变得越来越严峻, 因此我们必须抛弃当今的“类固醇建筑”, 摈弃对更高标准和更大便利性的不断追求。相反, 我们需要集中精力重新审视人们对空间的实际需求, 回归更简单的材料和低复杂度的暖通空调技术。仅仅设计建造在运营阶段达到净零能耗的建筑已经不再足够, 我们需要实现第二个净零目标--确保建筑物在生产建造阶段和未来拆除阶段也达到零碳排放, 即完全采用可再生能源实现。或许, 我们应该重新审视并理解森佩尔的加勒比小屋, 将其结构和功能上的简洁性视为建筑进化的最终目标, 而非起点!

3. 再利用：K.118 示范项目

3.1 项目历史

温特图尔的 Kopfbau 118 项目源于建筑师仅使用再利用部件建造建筑的愿望，由于其特殊性，K.118 被视为「循环建造」的宣言式建筑。

该项目的设计理念可以追溯至 1995 年，当时建筑师 Barbara Buser 女士与 Klara Klauser 女士在巴塞尔共同创立了 Bauteilbörse (建筑构件交易所)：一个旨在回收使用过的建筑材料、装饰构件、建筑设备和其他建筑构件的联盟协会。这些材料一旦被收集并存放在“建筑构件交易所”后，就可以对外出售。随着时间的推移，该协会不断发展壮大，甚至创立了用于二手建材在线交易平台，并运营至今。

正是在这段经历中，Barbara Buser 与 Eric Honegger 在巴塞尔成立了建筑事务所 Baubüro in Situ。

二十年后，Klara Klauser 担任 Abendrot 养老基金的房地产投资主管，收购了温特图尔的 Lagerplatz 园区，园区内是苏尔泽兄弟铸造厂的工业厂房，这家公司上个世纪曾让温特图尔成为瑞士最大的工业中心之一。

Abendrot 养老基金需要让这个工业园区转型并实现盈利，Klara Klauser 因此有了一个具体的实践机会来证明循环建造的可行性。项目的设计任务书非常简单：各种大小的办公室、共享厨房和卫生间、一个带阳台的两层高会议室，以及首层的团队合作空间。

但 K.118 不仅仅是一栋共享办公建筑，更应当证明循环建筑在自由市场中的经济竞争力。该建筑完全由再利用部件建造而成，成本却并不高于采用全新材料建造的建筑。该基金的董事会顾问 Barbara Buser 接受 Klara Klauser 提出的挑战，受聘负责设计该项目。项目难点在于：使用回收部件建造要求建筑师将设计流程完全颠倒过来，结构体系、细节设计或饰面选择等不能由建筑师凭空设想，而只能根据可用的既有建筑构件来决定。“形式遵循既有构件的可用性”是 Baubüro in situ 在设计 K.118 时的座右铭。

设计方案首先明确的是保留现有建筑，并在其上加建一个新的建筑体量。新增部分的钢结构是从巴塞尔一栋正被拆除的物流配送中心拆卸下来的，依靠下部既有的砌体结构支撑，钢结构的正方形网格比例决定了这个新建的悬挑体量的建筑形式。通过室外楼梯进入各楼层，钢制楼梯也取自巴塞尔一栋被拆除的办公楼。既有楼梯的梯段平台标高决定了新楼板的标高，将楼梯置于室外的策略使得内部空间的布局没有任何限制。来自同一栋被拆除的建筑外墙上的意大利花岗岩石板被用于该项目卫生间、厨房和露台的地面铺装。建筑外墙由木制框架和秸秆保温层组装而成，该系统的灵活性使其能够适配从三栋不同建筑中回收而来的大小不一的旧窗户，外墙饰面则采用从温特图尔市郊一座废弃印刷厂拆下来的波形铝板。建筑楼板是通过重新利用金属波纹板浇筑混凝土制成的：混凝土用量被尽量减少，仅在不得已的情况下才使用混凝土，以符合结构标准、防噪标准和防火标准。室内实木地板是从温特图尔一处拆除的住宅区中拆除过程中回收而来的，甚至连建筑设备也是从废弃建筑中回收的：从屋顶的光伏发电板到室内暖气片，甚至包括卫生间的卫浴设施和建筑五金件。

K.118 项目一经完工，便以清晰而有力的形式在园区内彰显出其重要性。大胆的外立面颜色、悬挑的体量、多种不同类型窗户的有机组合都体现其建筑特色，然而这些不同元素出现在该项目中，并不是因为建筑师的设计意图或形式选择的结果，而是“宿命”的安排：这些构件在恰当的时间以恰当的数量被纳入设计之中。建筑材料的“本土再利用”更像工业化之前的建造方法，而工业化以后尽管建筑材料随意可取，每种建筑技术都有可能实现，但其背后生产和运输过程中化石燃料产生的能耗问题十分严重。K.118 项目的整个设计过程和施工过程都由距离工地仅 200 米远的苏黎世应用科技大学 (ZHAW) 的 IKE 建筑构造设计研究所 (Institut Konstruktives Entwerfen) 全程跟踪监督。最令人吃惊的是，与使用常规新建项目相比，K.118 施工过程中所产生的温室气体排放量(二氧化碳当量)降低了近 60%，相当于近 500 吨二氧化碳排放量，剩余的 40%几乎都是浇筑楼板的混凝土工程产生的碳排放，尽管该项目已经采用了更低碳的回收混凝土。面对如此立竿见影的巨额减碳量，任何打着“可持续”名号的建筑项目或设计策略，所能实现的减碳量与之相比完全不在一个数量级。然而，我们也必须承认到目前为止，诸如“二手建材交易所”这样的基础设施尚不够完善成熟，不足以支持「循环建造」体系的大规模推广和应用。按照“城市矿藏”的逻辑，将城市视为一座拥有大量可持续再利用材料的矿山的想法仍然仅限于小型项目，相对应的新型建筑设计管理和施工流程

管理几乎完全取决于个别建筑师和少数罕见而开明的投资者的个人努力，理想中的“城市矿藏”仍然缺乏对各种既有建筑材料和构件进行战略性的分类和管理。此外，还缺乏数字化平台和实体仓储设施，无法对所需材料进行持续的分类分配和即时的材料供应。

与所有示范项目一样，K.118 并不打算将自己呈现为一种教条式的解决方案，而是要证明建筑材料再利用的可能性。K.118 意味着对长期存在的本土传统建筑工艺的重新发掘，并为建筑设计方法和社会伦理道德开辟新的道路。它可以促进民众对真正的「循环建造」的价值和意义开展讨论，这种建筑以保护环境、珍惜材料和低碳施工为中心，可以超越以线性经济模式为基础的，以高能耗、技术至上、大规模生产为主的「机械文明」「工业文明」。

3.2 利用重复使用的构件开展设计

建筑构件的再利用改变了我们的设计方式和施工方式，既包括设计过程也包括设计结果。每次成功寻找到可用的建筑构件都会引发一系列连锁反应，在一定程度上逆转传统的设计流程，或引发令人惊讶的转变。某些材料、形式、表面处理和连接细部恰好与找到的构件一一对应时，就会要求在设计和建造上进行回应。建筑构件未来的可重复利用性也要求在设计中有所体现，这就要求建筑师拥有超越当前项目的更高更大的新视角。

下图以 K.118 项目为例，回溯了整个过程，展现出建筑设计是如何与所发现的建筑构件互相关联的，这些构件都被记录并体现在构件来源地图中，呈现出类似进化式发展的设计过程。

下面的地图显示了收集组件的所有拆除地点。

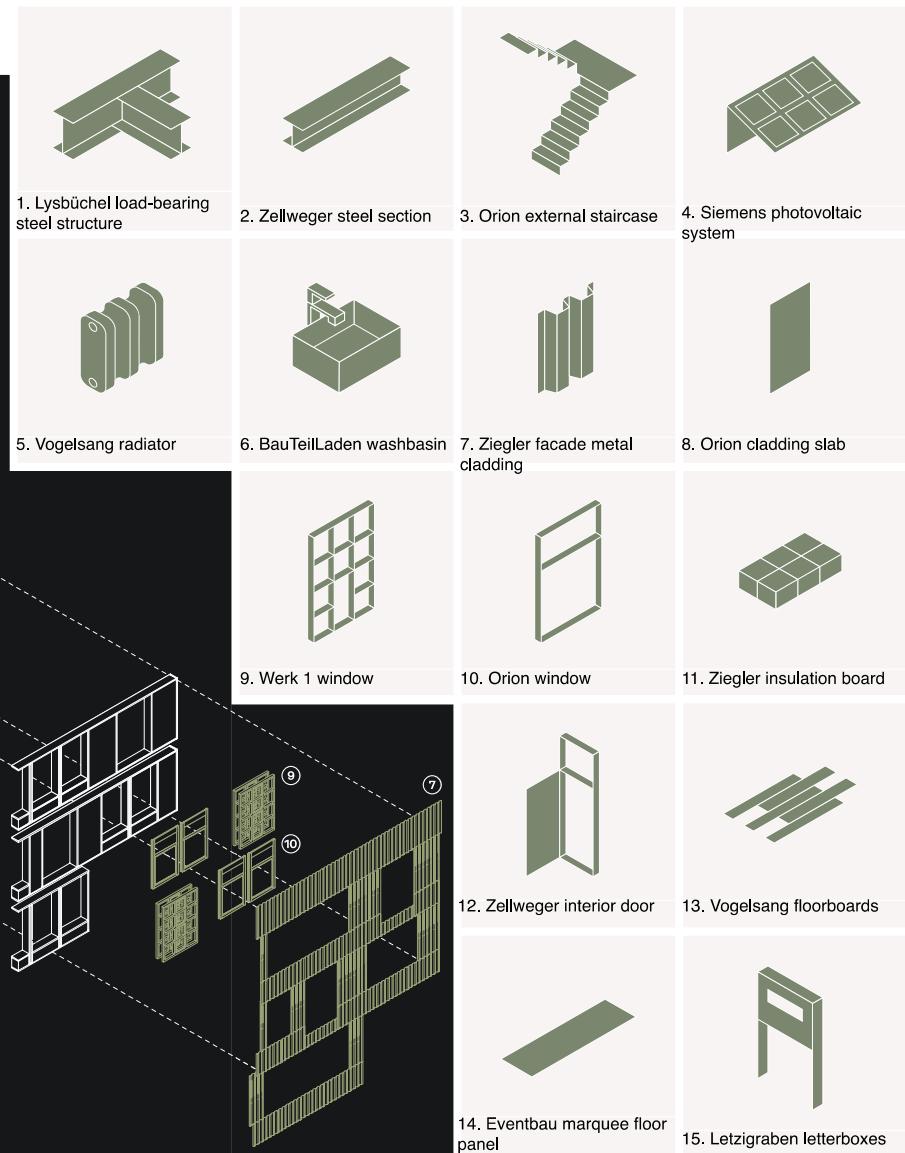
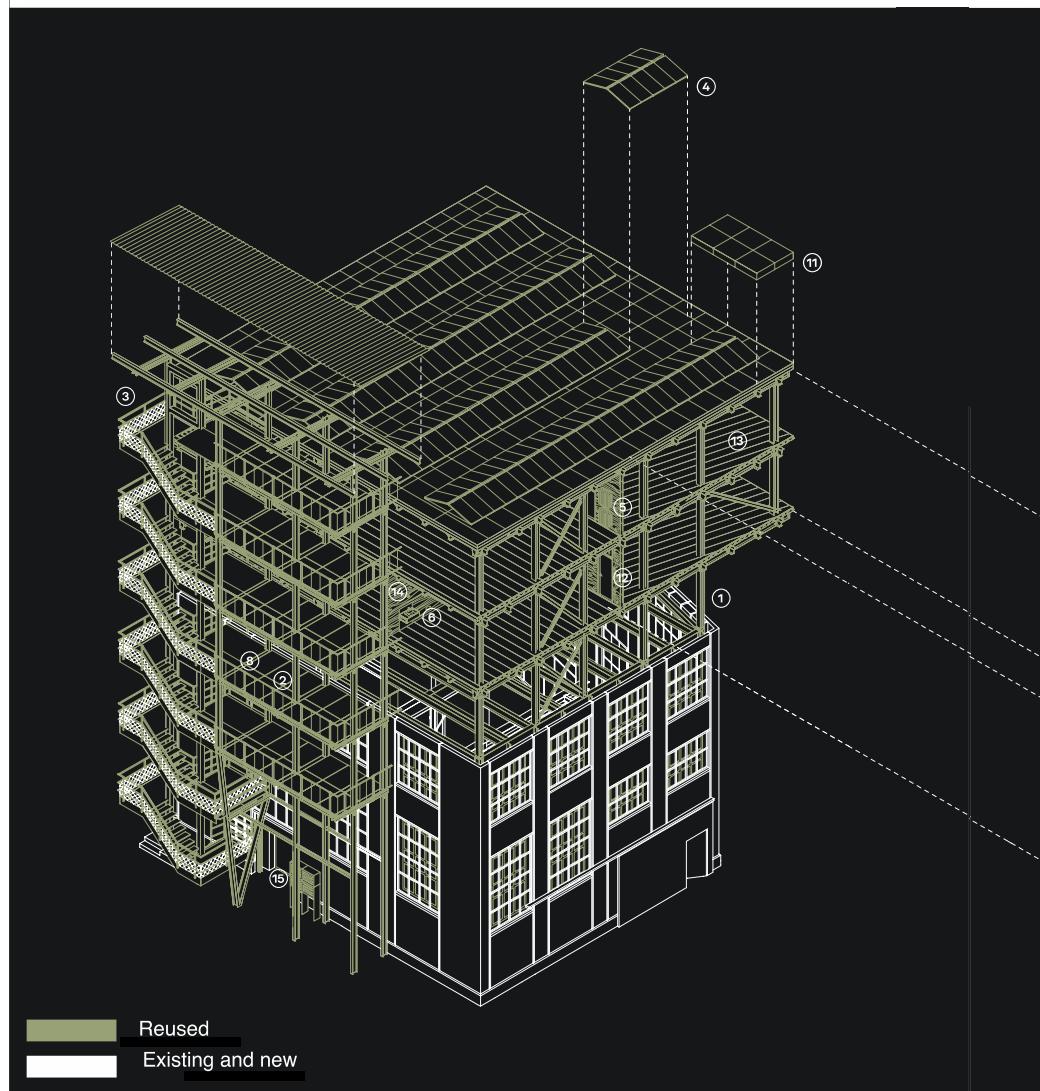
在接下来的数页中

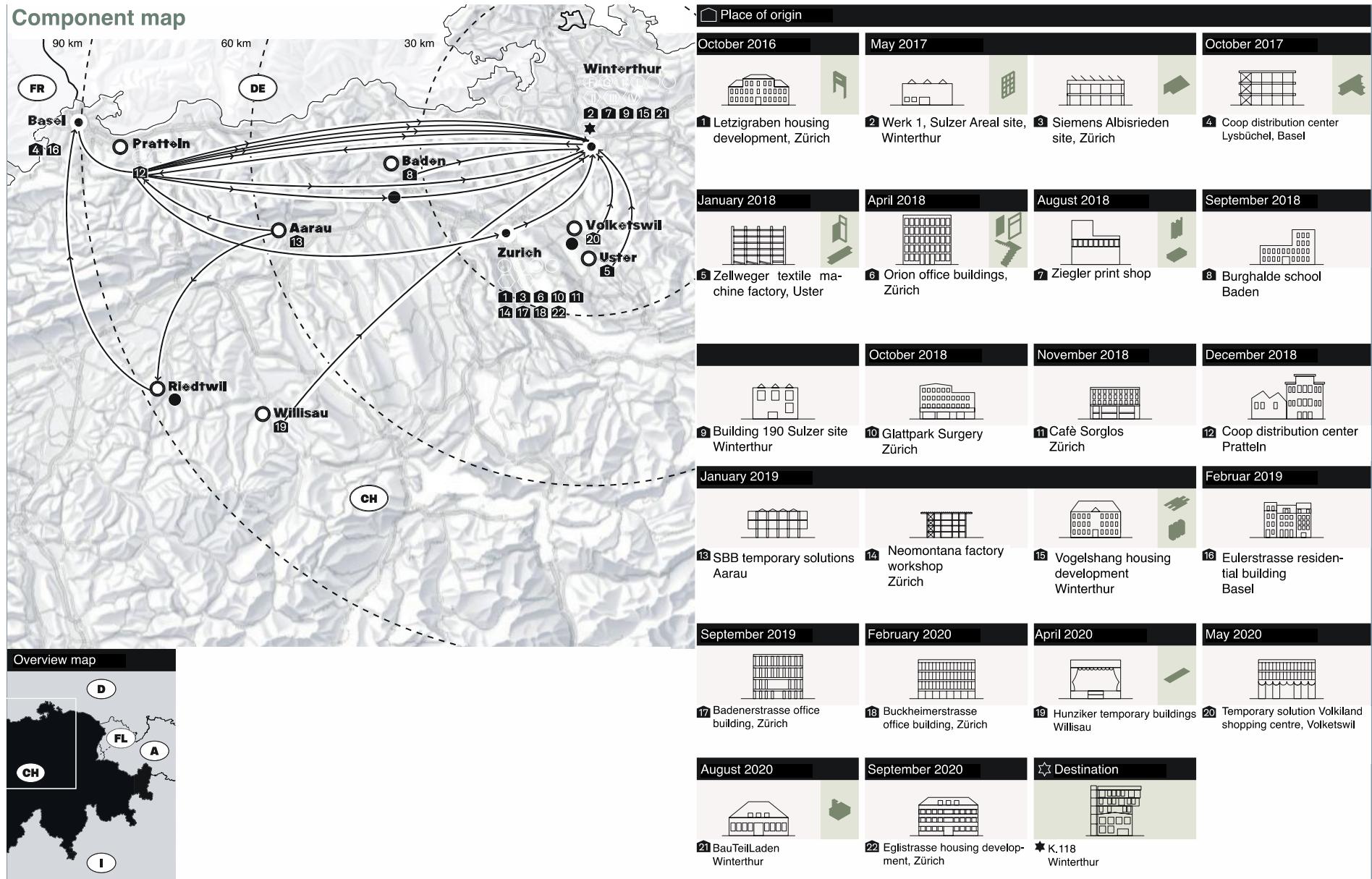
图 9：轴测图展示出整个项目如何完全采用回收再利用的建筑构件（绿色）建造而成，甚至屋顶上的太阳能发电板也是回收再利用的。©ZHAW

图 10：建筑构件来源地图；©ZHAW

图 11：设计与施工；建造流程©ZHAW

Component catalogue: A selection of components involved in the study





Design and Construction: Process

Origin								
Component								
K.118 Reuse								
Effect								

这张图表展示了建筑设计的最终方案是如何根据构件的发现而确定的：不再是建筑师事先设计决定建筑形式和颜色，而是根据他在设计过程中所发现的构件的形

状、大小和颜色在设计上做出回应：形式追随功能。这种设计范式的转变需要建筑师保持足够的灵活性，并对将要被重复利用的构件和材料进行深入了解。

3.3 施工管理

建筑构件再利用的实践应用可能与建筑本身一样古老。然而，或许恰恰因为这一点，它在许多方面挑战着现代建筑最普遍的建造方式，因为现代建筑更强调标准化和技术化的设计、生产和施工。本文以 K.118 案例为基础，系统性的分析调查这些现状和现象，从不同角度对再利用策略下产生的特定的设计方法和施工过程进行思考和定义。哪些利益相关者参与其中？他们提供什么样的服务？他们之间的关系如何？例如，谁来承担责任？会导致什么后果？哪些组织模式可以使建筑过程更符合循环建造的模式？以下四幅图表展示了我们发现的关键和重点。

从 K.118 案例研究中可以得出 10 个再利用（例如拆卸和清理）和再分配（例如运输和仓储）的具体流程和任务：

1. 搜寻 Search
2. 评估 Assessment
3. 录档 Documentation
4. 采购 Acquisition
5. 拆卸 Dismantling
6. 运输 Transport（分两次，先从拆除现场到仓储地点，再从仓储地点到新的施工现场）
7. 仓储 Storage
8. 备料 Preparation
9. 重新安装 Reinstallation
10. 维护 Maintenance

每个构件的搜寻都会触发一系列的后续行动和决策，并可归类至上述任务中。

3.4 10 种不同建筑构件的成本比较

如今在瑞士，采用再利用的构件建造的建筑是否能与采用新构件建造的建筑造价相同？为了弄清这个问题，我们基于 K.118 的施工决算，确定了每个建筑构件的实际成本，并与同等的新构件进行比较。这不仅与最终价格有关，付款时间也很

重要：在传统建筑中，建筑材料可以根据新建筑的施工计划进行采购，而二手构件的可用性则取决于拆迁现场的时序和目前总是处于稀缺状态的经销商库存。

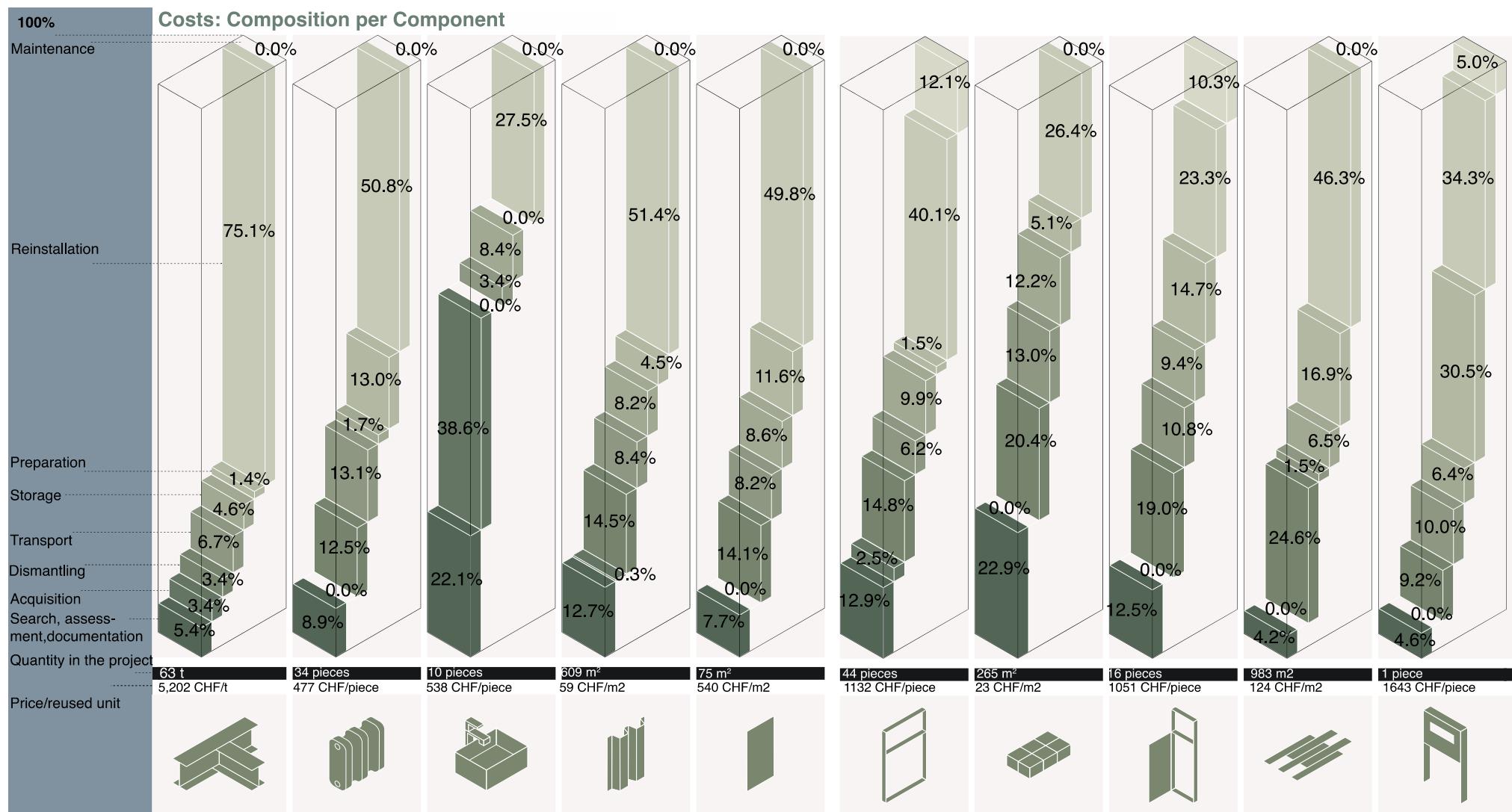
第一步，通过研究 10 种不同制造流程和材料属性构成的建筑构件为例，调查并明确其实际成本构成：如果采用再利用的产品和设施中，其成本的实际组成是什么？二手建筑构件的搜寻和录档所产生的前期成本也被计算在内，由于这类构件多为废品，其实际购买价格一般可以忽略不计。另一方面，由于瑞士人工成本极高，因此拆卸、备料和重新安装所产生的二次成本要高得多。对于存在机械磨损的构件（例如外窗、内门、信箱等），还必须考虑到额外的维修工作和保修规定，在 K.118 项目中这些额外成本被纳入施工合同和后期服务合同中。

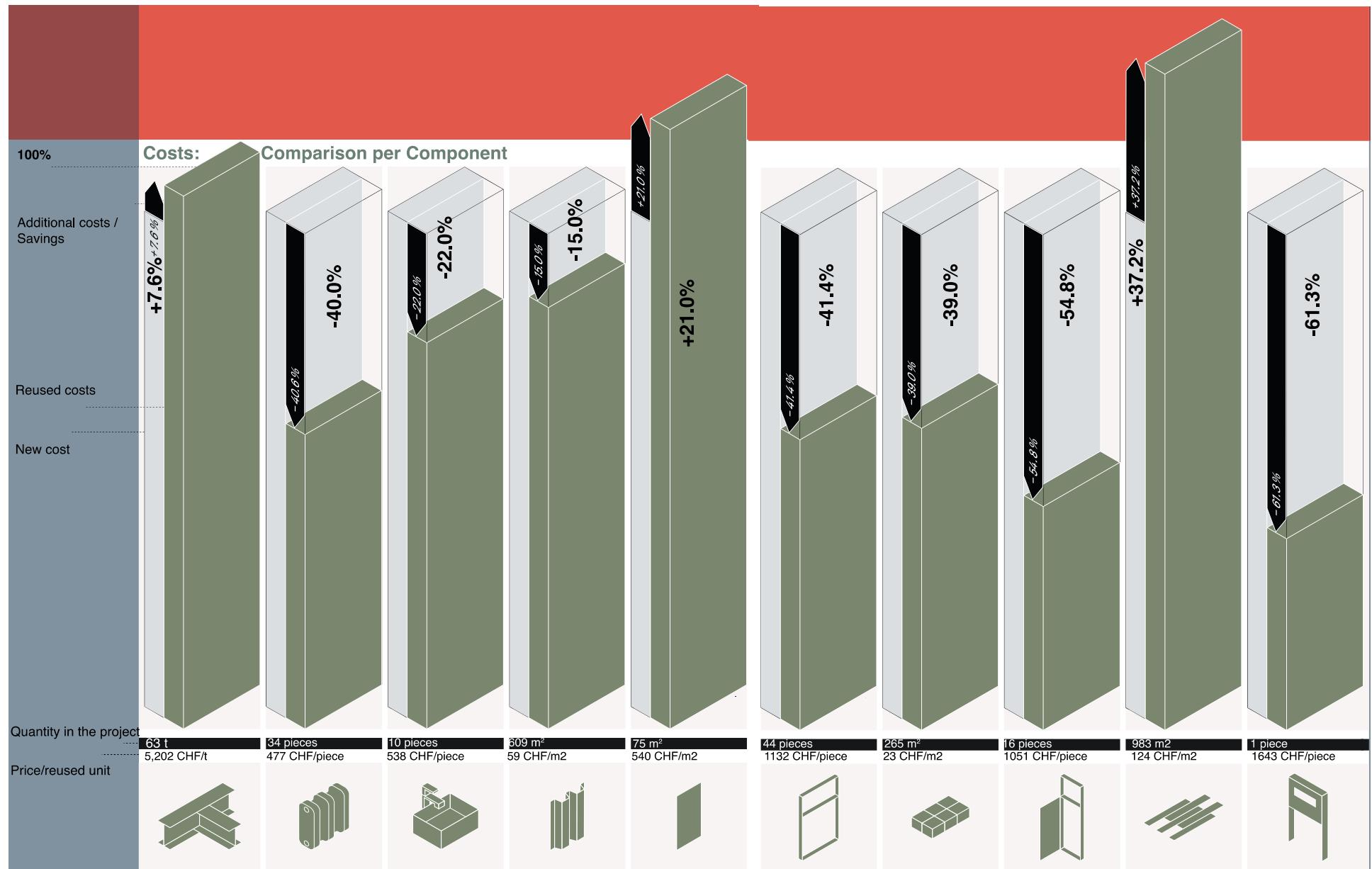
下一步是将每个旧构件与同等品质的新构件的进行价格上的比较。尽管这些旧构件大多只需简单处理即可投入施工，但在部分情况下，其总体价格略高于新构件的价格。例如，尽管回收利用的承重钢结构构件品质较高，表面无需进行二次处理，但是拆卸、运输和重新安装都需要投入重型起重设备，因此其价格略高于购买新的钢结构构件。从纯粹的经济角度来看，回收利用的旧地板铺装也并不“省钱”，这些小木块的拆卸、准备和重新铺装需要大量昂贵的手工业。然而，如果这些回收而来的木板是昂贵的高级木材而不是廉价的云杉木，那就会变得更加“有利可图”，同时保留下来的还包括当中所隐含的工匠精神的价值。因此，总体而言「回收再利用」从经济性的角度来看是可行且值得的，特别是对于门窗等制造工艺复杂的构件，只要它们易于拆卸和回收。在估算既有建筑构件的再利用成本时，都需要将上述种种因素进行通盘综合考虑。

[在下一页](#)

图 12：10 种二手建筑构件的成本构成，©ZHAW

图 13：10 种二手建筑构件和新建筑构件的造价比较，©ZHAW





总体而言，建筑构件的再利用也会影响项目的施工成本和融资成本：在传统的设计和建设过程中，在现场施工开始之前，只产生了少量的设计费用和审批费用，而在 K.118 项目中，在此期间因为回收构件的各种工作已经占到了 11% 的施工成本。项目初期的实际设计工作量高于瑞士建筑师与工程师行业协会 SIA 102.2 设计服务标准规章所规定的工作比例。施工阶段的设计费相较于纯新建项目高出约 15%，这一比例与改建项目类似。就 K.118 项目而言，这笔设计费相当于建安成本的 2% 左右。因此，项目业主需要在施工许可证签发之前就投入相当大的资金 - 施工开始前的资金投入比通常情况多出 60% 以上。最后，我们仍然可以用“几乎”来回答开头提出的问题：在 K.118 示范项目中，回收再使用的建筑构件平均价格比新构件更便宜，设计成本会额外增加，由于采用合理的建造方法则可以节省 2%-3% 的建造成本，但这些省下来的费用会被再利用过程增加的二次加工成本所抵消，这部分费用不仅是因为构件之间难以处理的连接构造问题，还因为难以估算的材料残废问题，以及目前缺乏成熟的处理流程和成型的市场。

3.5 温室气体排放比较

作为 ZHAW 循环建造研究项目的一部分，能源专家 Katrin Pfäffli 调查了 K.118 项目所产生的能消量和温室气体排放量。她于 2020 年 6 月发表的研究报告《再利用建筑构件的隐含能耗和温室气体排放》(Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteilen) 为以下分析提供了基础，该研究在方法论上也得到了苏黎世市可持续建筑办公室 Michael Pöll 和 Philipp Noger 参与的研讨会支持。

以下问题尤为重要：各个构件的温室气体排放是由哪些方面构成的？与全新的建筑构件相比，循环建造可以节省多少碳排放量？如果按照本案例的做法，通过建筑构件的再利用可以在多大程度上减少建筑业产生的温室气体排放？下面的每张图表都对调查来源和调查方法进行了详细的解释。

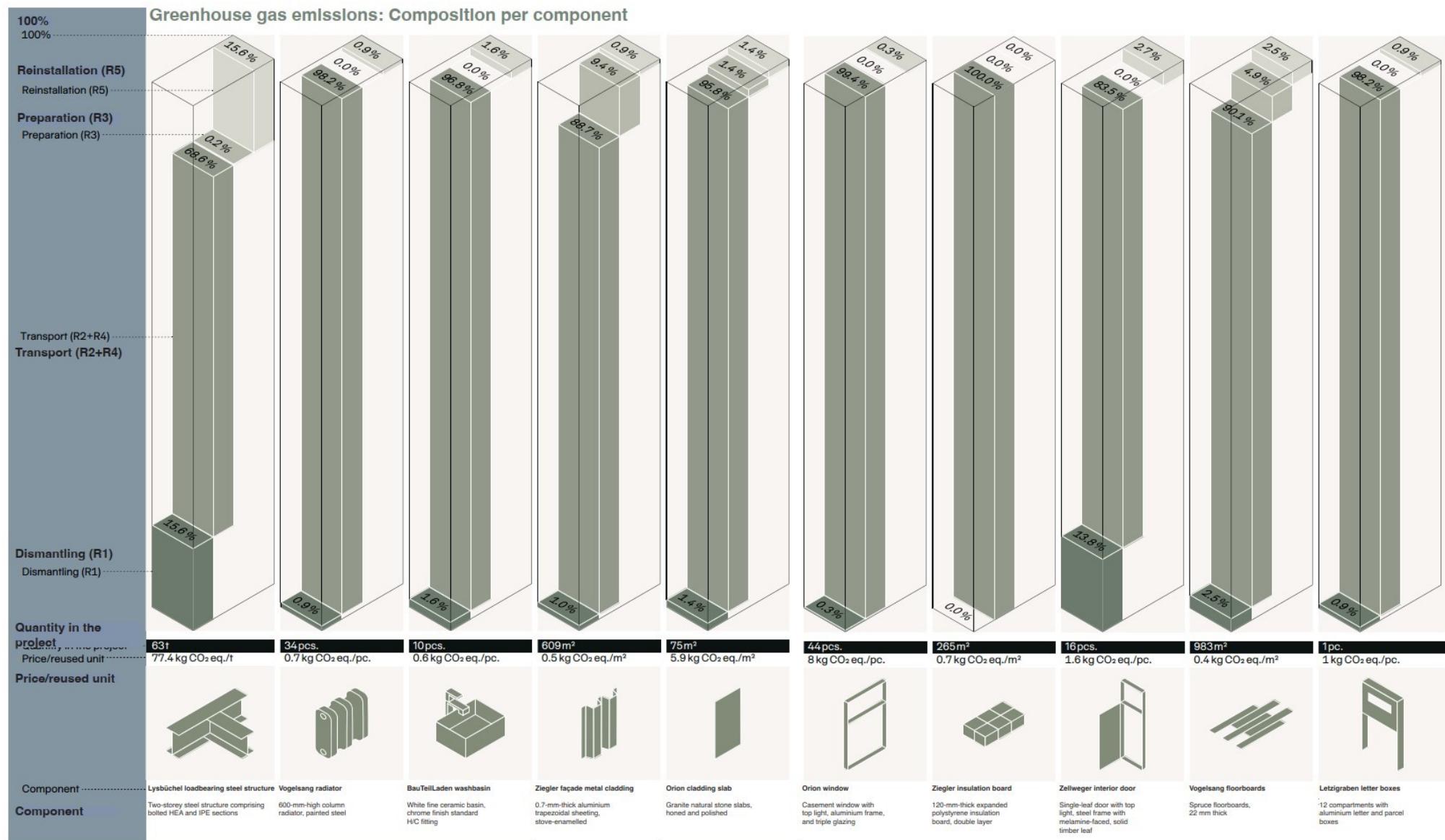
第一步，以类似经济研究的分析方法，对单个建筑构件的温室气体排放构成进行分析。为尽可能贴近真实的情况，考虑了所有再利用过程中发生的工作及其产生

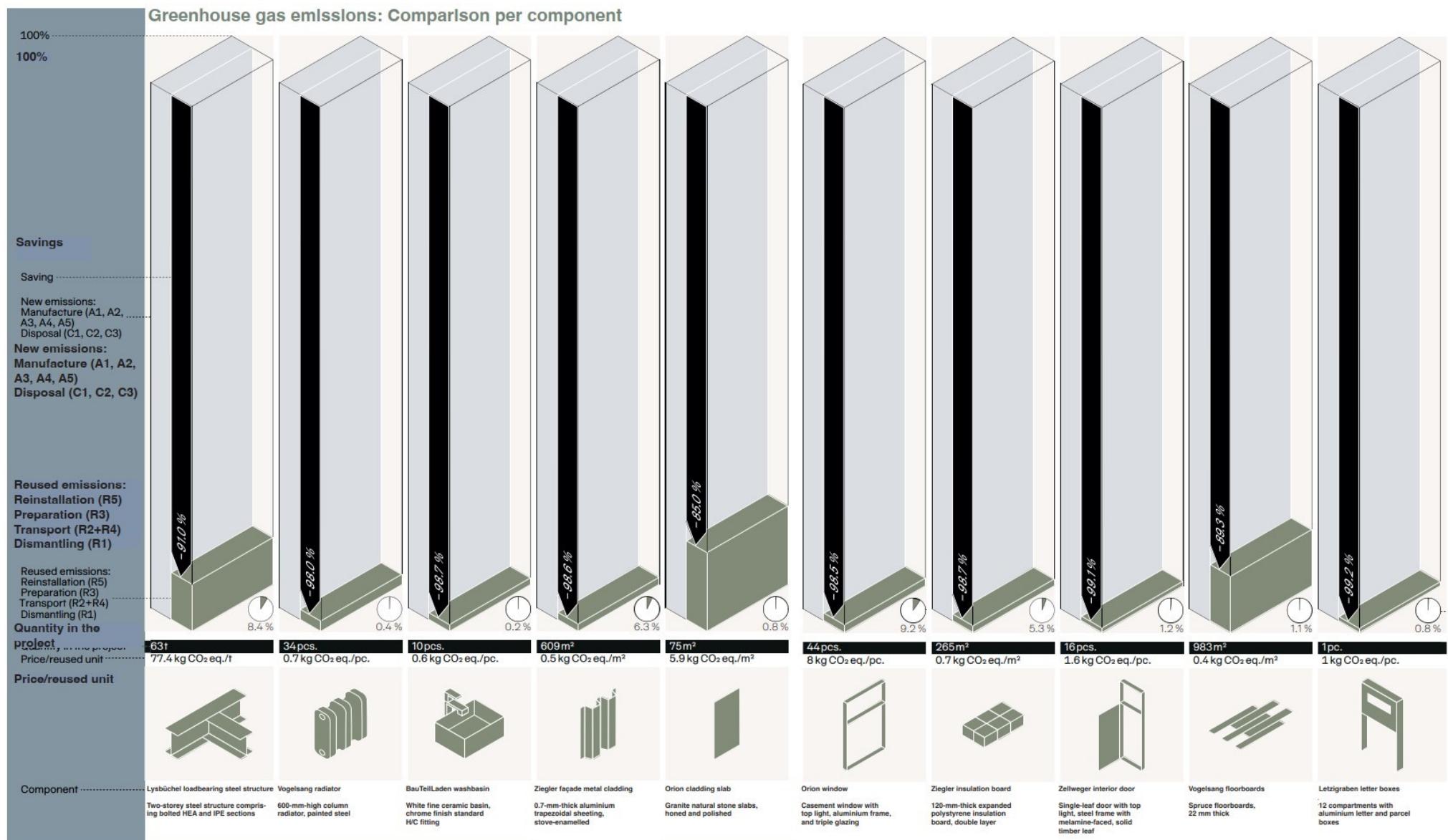
的温室气体排放，包括拆除、运输和备料等工作，还包括从临时仓储设施到施工现场的运输以及重新安装，这些过程通常在《SIA 2032 建筑全生命周期能耗评估》中被忽略。虽然所有建筑构件都来自距离施工场地半径 100 公里的范围之内，但运输产生的温室气体排放量至关重要。调查分析显示，拆卸和重新安装过程中如果使用了重型设备，这当中产生的碳排量才显现出来，否则可以忽略不计，就像 K.118 项目中回收再利用的承重钢结构一样。另一方面，对于所有再利用的建筑构件，备料过程的产生的碳排放几乎可以忽略不计。

[在下一页](#)

图 14: 10 种二手建筑构件的碳排放构成 ©ZHAW

图 15: 10 种二手建筑构件和新建筑构件的碳排放比较 ©ZHAW





通过与同等质量和同等性能的全新构件的碳排放比较，建筑构件再利用的潜力显而易见，同时所述半径内运输所产出的碳排放相对来说也是微不足道。一般情况下温室气体排放量可减少 98%以上，特别是那些在制造过程需要热处理的建筑构件（例如需要将金属或玻璃熔化塑型）。另一些再利用的场景减碳量略低，例如需要大量使用机械设备（例如承重钢结构的回收利用需要使用大型吊机），或者由天然材料制成的建筑构件，因为这些天然材料的生产制造过程几乎不会排放任何温室气体（例如回收利用的实木地板）。然而，即便如此这些构件的减碳量仍然非常高，约为 90%——再利用的建筑构件由此成为全生命周期碳排放评估中的「王牌杀器」。

尽管单个案例研究得到的数据仍不具备普适性，但 K.118 案例的整体碳排放量仍然证明了建筑构件的再利用可以带来巨大的减排效益。与全部采用全新建筑构件所建造的建筑相比，使用可再利用建筑构件的建造方法总共减少了 494 吨二氧化碳排放量，大约占总体碳排放的 59%。剩余的 349 吨温室气体排放中，其中由再利用的建筑构件所产生的碳排放仅约 6 吨。如果我们仔细分析各种不同建筑构件的减碳比例，可以发现主体承重结构、窗户和外立面在减少建筑碳排放方面的贡献最大。但总体需要注意的是，温室气体排放量的减少并不归因于少数几种构件，而是得益于许多不同构件叠加的综合效应。

建筑构件的再利用在减排方面的巨大潜力也为经济评估提供了全新视角：如果在进行比较时，考虑减碳量所对应的实际货币价值，那么将会显著降低建筑构件的实际成本，从而鼓励对于既有建筑构件的再利用。

Greenhouse gas emissions: Overall balance

Composition of the saved CO₂eq emissions

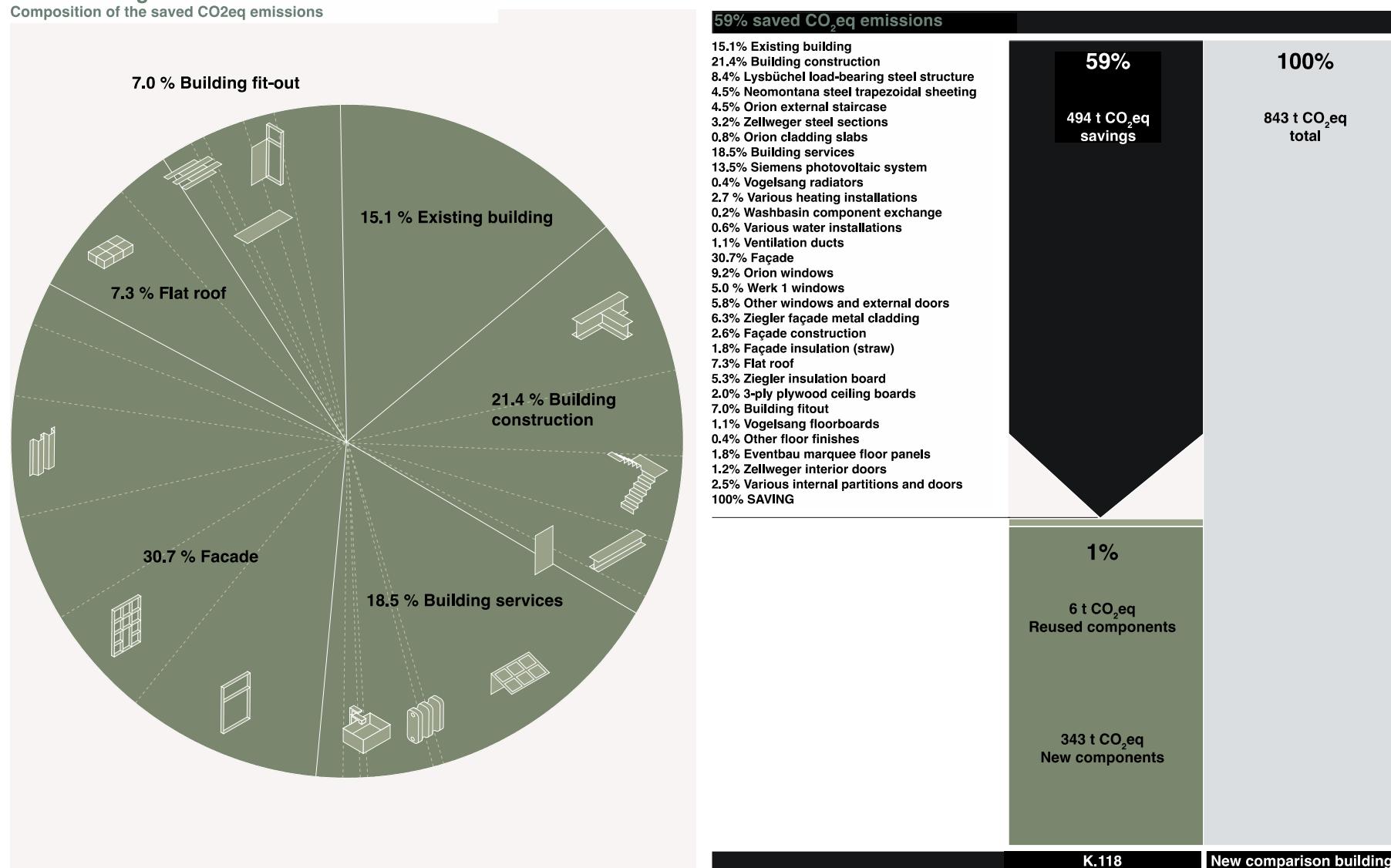


图 16: 温室气体排放量总体概览 ©ZHAW

3.6 平面图、剖面图和细部设计图



图 17: 立面图和剖面图 ©Baubüro in situ

■ 新建建筑再利用/秸秆/粘土
 □ 新建未分类/新建
 ■ 现有
 ▨ 已拆除
 XY000 部件编号

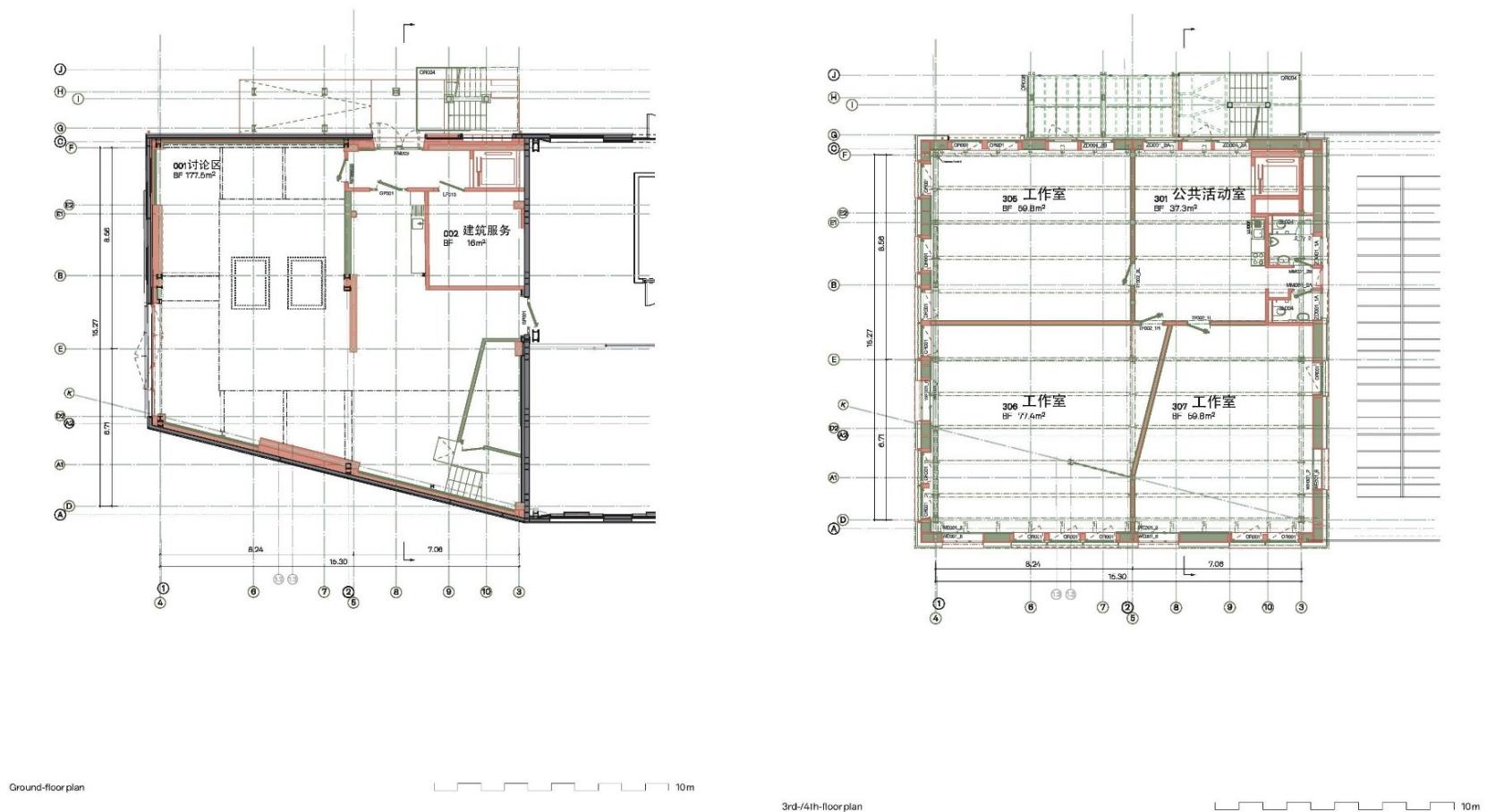


图 18: 地面层, 三层和四层平面图 ©Baubüro in situ

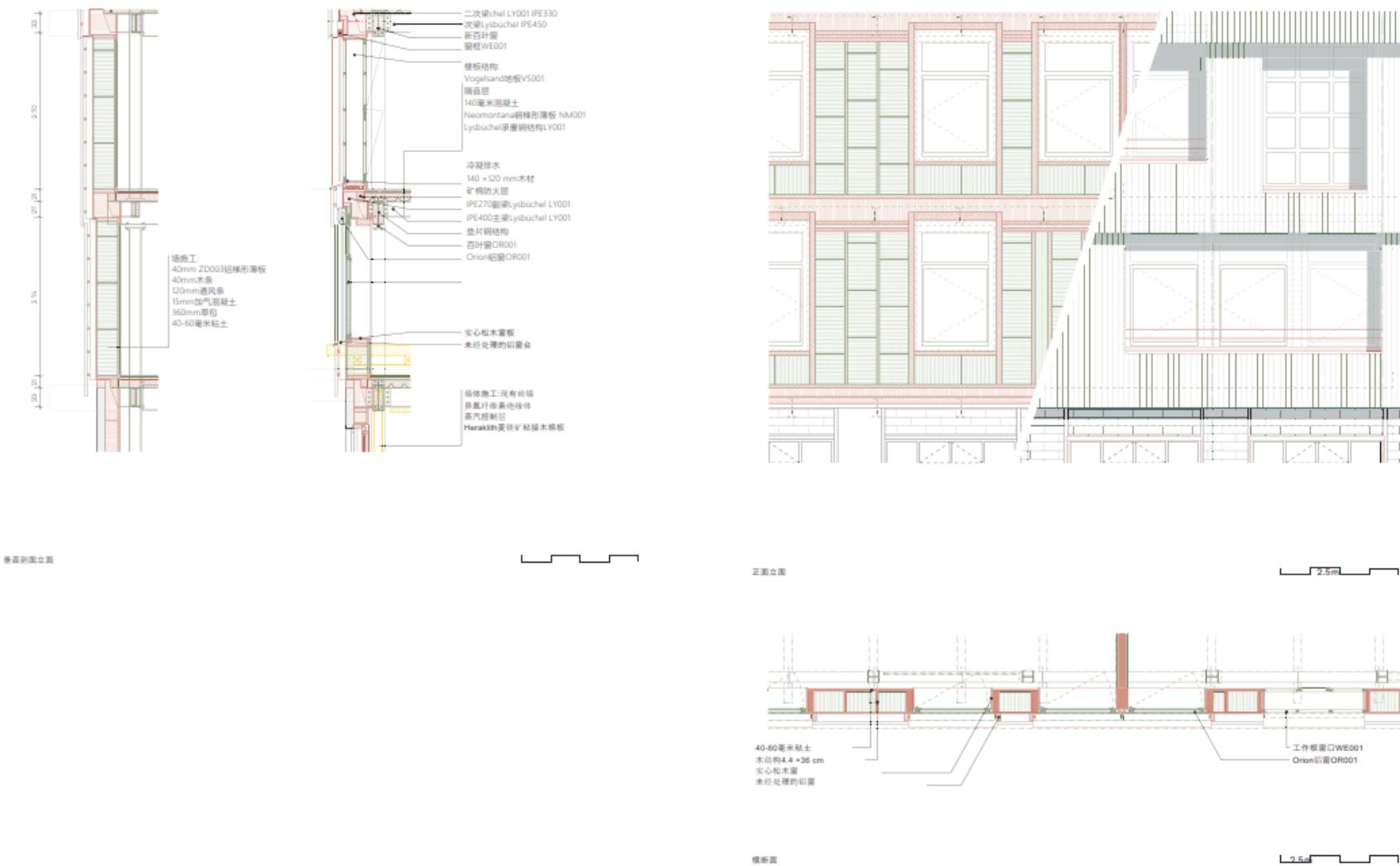


图 19: 外立面详图 (包括剖面图和平面图) ©Baubüro *in situ*

4. 可拆卸设计

4.1 介绍和定义

拆卸设计 (DfD) 是一种旨在促进和重视建筑构件的拆卸与组装程序的实践研究，并通过规划和设计阶段的精心考虑来实现。(参见 Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction-challenges and opportunities. Procedia engineering, 118, 1296-1304.) DfD 的设计方法让建筑构件的拆卸变得简单可行，从而更容易实现建筑的回收和再利用，是实现减少能源消耗、资源消耗和碳排放的根本措施之一。(Thormark, C. (2007, September). Motives for design for disassembly in building construction. In International congress sustainable construction, materials and practices challenge of the industry for the new millennium, Lisbon.)

拆卸设计 (DfD) 的主要原则可以概括如下：1) 材料信息的记录和描述拆卸方法的文档；2) 连接节点设计方便且简单，包括采用可拆卸的连接件，例如螺栓、螺钉和钉子连接替代焊接和化学粘接，并综合考虑使用预制构件和模块化构件；3) 系统分离：将不可回收、不可再利用和不可废弃处理的构件与建筑主体独立分离布置，例如机电系统 (MEP)；4) 简洁的建筑设计，便于实现构件和尺寸的标准；5) 在设计中将建造便捷、施工效率和安全性纳入设计。(Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction-challenges and opportunities. Procedia engineering, 118, 1296-1304.)

下文介绍的项目中可以看到采用 DfD 设计方法的建筑案例：

4.1.1 Toni Rüttimann 的桥梁设计

Toni Rüttimann 是一位瑞士桥梁建筑师，1987 年发生的厄瓜多尔地震促使他前往该国从事社会援助工作，与灾区人民共同面对灾难和逆境，投身于帮助当地重建被毁坏的基础设施。

他的设计灵感直接源于厄瓜多尔原始丛林中的油田，那里有许多可免费获取的建

筑材料：废弃的钢管、钢缆、硬木，以及村民提供的沙子和石头。这样的材料选择延续至今，仅钢管和电缆如今由阿根廷和瑞士的赞助商提供。

Rüttimann 设计的桥梁都是悬索结构，虽然跨度不同，但始终使用相同的构件：包括桥塔、主缆、吊索、桥面和锚固块。这种设计非常有效地发挥了材料本身力学性能，除桥塔外，所有的主体构件都仅承受拉力，充分发挥材料的截面承载能力，无须考虑稳定性问题带来的减损。然而，这样的桥梁设计缺乏冗余度：如果其中任何一个构件失效都可能导致桥体整体坍塌，因此 Rüttimann 在实际工程中加入了最为重要的安全系数，其取值大小根据桥梁构件的不同而有所区别，并与材料质量优劣息息相关。桥梁构件储存在不同的国家，经过检验、评估和评级，相应的数据汇总至电子表格，作为安全系数取值的评估依据。

Rüttimann 建造的桥梁可以在后期被拆除，并在其他地方重建。只有塔段的接合点是焊接的，其余的节点全部用螺栓连接，可以拆卸成可运输的尺寸。因此，理论上可以在不使用额外构件的情况下重建成为相同长度或更短长度的桥梁。



图 20：钢缆传输及其在桥梁施工上的运用 ©VANDERWALM

4.1.2 循环建筑，伦敦，Arup 奥雅纳

作为 2016 年 9 月 17 日至 25 日举行的“伦敦设计节”的一部分，ARUP 奥雅纳与幕墙公司 FRENER & REIFER 和总包公司 BAM 集团合作设计建造了一栋循环建筑（Circular Building），作为展示循环经济的建筑原型装置。该项目位于伦敦建筑中心大楼附近，并得到了该机构的支持。创作团队合作践行建筑业的循环经济原则，提出了以下问题：“我们能否设计建造一栋建筑，在其使用寿命结束时，所有组件和材料可被重复使用、再制造或再循环？”面对这一问题就需要改变设计和施工上既有的优先等级，并重新思考材料选择和施工流程。（<https://www.frener-reifer.com/news-en/circular-building-installation-and-exhibition-in-london/>）

该建筑装置采用浪费极少、自支撑且可拆卸的结构隔热墙板系统（SIPs, Structural Insulated Panels），墙体和回收再利用的钢结构框架之间的采用夹具紧固件连接，确保两者可以在未来被轻易拆解并回收利用。外墙饰面和楼板都采用了经过热处理的木材，耐用且可回收，并且热处理过程使用的是可再生能源。

总包公司 BAM 集团的可持续发展总监 Nitesh Magdani 表示：“这个临时展馆采用的建筑构件和家具全都是通过回收循环制造的产品和构件，我们希望激励公司和个人能更灵活地合理使用建筑空间，通过轻松调整平面布局以满足未来要求，减少资源浪费。”

BAM 集团的供应链部门在展馆中展出了许多有趣的物件，其中部分物品用于展示循环建造背后的“从摇篮到摇篮”（Cradle-to-Cradle）全生命周期理念，例如：

- Autex：一种隔音织物，可作为墙体结构和饰面使用。与传统产品不同的是，Autex 可被轻松拆卸并回收，不仅帮助人们随时调整空间氛围和视觉美感，同时也可以随时拆卸，从而检修墙体内部的管线。该产品由回收塑料瓶制成，不仅具有一定保温性能，还可以当做可插图钉的公告板。
- Desso：松铺地砖，遵循循环建造的理念设计制造而成。
- Buzzi Space 系列家具：不仅软垫可拆卸，而且泡沫填充物及结构框架都是可回收物。
- Orange Box：首款获得欧洲“从摇篮到摇篮”认证的仿生学工作椅，其

构件易于更换、维修或升级改造。

- 由可拆卸种植槽制成的绿植墙，需要浇水或更换植物时可轻松拆卸。
- 可持续木材制成的木梁/木板，建材供应商 Travis Perkins 正在评估如何最好地回收利用废弃材料，并在未来使用或转售过程中保持其价值。

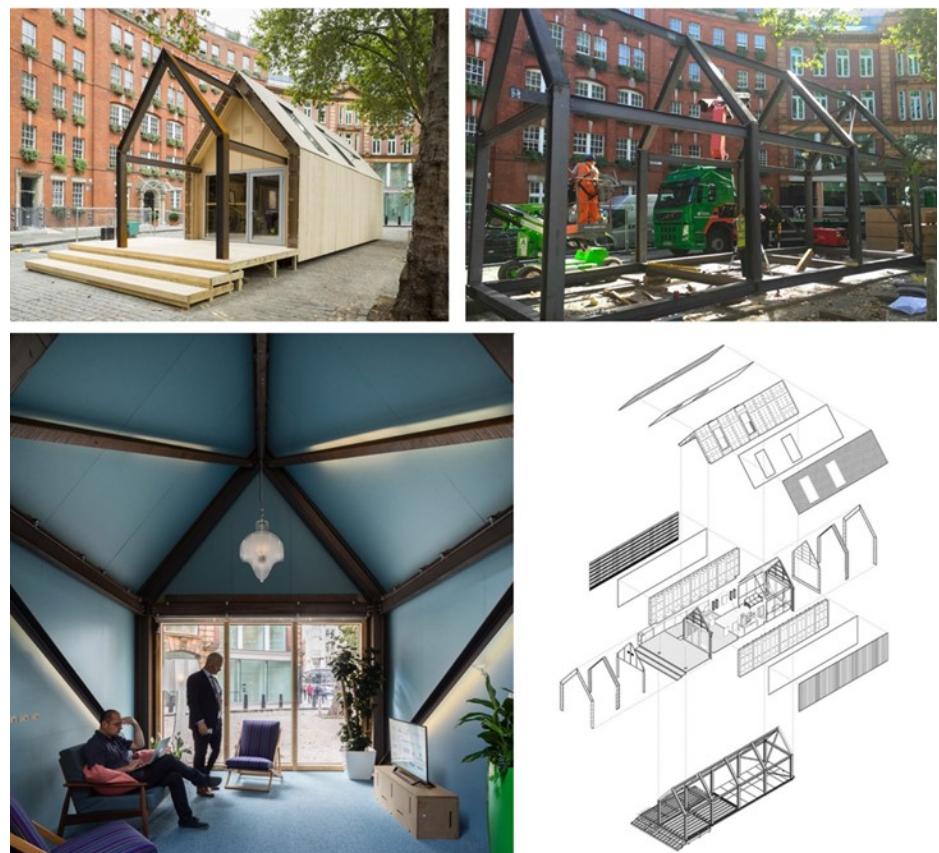


图 21：从左到右：为 2016 年伦敦设计节设计的建筑装置；循环建筑的钢结构；循环建筑的室内空间；循环建筑主体结构和建筑构件的爆炸轴测图。©ARUP

4.1.3 瑞士之家，苏黎世，Spillmann Echsle Architekten

在苏黎世展出的「瑞士之家」作为 2014 年欧洲杯赛事的临时转播中心，将苏黎世新建的送冬节广场变成了充满吸引力和人气的打卡地。「瑞士之家」是一栋以木材作为建筑材料的可移动建筑，由 193 个构件和 1300 颗螺钉组成，基本都是标准化构件。这些建筑构件可分为以下几种类型：楼板、天花板、屋顶和墙体。其中，墙柱之间根据实际使用情况可填充为玻璃、格栅或三层实木复合板。四组建筑体量通过金属锁扣相互连接，以经典的风车状布局形成一个内院。木制建筑的预制构件全部符合标准的卡车运输尺寸，只需 14 辆卡车即可完成所有材料和设备的运输。

如下图所示，该建筑所有的连接件都是可拆卸的，允许在不同位置多次组装和拆卸，总体施工周期不到两周，所有建筑构件都可直接放置在施工场地基上，进行组装拼接，并用螺钉连接为整体。

该建筑已经在多地巡展，并为以下活动搭建和拆解：

- 2014 年 2 月 7 日至 23 日：索契（俄罗斯）瑞士之家，“索契冬奥会”
- 2014 年 5 月 1 至 10 日：米兰（意大利）瑞士之家，“美食之旅”
- 2014 年 8 月 12 日至 17 日：苏黎世（瑞士）瑞士之家，“欧洲田径锦标赛”

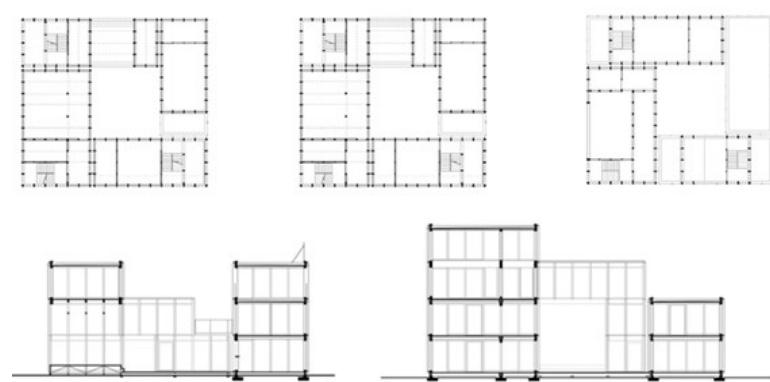
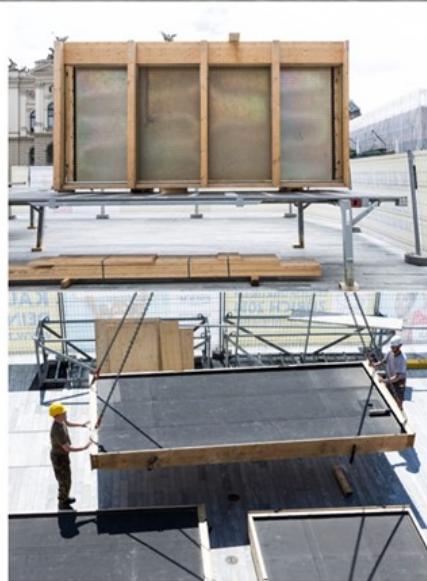


图 22: 瑞士之家施工现场、剖面图和平面图 ©SPILLMANN ECHSLE ARCHITEKTEN

4.2 ZHAW 的「家具再利用」教学课程

4.2.1 课程概述

欧盟成员国目前生产全球 28% 的家具，这是一个每年 840 亿欧元的市场，约有 100 万名欧洲工人参与其中。欧盟成员国也是重要的家具消费市场，预计每年消费 680 亿欧元，约等于每年 1050 万吨家具。每年家具行业的废弃物总量，包括生产过程中的商业废弃物和废弃家具，达到 1080 万吨，其中 80%-90% 被焚烧或送往垃圾填埋场。只有大约 10% 的废弃物（包括废弃材料和废弃家具）被回收利用。家具再制造（翻新）目前预计产生 3 亿欧元的营业额，涉及 3400 名欧洲工人，仅占整个家具行业的不到 1%。

显然，这种生产方式不可持续。气候变化带来日益明显的负面影响以及初级材料资源（木材）的稀缺，家具行业与许多其他行业一样，面临迅速向可持续生产模式转型的压力。家具制造公司，尤其是大多数中小企业，正面临着制定和实施新型商业战略的复杂挑战，然而现有的监管政策框架仍然鼓励传统的“取材-制造-废弃”这一线性商业模式。因此，欧洲家具工业联合会提议逐步向循环经济转型，同时改变现行的监管政策，以确保转型过程中各个阶段的经济可行性。

欧盟在政策制定层面上已经取得共识：“应对气候变化和自然资源过度消耗的唯一解决方案，是从材料开采和能源消耗的线性模式快速转型至循环模式。”目前正在采取多项举措来禁止有害的生产活动和制造流程，并启用和推广循环经济模式。例如，自 2018 年起实施的一项欧盟指令规定，新产品需要易于维修，产品的设计和构造必须符合循环经济的原则。截至 2026 年，新建公共建筑的家具将要求至少由 35% 的回收再制造材料和产品组成。

提出面向未来的可持续商业模式转型的必要性已经出现了数十年，许多具有开创性的家具公司很早就开始尝试和实施了新的商业模式，既可持续又能获得不错的经济效益。例如，全球最大的办公家具制造商 Steelcase 设计生产的办公椅首次获得完整的“从摇篮到摇篮”（Cradle-to-Cradle）认证，并继续将循环经济的原则完全融入其商业战略中。“从摇篮到摇篮”（Cradle-to-Cradle）认证要求包括可拆卸设计、构件和材料的全面循环利用，以及摈弃对环境有害的材料和工艺等。另一方面，瑞士家具制造商 Girsberger 针对办公行业的二手家具开展全面翻新和再

制造业务，不仅非常成功，更值得称赞的是，该业务不仅限于他们自己的产品，还包括其他品牌的家具产品翻新。



图 23: Girsberger 家具制造厂翻新的休闲椅
©[HTTPS://GIRSBERGER.COM/DE/LOESUNGEN/REMANUFACTURING/](https://GIRSBERGER.COM/DE/LOESUNGEN/REMANUFACTURING/)

4.2.2 案例分析

向可持续和循环经济转型的制造创新和产品开发是一个复杂的问题，它涉及多个相互关联的领域：监管方面的问题、商业模式的问题、生产技术的问题以及新的消费模式。对于设计师和建筑师来说，这一转型挑战的核心是如何使用现有的、被使用过的材料和构件，并将其转化为新的、富有功能性的、受欢迎的产品和物品。当然，这些新产品的构造需要设计为适于循环利用，且易于拆解。

为了让学生更加深刻的认识和理解未来面临的挑战，我们开设了一门选修设计课程，探讨如何通过数字化的制造工具将废弃材料转化为新家具。2022 年的首次课程“参数化废料家具”得到了 ZHAW“数字未来基金”的资助，要求学生们从建筑工地的废料垃圾箱中搜寻获取废弃材料，在分析了特定的居住家具需求后，他们设计了一款适合家庭使用的多功能边桌。学生们通过使用 Shaper CNC（一种手持式混合 CNC 雕刻机）能够快速制作出他们的设计原型，我们格外关注构件接头和连接件的设计，强调不得使用胶水或额外的紧固件，同时要保证可以轻松拆卸。即使缺乏木工方面技术知识，数字加工的高精度使学生能够轻松制造非常精确的连接组件，这种机器赋能的制作体验反向激发了强烈的设计动力。

2023 年该课程名为“开源设计”，设计任务是一个可供三人使用的座位，需要整合设计解决结构受力体系、静力学和人体工程学的问题。提供的制作工具范围扩大到包括 3D 打印、激光切割和常规 CNC 加工。材料仍需采用回收再利用的材料，但也包括纸板、水泥和传统建筑构件。由于设计要求更加复杂，学生们一开始认为比第一版要困难得多，但课程成果却令人鼓舞：十组由 2-3 名学生组成的团队全都成功制作出符合结构标准的座椅家具原型。

当学生们使用数字 CAD 和计算机自动控制进行制作时，潜在的问题是设计的内在可调整性。在虚拟环境中，设计可以轻松调整和更改，既可以在宏观层面上“适应”不同的需求，例如椅子的座高，也可以在微观层面上整合材料公差（针对重复使用的材料）。2024 年新学期的设计课题名为“可变对象”，我们试图研究可变设计在功能、设计和构造方面的可能性。其中最有趣的是比例系统，例如勒·柯布西耶的“模度系统 Modulor”，旨在确保设计与产品在不同规模和尺寸上的高质量。

ZHAW 拥有建筑设计学院与土木工程学院组成的综合学科背景，因此我们提出新的教学目标，与学生共同设计和建造一个更大的空间结构，即“循环废料亭”。我们刚刚得到大学科研项目“可持续影响计划”的资助，将为明年 2025 年春天的试点课程提供支持，目前被命名为“空间系统”，继承前几次课程的概念，设计建造一个带有外墙和屋顶的大型建筑结构。

根据我们的观察，在高校内开展这些实践性设计和建造工作坊，为学生提供实验和学习的机会，让他们接触到再使用、循环建造和可拆卸设计的设计原则，是让这些原则得到正确理解，并内化到学生设计中的有效方法，使这些未来的建筑设计从业者能够在他们的建筑实践中创造性地应用这些原则。此外，学生们设计制作的家具原型也非常有效地传达了我们教师科研团队的核心使命，即如何结合数字制造与回收材料，生产出高质量的完全符合循环经济原则的产品和构件。

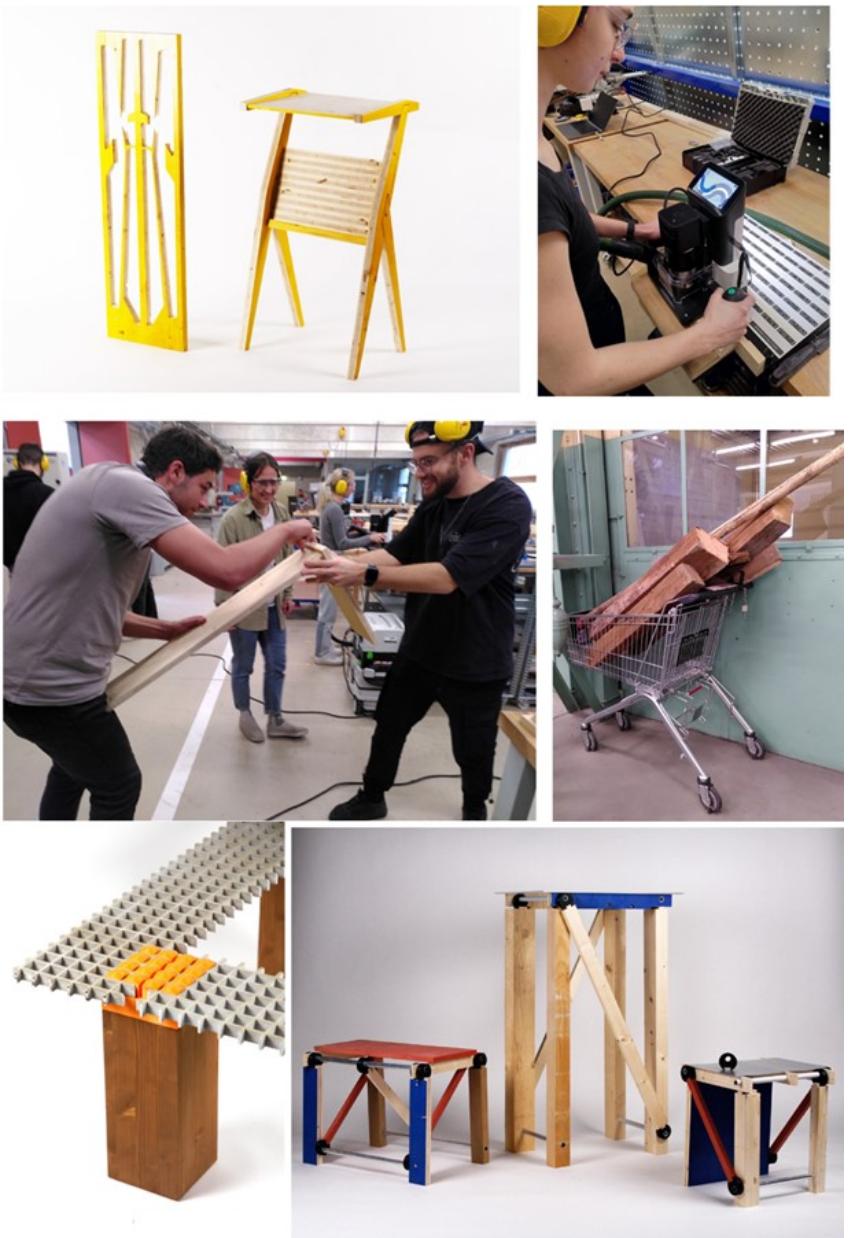


图 24：学生课程项目作业，从左到右：

“BRIBBON”，课程“参数化废料家具”，学生 Fiona Hubler、Simone Mahler;

“BRIBBON”的细部设计，课程“参数化废料家具”，学生 Fiona Hubler、Simone Mahler;

“SCHALTABLE”，课程“参数化废料家具”，学生 Ferdinand Matthias、Endrit Memeti;

使用 Shaper CNC 进行安全的数字化制作，课程“参数化废料家具”，学生 Sina Elmer、ZHAW 模型工作坊工作人员；

充满活力的学生使用精确的压接接头，课程“参数化废料家具”，学生 Abidin Memeti、Manuel Jeck。

来自建筑工地废弃垃圾箱的原材料，课程“参数化废料家具”；

“GRID FUSION”，由回收的通风管道检修走道的铺地材料制成的长凳，配有 3D 打印的连接构件，细部，课程“开源设计”，学生 Dominik Mettler、Simon Ott;

“Schwalbeneck”，带有局部人工加工和 3D 打印连接构件的家具系统，课程“开源设计”，学生 Yanosh Simenic、Til Steiger

5. 实地考察报告

2023年10月16日至26日，瑞士零碳建筑专家代表团参加了中瑞零碳建筑合作项目的中国之旅。这一国际合作倡议是朝着建设气候中和的未来迈出的重要一步，为中国的合作伙伴提供瑞士的创新技术和理念，促进可持续建筑的实践。代表团一行的旅程始于北京，参加了中瑞零碳建筑产学研合作论坛，并在北京示范项目建筑工地上进行了技术交流。ZHAW团队在零碳建筑设计（Zero Emission Design）、可拆卸和再利用设计（Design for Disassembly / Reuse）方面提供专业知识和技术指导。此后参加了各种研讨会，例如建筑构件循环利用研讨会。在北京的活动结束后，团队前往上海，与当地示范项目团队进行了技术交流和实地考察。

随后，代表团前往无锡，参观了无锡示范项目现场，并参加了围绕零碳建筑设计（Zero Emission Design）和可拆卸和再利用设计（Design for Disassembly / Reuse）的研讨会，之后返回上海。

行程结束后，代表团成员从上海出发返回苏黎世，这标志着此次交流的圆满结束，此次交流有望为建筑行业未来的可持续发展和环保发展铺平道路。



图 25：瑞士专家代表团在北京，2023 年 10 月

5.1 对中国建筑和城市的印象

中国可以概括为一个形成鲜明对比的国家，在古老的传统与尖端的现代科技之间，中国城市是历史建筑与现代摩天大楼、城市开发相结合的混合体。

中国拥有丰富的历史建筑，如长城、故宫和众多古老的寺庙，这些建筑象征着中国丰富的文化历史和建筑遗产，古代建筑与现代发展也形成了鲜明的对比。在过去的几十年里，中国经历了建设热潮，形成了以摩天大楼为主的现代城市天际线。上海和深圳等城市以其独特的快速发展而闻名，中国快速的城市化导致了城市的不断扩张，尤其是特大城市向外扩张并且新建了许多住宅区、商业区和工业区。这些城市通常将传统风格与现代影响融为一体。对于来自欧洲背景的人来说，令人印象深刻的是大量的单一类型建筑在邻里之间并排而立。



图 26：北京印象 ©ADRIAN KIESEL

5.1.1 基础设施的增长

中国在基础设施方面投入巨资，包括世界上最大的高速铁路网络、广阔的高速公路网络和重要的可再生能源项目。为了应对环境问题，人们越来越关注可持续发展。然而，城市扩张和空气污染等问题仍然面临挑战。我们注意到，中国在可持续发展上关注的重点是减少运营阶段产生的碳排放，却对隐含排放碳缺乏关注，因此这方面的策略性缺失需要引起足够的重视，也是未来亟需解决的重大问题。除了现代化以外，当地市集、街头小吃和历史街区等传统的一面也让人感受到中

国文化的丰富性。

我们在旅程中发现中国城市与欧洲城市相比，存在以下显著差异：

- 欧洲城市通常更注重保护历史建筑，而中国城市则更侧重于历史建筑与现代化的融合。
- 欧洲城市往往有更统一的城市规划，反映其悠久的历史，而中国城市由于快速增长和发展，城市规划与布局相比之下更加随意。
- 欧洲建筑具有哥特式、文艺复兴式、巴洛克式等多种历史风格，而中国建筑则试图将古代风格与尖端的现代和后现代设计融为一体，现代建筑与古老的建筑传统之间没有明确的联系，缺乏连续性。
- 欧洲城市通常将绿地空间更无缝地融入城市规划，而在中国，这样的整合规划设计是较新的城市发展趋势，在不通的城市之间差异很大。
- 总体而言，有幸访问参观中国的城市和建筑为我们提供了一扇了解中国社会制度和政治体系的窗口，它们既植根于历史，又面向未来，与更具有历史一致性的欧洲城市景观形成鲜明对比。

5.2 2023 年 10 月 18 日研讨会

5.2.1 汇报讲座

在中瑞零碳建筑产学研大会上，苏黎世应用科技大学 ZHAW 以「隐含碳排放」为主题进行了汇报和研讨，探讨了“可拆卸设计”(DfD) 和建筑构件的再利用这一创新设计理念，希望这一理念能在中国不断发展变化的建设环境中发挥的关键作用，以降低建筑行业的隐含碳排放。这种方法对于向可持续城市发展转型至关重要，符合中国在城市化和基础设施扩张过程中日益关注的环境保护和更为细致的城市管理发展趋势。随着中国城市的空前发展，整合可拆卸设计(DfD) 的创新设计理念提供了为减少环境影响提供了一条新路径。如果建筑构件的使用周期能够从单个建筑物的生命周期延长至多个建筑物的生命周期，将大大提高其可持续性。为了实现这一目标，建筑物需要以符合可拆卸的原则进行建造，以便其建筑构件未来可以被轻松拆卸与重复利用。

5.2.2 可拆卸设计原则的实践案例

我们展示了整合可拆卸设计(DfD) 和构件再利用理念(Reuse) 在瑞士建筑实践中的成功实例（例如 Baubüro in Situ 设计建造的 K.118 项目），充分说明了在建筑设计阶段考虑全生命周期的优势和可行性：促进建筑材料的回收和再利用。这些原则随后也将被应用到中瑞零碳建筑示范项目中，相关内容请参阅最终报告中关于上海和陕西示范项目的构件再利用和可拆卸设计的咨询建议。

我们的汇报旨在激励中国及其他地区的建筑设计师、城市规划师和政策制定者，倡导基于可拆卸和再利用的设计原则，打造不仅具有丰富的美学和文化内涵，同时还有可持续性和前瞻性思维的建筑和城市。

我们的观点符合中国建筑和城市的可持续发展和现代化主题，强调了创新设计实践在塑造城市未来发展上的关键作用。

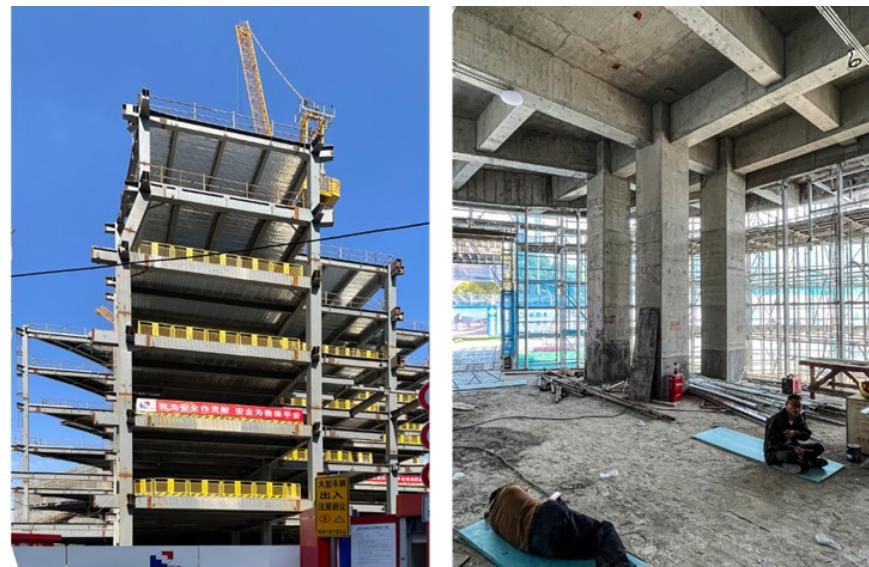


图 25: 示范项目施工现场 ©ADRIAN KIESEL

5.2.3 实地考察

北京

作为中国的首都，北京是中国历史与当代生活交汇的城市，这里拥有中国最珍贵的历史遗迹，包括故宫和天坛，北京的城市景观由古老的胡同和雄伟的现代建筑交织而成，反映了其作为中国政治和文化中心的地位，我们考察的第一个示范项目就坐落在这样的城市机理中。尽管 ZHAW 在这个项目上没有具体的咨询任务，但仍在现场为建筑师提供技术和知识支持。该项目计划建立一套监测能耗并执行智能控制的系统，分为供暖、制冷、供水、电梯和通风等方面的运营能耗，这是明智的设计决策。对于设计者而言，向访客展示可视化的能耗数据和建筑物的智能管理非常重要。在此，建筑体现出来的科技感是进步的象征。我们建议在设计阶段需要关注隐含碳排放量，并采用低技术、高收益的设计策略和技术措施，而不是一味选择碳排放更高且需要频繁维护的高科技解决方案。

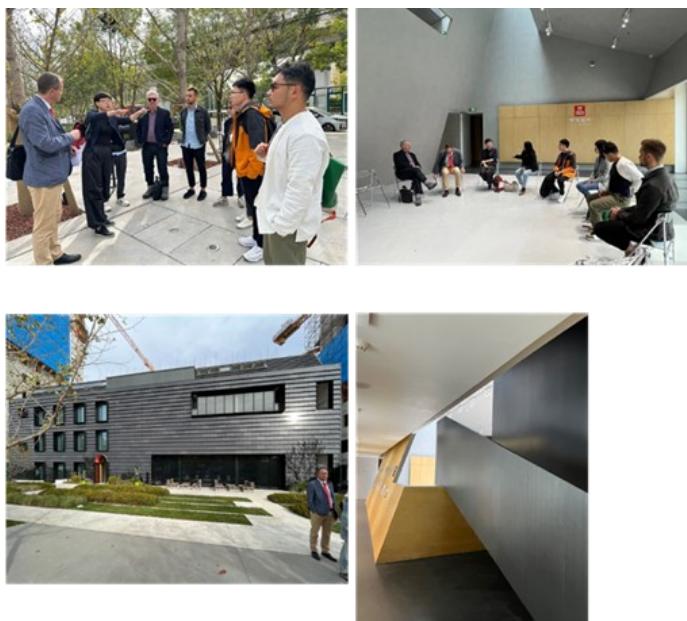


图 26: 北京演示项目现场, ©ADRIAN KIESEL

北京示范项目简介

2022 年 3 月，“北京市房山区中建第一大夏（集团）·学府印月零碳房项目”入选中瑞零碳建筑项目第一批示范项目之一。该项目是中国住房和城乡建设部与瑞士发展合作署共同发起的部级国际合作项目。该项目于 2021 年 5 月开工，经过中瑞团队两年多的共同努力，于 2023 年 9 月 27 日正式竣工并实现零碳建筑目标。

- 投资方：中建集团
- 设计团队：THAD SUP Atelier（建筑师）+ CABR EE（能源顾问）
- 中瑞 ZEB 咨询团队：Intep、Skat、CABR、Low-Tech、UAD、HSLU、EMPA、ZHAW 等。
- 更多详情请参见中瑞 ZEB 示范项目“北京市房山区拱辰社区中心”总结报告



图 27: 北京示范项目 ©素朴工作室

上海

上海是中国快速现代化和全球影响力象征。这座大都市以其标志性的天际线，上海中心大厦和东方明珠塔等建筑为特色。拥有着从历史悠久的外滩及其殖民地时期的建筑到超现代的浦东新区，上海是多种文化和风格的融合体。同时它也是中国面向西方世界的展示窗口和经济首都。

上海示范项目是 ZHAW 的工作任务之一，重点是针对目前正在建设中的展厅建筑提供室内设计方面的「建筑构件再利用」设计咨询。此次考察分为两部分，一是建设工地的现场考察，二是由 ZHAW 团队组织的相关讲座：可拆卸设计 (DfD) 和构件再利用 (ReUse)。

上海示范项目简介



图 28: 上海示范项目现场 ©中瑞零碳建筑合作示范项目

2023 年 4 月，“上海嘉定公共住宅区”项目入选中瑞零碳建筑项目第二批示范项

目之一。该项目是中国住房和城乡建设部与瑞士发展合作署共同发起的部级国际合作项目。该项目于 2023 年 5 月开工，经过中瑞双方团队约一年的共同努力，预计于 2024 年 5 月正式竣工建设。

- 投资方: 上海嘉未来置业有限公司
- 建设单位: 上海嘉未来置业有限公司
- 设计团队: 华东建筑设计研究院有限公司
- ZEB 当地咨询团队: 华东建筑设计研究院有限公司
- 中瑞 ZEB 咨询团队: Intep-skat, CABR low-tech, UAD, HSLU, EMPA, ZHAW etc.
- 地点: 上海 (气候区: 夏热冬冷地区)
- 建筑用途: 市集、展览
- 结构体系
 - ◆ 市集厅: 钢木混合结构
 - ◆ 展览厅: 混凝土结构
- 面积指标
 - 总建筑面积: 总计 9566.8 m²
 - 建筑用能参考面积
 - ◆ 市集厅: 3446.5 m²
 - ◆ 展览厅: 2804.9 m²
- 投资成本: 70,000,000 元人民币



图 30: 上海示范项目©上海示范项目设计团队

在现场考察的过程中，我们发现一个共性问题，即混凝土作为主要建筑材料被视为先进的建筑实践，展览建筑的整个主体结构都由钢筋混凝土构成。（相比之下，在瑞士由于近年来建筑行业对气候变化问题的重视，混凝土材料因为其生产过程和拆卸过程排放的大量隐含碳排放，逐渐被其他木结构等低碳材料替代或减少其用量）由于主体结构已经建成，因此我们建议保留结构的原始毛坯状态，避免使用碳排放高的饰面或二次装修，从而降低碳排放。该建筑的室内可以布置临时展墙和展板，以便于未来拆卸的方式进行设计和建造，或者采用木材等低碳可持续材料。所有电线（例如网络电缆和电源线）都应该可再利用，并且我们建议使用回收的旧电线而不是新电线。此外，所有灯具和照明设备都应采用回收再利用的旧灯具，而非全新设备。通过这样的方式，我们希望这座建筑能够作为一个坚固不变的结构体，便于未来多种不同临时展览的搭建和拆卸，在其全生命周期内减少布展拆展造成的资源浪费。

无锡

无锡是一座位于上海市中心西北 135 公里的城市。与北京和上海等繁华的大都市相比，这是一个较小、更传统的城市。无锡以其风景如画的风景而闻名，其中包括著名的太湖，古老的寺庙和传统中式园林所体现出丰富的文化遗产。同时，它已成为高科技产业的中心，特别是在太阳能技术和软件开发等领域。

无锡示范项目简介

在这个项目中，ZHAW 没有相关的委托咨询任务，但仍在现场为建筑师提供技术支持。此次考察分为两部分，一是建设工地的现场考察，二是由 ZHAW 团队组织的相关讲座：可拆卸设计 (DfD) 和构件再利用 (ReUse)，同时还包括 FHNW 团队提供的相关讲座。

2022 年 3 月，“无锡尚贤湖低碳数字产业园”入选中瑞 ZEB 项目第二批示范项目之一。该项目是中国住房和城乡建设部与瑞士发展合作署共同发起的部级国际合作项目。该项目于 2022 年 6 月开工，计划于 2024 年 11 月竣工。

- 投资方：无锡太湖新城城市开发有限公司
- 设计团队：中国建筑科学研究院（CABR）
- 中瑞 ZEB 咨询团队：Intep-skat, CABR low-tech, UAD, HSLU, EMPA, ZHAW etc.
- 地点：中国江苏无锡（气候区：夏热冬冷地区）
- 面积指标：
 - ◆ 规划总用地面积 96657.4 m²
 - ◆ 总建筑面积 210980 m²
- 建筑用途：集办公、会议、展览、教育于一体
- 建筑面积：210980m²
- 建筑高度：
 - 1 号楼：地上 3 层
 - 2 号楼：地上 7 层

- 3-6 号楼: 地上 5 层
- 7-10 号楼: 地上 2-3 层
- 一期: 底层 B1+二层 B2
- 二期: 地下 B1 层
- 投资成本: 总计 2,170,622,600 元人民币



图 31: 无锡示范项目施工现场, ©无锡示范项目设计团队



图 29: 无锡示范项目施工现场及技术交流工作坊, ©ADRIAN KIESEL

参观建筑工地后发现，该项目的混凝土用量占比较大，隐含碳排放较高。另外值得肯定的是该项目采用地热能作为供暖能量来源，并布置了大面积光伏发电。当日下午，ZHAW 为示范项目设计团队举办了一场关于可拆卸设计（DfD）和建筑构件再利用（ReUse）的讲座，并就建筑可持续性和隐含碳排放的计算原则等方面交流和讨论。目前该建筑群的设计策略是最大限度地减少运营碳排放，而不考虑隐含碳排放，双方立志于找到更合适的方法，以便开展两者之间的项目合作。

5.3 第 2 阶段 - 「再利用」桌面游戏

5.3.1 再利用游戏和隐含碳排放

通过一款专门为中国城市规划者、建筑师和高校师生设计的再利用游戏，不仅具有趣味性，还具有教育意义，旨在提高参与者对可持续发展的认知，帮助参与者在实践活动中探索可持续城市发展的理念。参与者会在游戏中面临挑战，重新思考传统的建造方式，特别需要关注材料再利用 Reuse、可拆卸设计 DfD 和减少碳排放。

5.3.2 游戏机制

玩家的目标是主要使用回收再利用的建筑材料建造一座建筑物，然而由于这些回收材料较为稀缺，经济成本较高，迫使参与者在使用新的、更高碳排放的建筑材料时做出相应的战略决策。参与者从建筑预算开始，以类似「大富翁游戏」的方式购买或者出售可再利用的建筑部件，并完成整栋建筑。这款游戏模拟了现实世界中可持续材料的稀缺性和成本波动，促使玩家批判性地思考资源分配的问题。每个建筑构件，无论是可再利用的还是新的，都带有特定的碳排放值、拆卸难易度和实际成本。参与者必须努力在预算范围内最大限度地通过使用可再利用的建筑构件减少建筑整体隐含碳排放，努力将其对环境的影响降至最低。

我们鼓励团队成员积极讨论和辩论他们如何在有限预算内实现最低碳排放，并制定相应游戏策略，这也反映了现实世界中可持续城市发展的协作本质。游戏过程中玩家将了解诸如“隐含碳”、“全生命周期分析”以及“可再利用材料的环境效益”等概念，使他们能够更深刻的理解和更自如的应用可持续发展的原则。

5.3.3 预期成果

该游戏可以帮助参与者在中国快速现代化城市的背景下，更全面地理解和应对可持续建筑实践中遇到的挑战和机遇。通过模拟城市发展的决策过程，该游戏为如何将可持续性融入实际的建筑项目和城市规划项目提供了宝贵的知识积累和经验总结。该游戏可以激发参与者的创造性思维，并提出创新型的解决方案，鼓励

参与者探索既经济高效又节能环保的替代性建筑材料和施工方法。

5.3.4 相关结论

「再利用桌面游戏」可以成为用于教育和吸引中国建筑行业主要参与者（如建筑师、城市规划师、政策制定者等）的有力工具，通过可再利用的建筑材料 Reuse 和可拆卸设计 DfD，模拟可持续发展的复杂性，促进人们认识到重复使用建筑材料的重要性和建筑实践对碳排放的影响，为城市设计和建筑设计的可持续发展铺平道路。

5.4 未来教育

「再利用桌面游戏」非常有潜力成为高校教育的教学工具，特别是在建筑设计、城市规划和环境工程等领域。通过将这个游戏纳入大学课程，学生可以在早期阶段就从实践的角度了解可持续建筑的实际操作和建造过程，自下而上培养未来从业者的可持续思维方式。

该游戏提供了一种轻松有趣的互动式学习方式，是对传统课堂教学和教科书教学方式的补充，通过亲身动手体验帮助学生更深刻的理解可持续建筑实践的复杂性。通过了解不同的建筑材料的隐含碳排放大小，该游戏可以让学生更了解设计过程中对于建筑结构和建筑材料的选择所对应的环境影响，强调在建筑设计和城市设计决策中衡量碳足迹的重要性。在游戏中，学生可以学习如何去平衡经济成本与环境保护之间的矛盾，这反映出现实世界中的真实场景：建筑预算通常会影响并限制建筑材料的选择，教导学生学会在这些约束条件下找到创新的解决方案，学会“带着镣铐跳舞”。

由于中国教育体系的高度规范化和制度化，学生越来越难以跳出既定的框架进行学习和思考。然而在这个游戏的框架内，学生们挑战以不同的方式思考并制定策略，在相同的成本和材料限制条件下，最大限度地减少二氧化碳排放，这可以帮助培养他们解决问题的能力，对于应对现实世界的可持续发展挑战至关重要。此外，该游戏还提高了人们对可拆卸设计 DfD、建材再利用 Reuse 和建筑碳排放的原则性认识，从而解决建筑隐含碳排放的问题，上述知识对于这些将在未来塑造

我们生活环境的建筑师和规划师来说至关重要。

该游戏可以作为实践课程模块融入到课程中，让学生在模拟环境中应用理论知识，如果可以进行多次游戏，效果则更为显著。每次模拟之后，参与者都应该复盘并讨论游戏中所做出的决策所带来的后果，然后将总结出来的经验和知识运用到下一轮游戏中，从而更容易理解其背后复杂的思维过程。相比于单调的传统课堂式教学，游戏化的学习提供了更有效的替代方案，高校可以组织以该游戏活动为核心的工作坊或研讨会，并辅以可持续建筑设计和城市规划专业人士的客座讲座。

此外，可以鼓励学生修改或扩展该游戏，作为他们研究项目的一部分，探索新的方法来纳入更多的可持续性要素，或者扩展至城市规划层面，并随着学生对该课题理解水平的提高而增加更多层次的复杂性。

5.4.1 潜在影响

通过在高校环境中引入这款游戏，学生不仅可以从理论上了解可持续发展，还可以积极面对其带来的实际挑战并提出解决方案。这种沉浸体验式的学习方法确保当这些学生未来投身专业实践时，他们已经具备了可持续建筑设计和实践的实际理解，准备好在建筑行业中实施自下而上的可持续发展方法。这种早期的接触可以激励新一代的建筑师和城市规划师在其职业生涯中优先考虑履行环保实践，为全球的可持续发展目标做出重大贡献。

5.5 相关结论

随着瑞士专家代表团的中国考察之行，中瑞零碳建筑合作项目为可持续建筑实践做出了重大贡献。此次旅程覆盖了北京、上海和无锡等数个城市，不仅举办了技术交流研讨会，还为中瑞建筑从业者们提供了互相学习和彼此适应的机会。除了促进专业层面的交流以外，还能在个人层面上建立良好的私人关系，促进多方合作和联系。



图 32: 在北京 CABR 办公室举办的所有演示项目研讨会, ©ADRIAN KIESEL

该项目在促进建筑中的可拆卸和再利用设计方面取得的成功，体现了瑞士的创新如何为全球可持续建筑实践做出积极贡献。项目团队所实施的战略，从倡导建筑材料的再利用到创新结构的智能化设计，都体现了减少建筑对环境影响的承诺。

此外，以教育为目的而开发的交互式「再利用桌面游戏」，强调了该项目在提高民众认识和教育未来建筑师和城市规划师方面的创新方法。该游戏有效地传达了可持续实践的重要性以及建筑选型对环境的影响。

从中国快速发展的密集性城市结构中，瑞士建筑师可以观察了解到如何将现代技术与传统建筑实践相结合的宝贵实践经验。中国的城市化方式以古代与现代建筑的融合为特点，为平衡历史保护与创新发展提供了宝贵的经验和教训。此外，中国对高科技解决方案和可持续城市规划的重视也为瑞士建筑师提供了相应的对比模型，用于探索低技术、高收益的设计策略，不仅减少建筑的运营碳排放，还能减少建设过程中的隐含碳排放。

从本质上讲，中瑞零碳建筑项目是一座指引我们进步的灯塔，预示着建筑行

业的美好未来。它体现出互惠的国际合作和良性的知识交流可以加快形成全社会的环保意识，并促进可持续建筑实践的发展。

6. 循环建造

6.1 上海零碳建筑示范项目：市集馆及展览馆

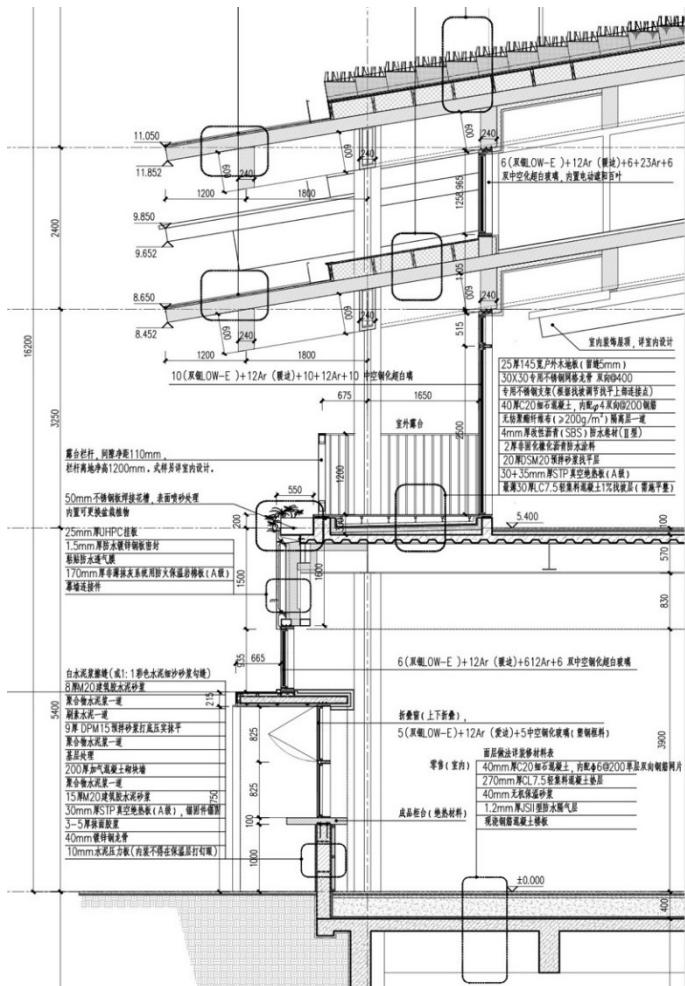


图 33: 已建成的市场的细节部分和展览空间的一部分

6.1.1 潜在影响

作为瑞士咨询方，我们分析了上海的两栋示范建筑：市集馆和展览馆。它们分别处于不同的建设阶段：市集馆已经建成并投入使用，而展览馆仍处于施工阶段。在 Adrian Kiesel 参观考察期间（2023 年 10 月 20 日），展览馆的混凝土主体结构已经施工完成。

6.1.2 两栋建筑主体结构

市集馆的主体结构为钢结构，并以防火木板作为饰面，屋顶结构主体也是钢结构，但次级结构采用了木结构屋架，地下部分（地下一层）为钢筋混凝土结构；展览馆整体则是现浇钢筋混凝土结构，其西立面被设计为垂直绿化立面，类似“地毯”一样的绿毯几乎覆盖了整个外立面。

钢筋混凝土的应用

市集馆的地下部分（包括建筑基础、地下室楼板和墙体）均按照常规做法采用钢筋混凝土结构，而展览馆则是所有主体结构和建筑楼板均采用钢筋混凝土。钢筋混凝土是世界上最常用的建筑材料，内部植入足量的钢筋提高承载力，与纯混凝土相比，钢筋混凝土的碳排放更高，在生产过程中排放了大量的温室气体。

承重结构及屋顶结构

市集馆建筑的主体承重结构由钢柱和钢梁构件组成，而屋顶结构的主要结构是钢梁，并覆盖木饰面构件，次要结构是木结构屋架。从最终呈现的实际效果来看，所有的钢结构构件完全被木饰面包裹隐藏。建筑楼板由波纹金属板和现场浇筑的混凝土建造，建筑外立面则大量使用玻璃窗。

屋顶结构看上去完全采用多层胶合木构件（Laminated Timber Element），在 Adrian Kiesel 访问期间得以澄清：屋顶次梁是多层胶合木，主梁则是钢梁，并被

满足相应耐火等级的胶合木板包裹覆盖。

6.1.3 改进建议

以下设计改进建议尽管基于某个特定案例分析研究得出的具体问题和细部设计，但也可以被视为同时针对两个示范项目的普遍性建议。

「结构性竹筋」代替「钢筋」

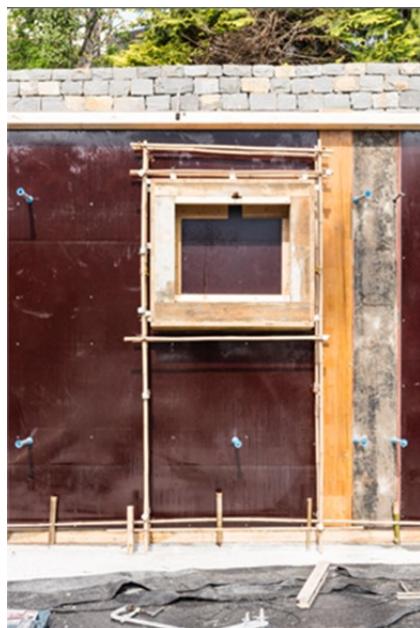


图 34: 瑞士 Alpnach HOUSE K 地下室墙体施工过程。©RASMUS NORLANDER

在瑞士 Alpnach 的建筑案例 Haus K 中，地下室所有混凝土墙体内部的钢筋配筋都被竹子代替。该替代方案由业主提出，即专门从事木结构建筑的 Künig 建筑公司，并愿意尝试这种施工方法带来的风险，免除了工程师和建筑师的相关责任。

迄今为止，西方世界对竹筋混凝土建筑的研究案例还很少，其中最受赞誉的是土木工程和材料科学方面的学者 Khosrow Ghavami 出版的一系列学术文献，他是最早发表有关结构工程竹应用和研究的工程师之一：

- Ghavami, Khosrow. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*. 27. 637-649. 10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002.
- Khosrow Ghavami, Romildo D. Toledo Filho, Normando P. Barbosa, Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres, *Cement and Concrete Composites*, Volume 21, Issue 1, 1999, Pages 39-48, ISSN 0958-9465

在位于新加坡的苏黎世联邦理工大学 ETH Zurich 未来城市实验室 Future Cities Laboratory 中，由 Dirk Hebel 教授和 Alireza Javadian 博士领导的团队正在进行有关结构竹材料的研究，更多内容可以参阅相关论文：

- Hebel, Dirk E., Heisel, Felix, Javadian, Alireza, Müller, Philipp, Lee, Simon, Aigner, Nikita and Schlesier, Karsten. "Constructing with Engineered Bamboo". *Cultivated Building Materials: Industrialized Natural Resources for Architecture and Construction*, Berlin, Boston: Birkhäuser, 2017, pp. 58-71. <https://doi.org/10.1515/9783035608922-007>
- Javadian, A.; Smith, I.F.C.; Hebel, D.E. Application of Sustainable Bamboo- Based Composite Reinforcement in Structural-Concrete Beams: Design and Evaluation. *Materials* 2020, 13, 696. <https://doi.org/10.3390/ma13030696>
- Maier, M.; Javadian, A.; Saeidi, N.; Unluer, C.; Taylor, H.K.; Ostertag, C.P. Mechanical Properties and Flexural Behavior of Sustainable Bamboo Fiber Reinforced Mortar. *Appl. Sci.* 2020, 10, 6587. <https://doi.org/10.3390/app10186587>

钢构件再利用（与木结构的隐含碳排放比较）

如果可能的话，将作为建筑主体结构的钢构件进行重复利用，在任何情况下都是更可持续的设计策略。根据 2022 年 1 月 1 日瑞士 KBOB 建材碳排放数据机构提供的数据，重复利用的钢结构（材料来源 300 公里以内）要比全新的多层胶合木构件（GLT: Glue Laminated Timber）隐含碳排放更低，更具可持续性。

根据瑞士 KBOB 数据库：

多层胶合层压木梁

A1-A2-A3 生产过程

0.287 Kg CO₂ eq

来源：KBOB 数据库 01.2022

德语名称：

Brettschichtholz 胶合层压木

重复使用钢元件 K.118

R1-R2-R3 回收过程

0.026 Kg CO₂ eq

数据计算参考：HEA 220 型钢钢梁在巴塞尔 Basel 拆解，运输至普拉特恩 Pratteln 进行处理，最后运至温特图尔 Winterthur 的施工现场进行安装（总运输距离 100 公里）

图 35：瑞士 KBOB 建材碳排放数据库中对于两种建筑构件的隐含碳排放比较 ©ZHAW

展厅内部隔墙的再利用

展厅设计施工的重点是展览空间的规划设计，以及相应的隔断、灯光、家具系统。在与上海示范项目展陈设计团队的远程会议中，业主希望瑞士零碳咨询团队就临时展览的内部隔断系统再利用提供相关咨询建议。展区之间的隔墙以及非混凝土承重墙的其他分隔墙，都可以由轻质材料制成，这些墙体随着时间的推移可以轻易拆卸并再利用。

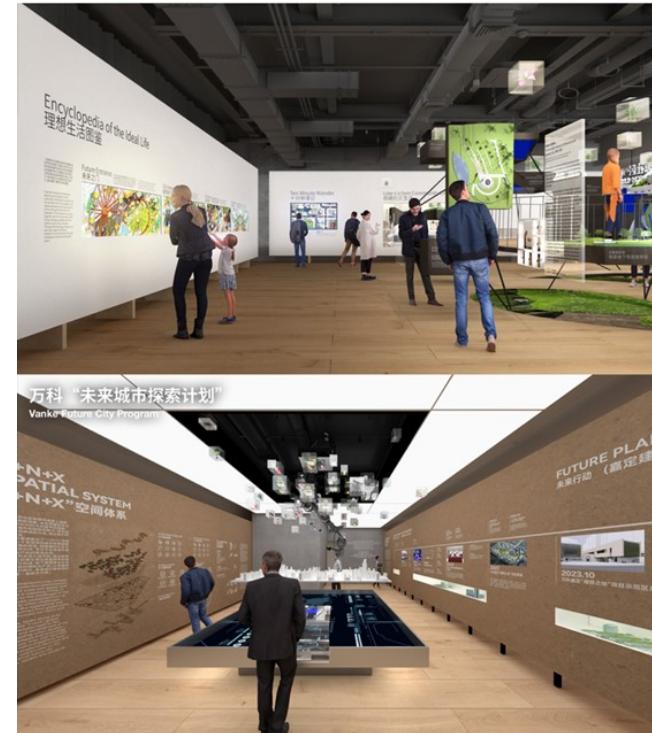
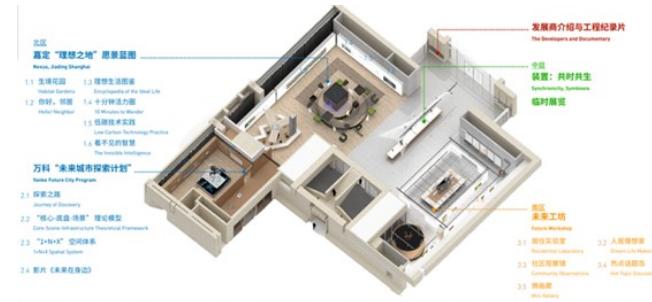


图 36：基于 2023 年 10 月 11 日提交的展陈设计平面图，瑞士团队就可能的建筑构件再利用提出建议；下半部分为展厅效果图；内部隔墙可采用木龙骨结构，并设计为双层木框架系统，以便满足相应的隔音和防火要求。©上海示范项目设计团队

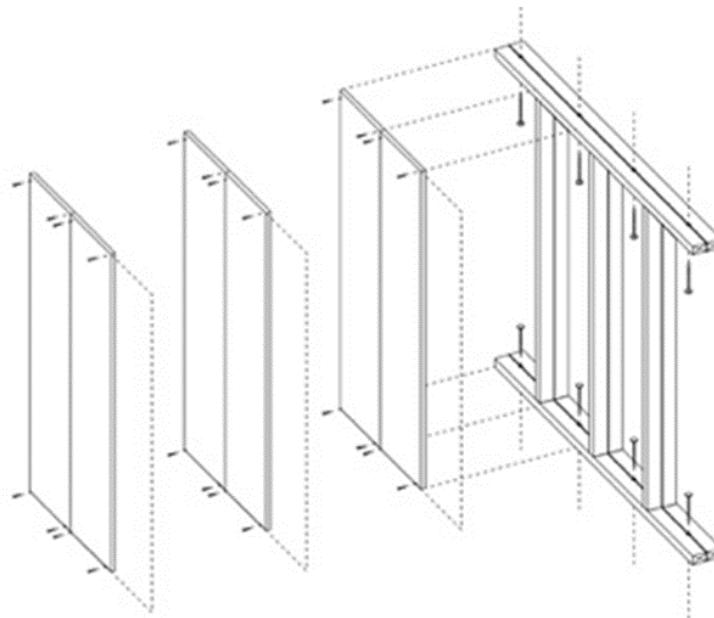


图 37: 带有双联木框架的木螺柱结构示例。随着时间的推移, 可以拆卸和重复使用。
©ZHAW

如果隔墙两侧的房间功能不同且有隔音要求的话, 可在两个木龙骨框架之间增设橡胶条用于保证隔音效果, 橡胶条同样也用于隔墙与地板和天花板的接触面上, 整体木框架结构被螺丝固定到地板和天花板上, 或者通过金属或木条等间隔物固定到侧墙上。在结构固定后, 再通过螺丝将饰面板固定在木龙骨结构上。

下面列举 3 种饰面板材料及其隐含碳排放量 (遵循瑞士 KBOB 建材数据库, 2022 年 1 月更新) :

- 轻质玻璃纤维混凝土板: 1.04 Kg CO₂-eq 二氧化碳当量
- 镜面不锈钢板: 333 Kg CO₂-eq 二氧化碳当量
- 三层实木复合板作为饰面板: 0.471 Kg CO₂-eq 二氧化碳当量

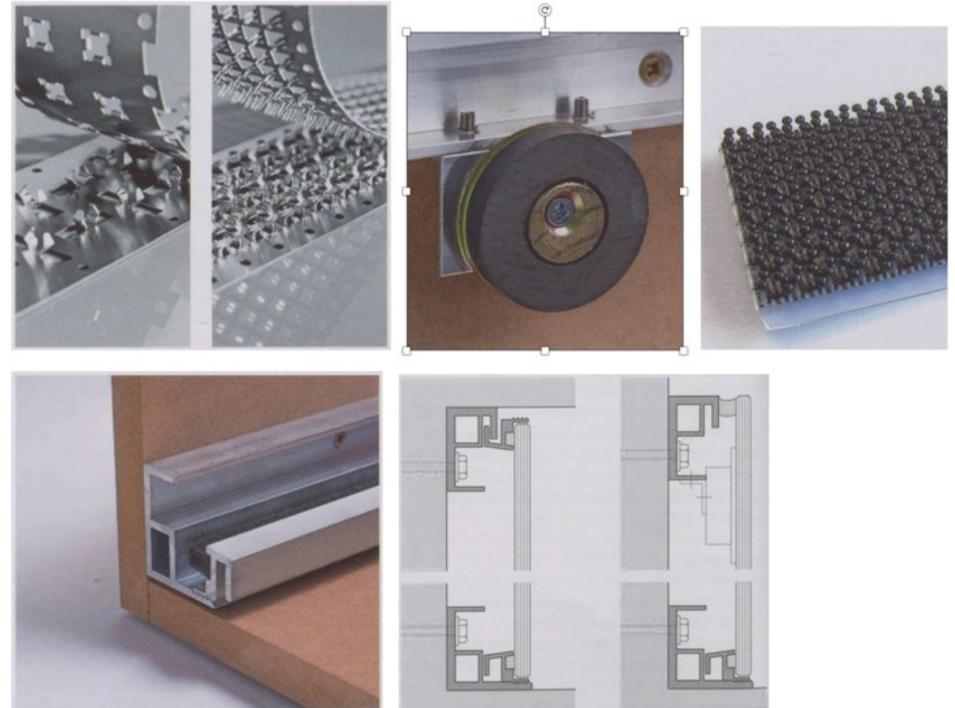


图 38: 多种固定连接系统示例 ©Detail

饰面板可通过卡扣固定、磁吸固定、魔术贴固定等连接方式与结构相连。如果墙体是木龙骨结构, 则可以用木销木榫进行连接。©Detail

- 左上图: 针对特殊高标准要求的魔术贴固定连接件, 使用金属钩环固定件或者按扣式固定件 ©Detail
- 湿区墙面玻璃固定系统: 悬挂固定或磁吸固定
- 湿区墙面玻璃的磁性固定系统 ©Detail
- 爬升式固定器: 钩面和环面可以设计为蘑菇头形状, 以提供更强的固定力。©Detail

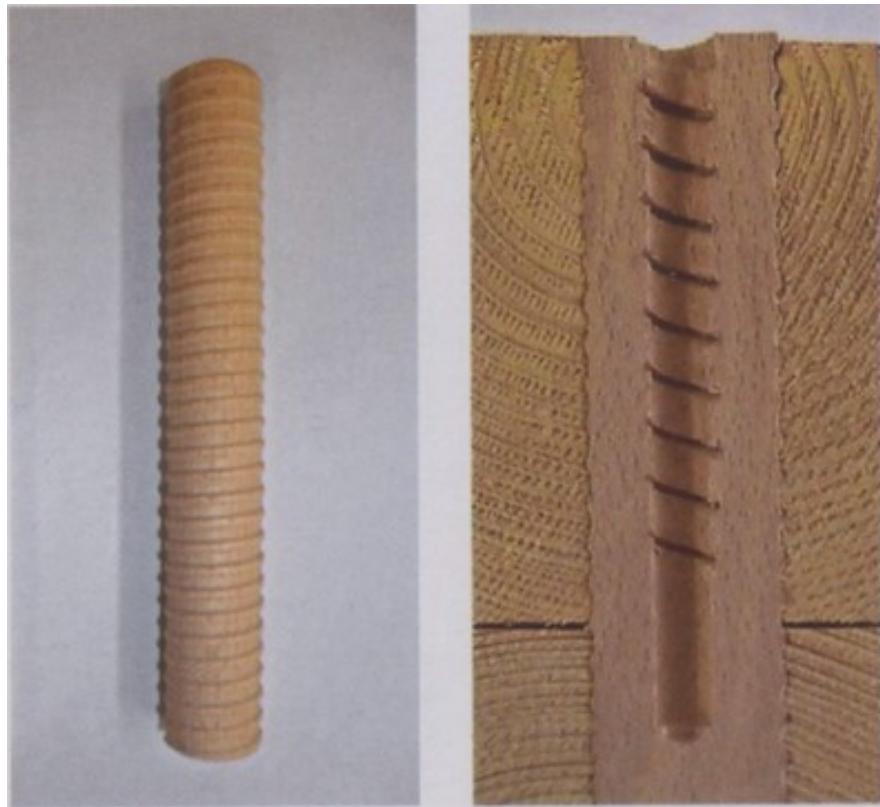


图 39: 可拆卸性-用于刚性施工方法的紧固件: 木螺钉和木销钉 ©DETAIL

6.1.4 内部隔墙的多种类型

K.118 项目中的隔墙

在 K.118 项目中, 室内隔墙是用回收的木框架制成的, 当中的隔音岩棉材料也是回收材料。

隔墙内部结构由两组彼此相连的框架组成, 框架之间用橡胶条分隔以保证隔音效果, 同样的橡胶条也用于隔墙与地板和天花板的接触面。此外, 建筑室内的木地板也采用了从剧院舞台回收而来的三层实木复合板进行铺设。



图 40: K.118 项目, 瑞士温特图尔市, 室内隔墙的构造 © BAUBÜRO IN SITU

户外品牌 TRANSA 苏黎世办公室，建筑师：Baubüro in situ

K.118 项目的设计方 Baubüro in situ 建筑事务所在苏黎世 Transa 办公室旧改项目的设计中，则提供了木框架隔墙系统的另一种解决方案：将回收而来的悬挂式吸音纤维天花板切割成板块，然后将其堆叠在由回收木条制成的木框架构造中，共同构成了稳固的室内隔墙。对于拆除回收而来的刨花板也采用同样的处理方法：首先将垂直向的木龙骨立柱用螺栓固定到建筑主体结构上，龙骨之间填充这些回收而来的板材，以形成稳定的整体构造。

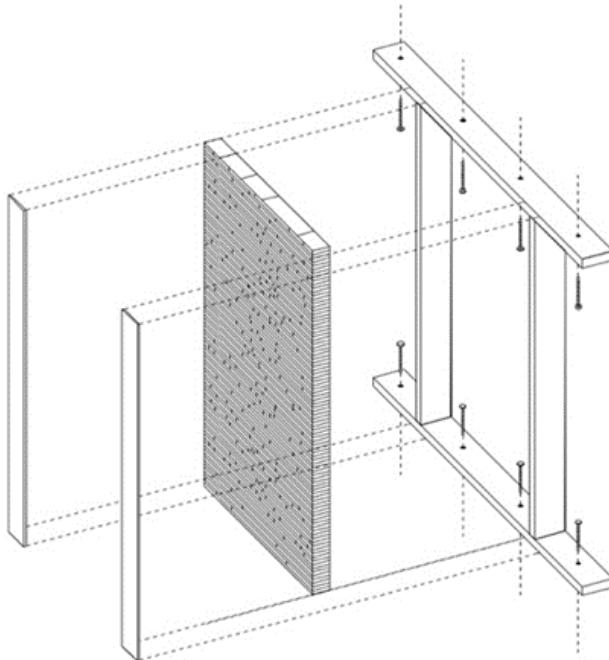


图 41：回收而来的悬挂式吸音天花板纤维板被切割成板，堆叠在木龙骨之间作为墙体填充。这种回收材料产生的温室气体排放量极低，仅为 $0.001 \text{ Kg CO}_2\text{-eq}$ 二氧化碳当量 © ZHAW

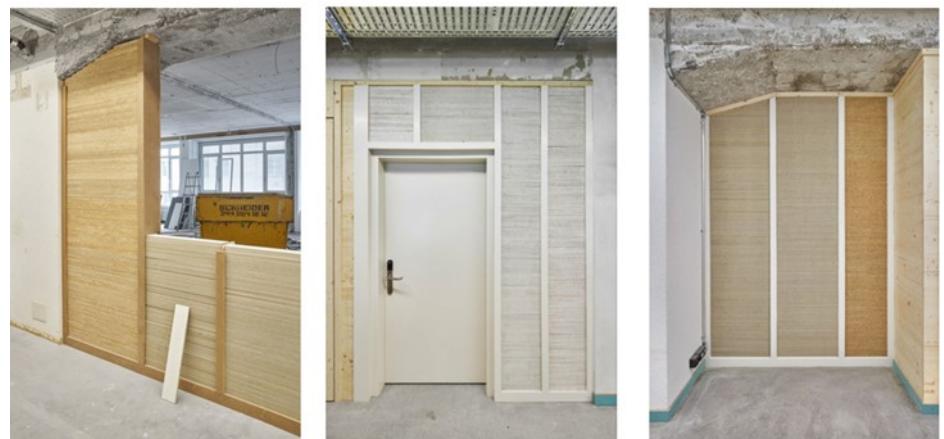


图 42：苏黎世 TRANSA 办公空间改造设计，BAUBÜRO IN SITU ©IN SITU

EMPA NEST 实验楼建筑中 UNIT SPRINT 建筑单元和 UMAR 建筑单元

在位于瑞士 Dübendorf 迪本多夫的 EMPA（瑞士联邦材料科学和技术研究院）的 NEST 建筑中，其中名为 Unit Sprint 的建筑单元由 Baubüro in situ 负责设计建造。内墙采用了两种可拆卸设计进行建造：第一种由旧地毯铺装模块折叠或层叠而成，第二种由旧书籍或旧杂志堆叠而成。

办公单元的永久隔断墙是由现代标准木制造业在生产过程中产生的废料组成，这

些废料（纤维水泥板和三层实木复合板生产过程中的废弃部分）在当前建筑行业中形成了持续的材料流，随时可供使用。由 Baubüro in situ 设计的墙体系统同时也满足相应的防火和隔音要求，并可以按米为单位进行预制化生产。除此以外，这一办公单元的承重木结构来自于拆除屋顶结构时，锯断回收得到的木梁。

所有的预制墙体模块均在木工车间加工完成，然后运送至施工现场，安装至现有的钢筋混凝土主体结构中。

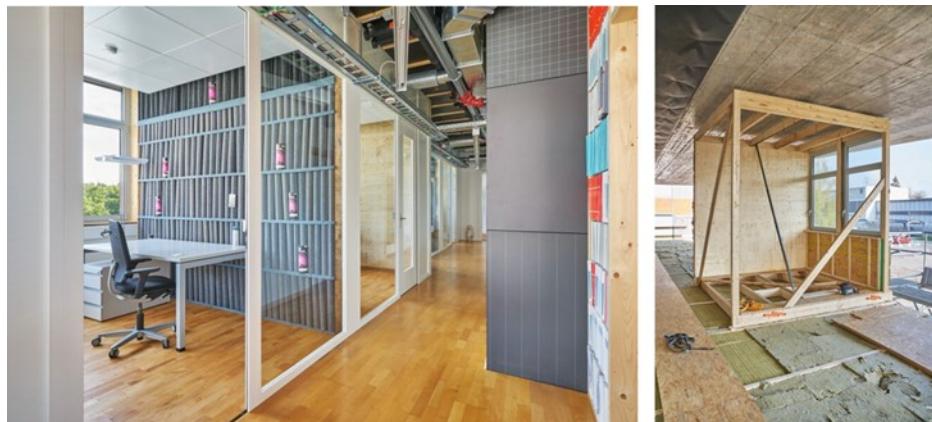


图 43: UNIT SPRINT:隔板上铺满了重复使用的旧地毯。©IN SITU

另一个建筑单元名为 UMAR (Urban Mining and Recycling 城市矿藏和废物回收单元)，由 Werner Sobek、D. Hebel 和 F. Heisel 设计，其支撑结构和大部分外立面均采用未经加工处理的实木木材，可在建筑拆除后被直接重新利用，或者用于堆肥。外立面构造中还包括铝和铜，这两种金属可以被清洁无污染地分离，熔化并回收。该建筑单元内部采用了多种批量生产的建筑产品，这些产品的组成材料可以在不留下任何残留物或废料的情况下进行分离和分类，然后重新引入到新一轮的材料循环利用中。这当中包括菌丝板（由真菌菌丝体生长在有机废料上形成的生物复合材料）、回收砖、再利用的保温材料、租

赁地面铺装（而非购买，在未来需要升级地板时可将旧地板退还给供应商，供应商负责处理旧材料进行循环再利用）和多功能的太阳能热能装置。

在该建筑单元中，内墙设计颇为创新：用螺栓将竖向钢杆固定在木框架的水平龙骨上，然后在钢杆上插入不同种类的材料，如再生砖、再生纸盘或废旧杂志、木制构件等。例如专为 UMAR 特制的砖块上设计有专门的孔洞，可以简单地从上方穿过钢杆，并通过榫槽系统互相嵌扣，从而成为有一定承载能力的墙体。由于没有使用任何砂浆作为粘合剂，因此只需将砖块向上拉起即可轻易拆卸或更换，并在其他地方重复使用，此外钢杆也可以被重新回收利用。这些砖块由阿姆斯特丹的一家年轻初创公司 StoneCycling 生产，是通过回收矿物废料碎石进行了重新利用，将其投入新的材料循环中成为低碳可持续的建筑材料。

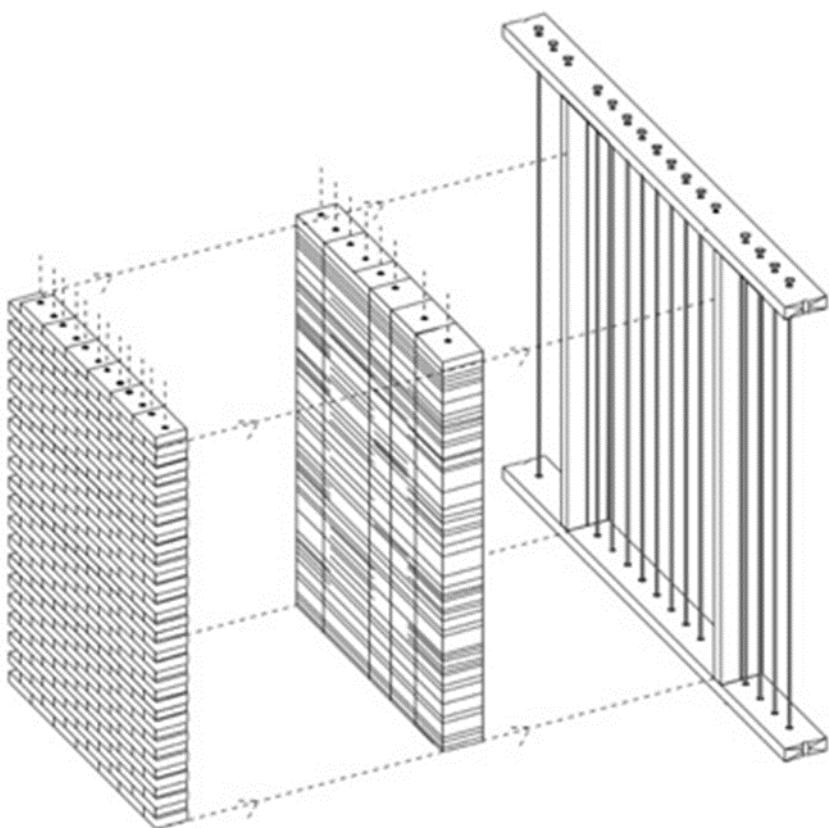


图 44: Stonecycling 公司生产的可回收砖作为饰面隔断墙体。砖块上有孔，可以从上面简单地穿过钢杆 ©ZHAW

- 低碳砖块建造的隔断墙隐含碳排放约为 0.050 Kg CO₂ eq。©ZHAW
- 也可利用废旧杂志建造墙体，杂志上钻孔并简单穿过钢杆固定。
©ZHAW
- 废旧杂志建造的隔断墙隐含碳排放约为 0.001 Kg CO₂ eq。©ZHAW



图 45: 由回收再生砖 Brics Stonecycling 建造的可移动墙体示例 ©BEYOND WALL SYSTEM

Stonecycling 提供的另一种可拆卸解决方案名为 Beyond Wall System，用于室内墙面的装饰面砖。这些由回收材料组成的薄砖饰面板在内侧设有槽口，可以在墙面金属导轨上左右滑动固定，金属轨道则通过螺丝安装在墙面木制支撑板上。此外，这些饰面砖可以用可移除的砂浆填缝，也可以不填缝直接将暴露在外。

- StoneCycling – Beyond Wall 系统 ©
- WasteBasedSlips® 和 BioBasedTiles®



图 46: Beyond Wall 槽沟和金属轨道锚固系统的细部示意图 © BEYOND WALL SYSTEM

ZHAW 学生设计的 K.118 灯具

在 K.118 的首层还可以发现另一个由回收材料制成的家具案例：回收利用破损霓虹荧光灯管制成的 6 盏灯具，由苏黎世应用科学大学建筑系的研究生在建筑构造设计研究所 IKE 相关课程指导下设计完成。这个设计将已经无法使用的损坏霓虹管改造成灯具外罩：32 根废旧的霓虹管由上下两个新的金属圆盘固定在一起，金属盘同时也支撑着灯具内部新的 LED 灯泡，共同组成了新的灯具。

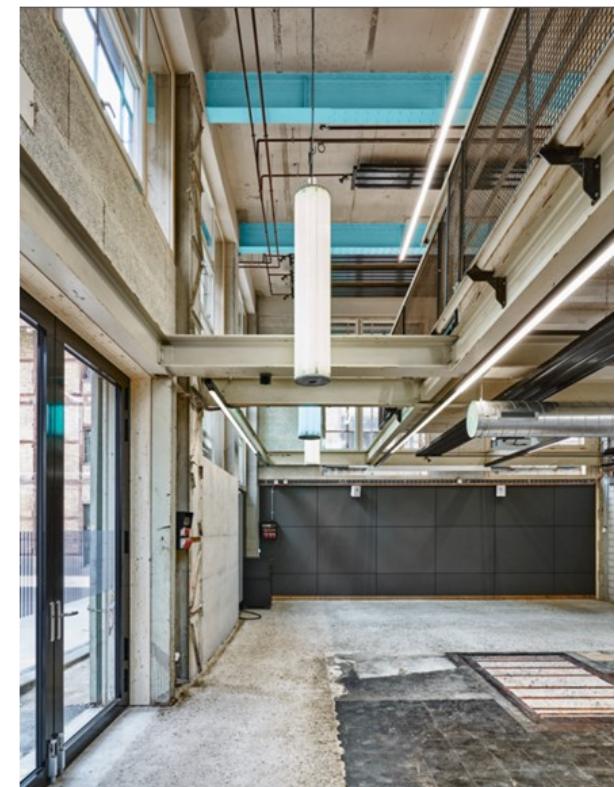
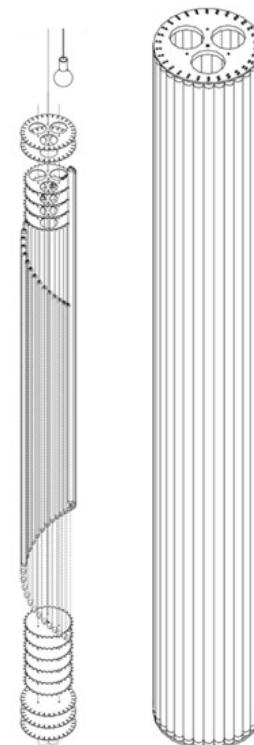


图 47: 灯具轴测图和安装在 K.118 入口处呈现出的实景效果 ©ZHAW

2023 年威尼斯双年建筑展德国馆

策展人：ARCH+ / SUMMACUMFEMMER / BÜRO JULIANE GREB

威尼斯双年展分为艺术展和建筑展两部分每年交替举办，2023 年的建筑双年展上，德国馆完全使用上一年 2022 年艺术展留下的数百吨垃圾和剩余材料建造，将德国馆变成一个具有生产性的基础设施，鼓励促进再利用和循环建造的原则，与建筑业的社会责任和生态责任相结合。回收再利用的生产流程在德国馆中得以真实呈现，这些过程通常被隐藏在公众视野之外，该项目表明，生态可持续性与社会问题密不可分。

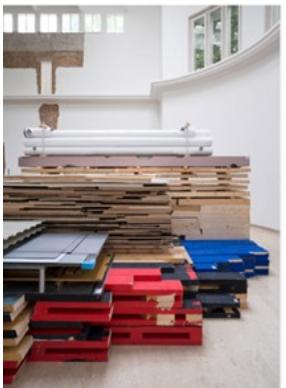


图 48: 德国馆 ©ARCH+

东京宫改建项目，法国巴黎，Lacaton & Vassal

尽可能保留！该项目对建筑空间的设计方法能够非常灵活地管理建筑物内的丰富多样的功能和区域，他们被一系列的房间、空间和时间框架巧妙地组织在一起，建筑物作为不同的功能和用途的空间容器，尽可能展现出宽敞大气的姿态。虽然整个空间是开放式的，但它可以很容易地临时划分，重组为单个巨大空间，或者一系列小空间。

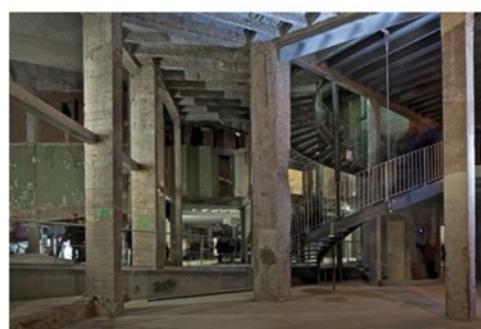


图 49: 东京宫. ©LACATON&VASSAL

6.2 陕西留坝蜜蜂博物馆示范项目

6.2.1 项目信息

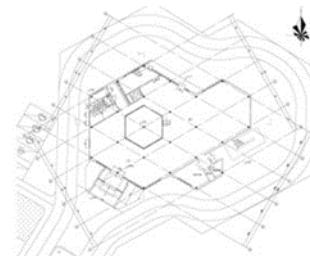
- 投资方及建设方：柳坝云木乡村旅游开发有限公司
- 设计团队：西安建筑科技大学建筑设计研究院
- 本地零碳建筑咨询团队：西安建筑科技大学建筑设计研究院、中国建筑设计研究院有限公司
- 中瑞零碳建筑咨询团队：Intep-Skat、CABR、Low-Tech、UAD、HSLU、EMPA 等
- 地点：陕西省汉中市留坝县（气候区：寒冷地区）
- 建筑用途：集科普研究、互动体验、蜂文化展示、蜂产品销售于一体的综合建筑
- 结构体系：钢结构
- 面积指标
 - 规划用地面积：4674 m²
 - 总建筑面积：1530 m²
 - 建筑节能参考面积：1404 m²
- 投资成本：约 2200 万元人民币

6.2.2 项目现状

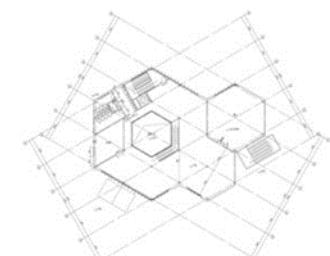
以下是对陕西留坝蜜蜂博物馆项目中关键设计的分析：

平面中的重复性

建筑设计中强调多边形母题的重复，从而实现模块化结构的产生。通过采用模块化设计原则，可以实现建筑组件的预制，这不仅提高了施工效率，也为未来的拆卸和再利用奠定了坚实基础。结构的模块化不仅使得现场装配更加简单，且在建筑达到其使用寿命时可以被轻松拆卸。



一层平面图



二层平面图

图 50: 陕西项目规划高度网格化、模块化。左：一楼，右：二楼 @陕西示范工程团队
作为次级结构的天花板

采用次级天花板系统用于各种管线的布置，使得日常维护和管线修理更加容易，甚至可以在未来轻松改变建筑用途。这与建筑循环经济所倡导的「系统分离原则」完全契合，即致力于尽可能延长建筑材料和建筑构件的使用寿命，以减少浪费并促进可持续发展。

开放灵活的平面布局

该项目开放自由的平面布局提升了建筑的灵活性和适应性，不仅满足了建筑当前的功能需求，并允许通过重新布置平面以适应不同建筑功能和用途，为这栋建筑未来的再利用提供了保障。

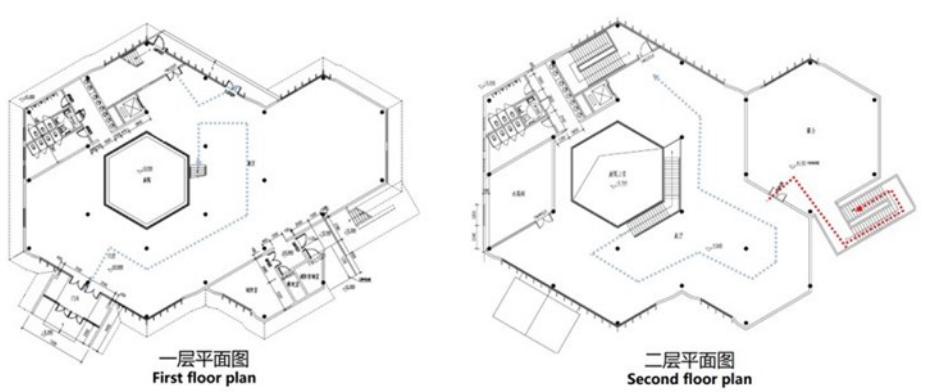


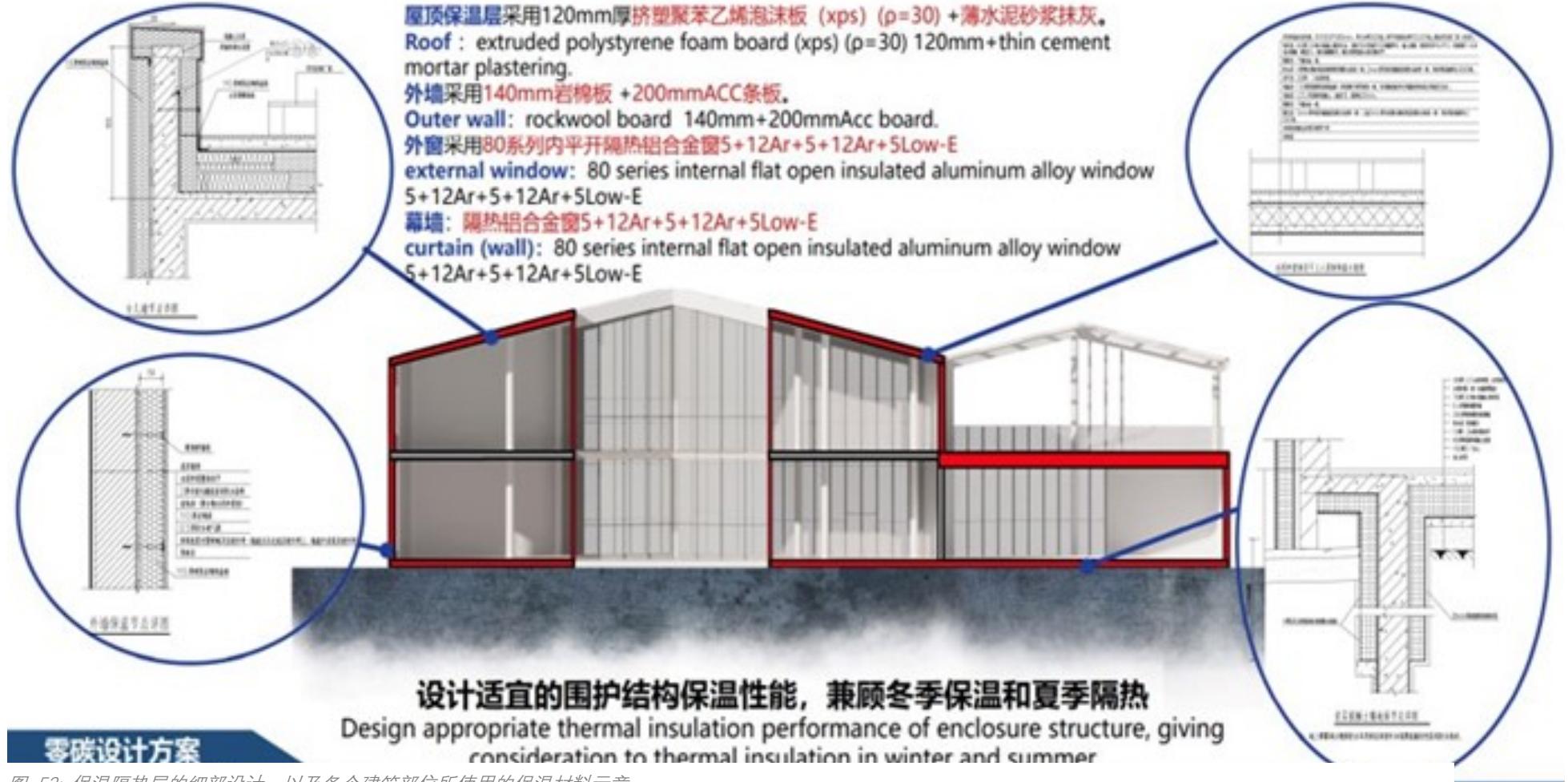
图 51: 陕西项目的开放式平面图, 便于日后根据需要改变功能 @陕西示范工程团队

具有环保意识的建筑保温隔热设计

选择岩棉作为该建筑的保温材料, 与聚苯乙烯泡沫板 (EPS 或 XPS) 相比更加低碳环保, 有助于增强建筑的可持续性。如果可以采用更加低碳的保温材料, 例如稻草秸秆作为保温层, 将进一步提高其可持续性。

建筑围护结构选用屋顶传热系数 $K=0.25W / (m^2K)$, 外墙传热系数 $K=0.3W / (m^2K)$, 外窗 (包括透光幕墙) 传热系数 $K=1.5W / (m^2K)$ 的构造。

Building envelope selection of roof heat transfer coefficient $K=0.25W/(m^2K)$, external wall heat transfer coefficient $K=0.3W/(m^2K)$, external window (including transparent curtain wall) heat transfer coefficient $K=1.5W/(m^2K)$ structure.



零碳设计方案

图 52: 保温隔热层的细部设计, 以及各个建筑部位所使用的保温材料示意

6.2.3 改进建议

主体结构的材料选择

实现建筑项目可持续性和循环经济的关键点在于建筑材料的选择，例如钢铁的生产过程往往伴随大量的 CO₂ 排放，对该项目而言，材料的选择有两种可能的路线：一是保留目前设计的钢结构和混凝土楼板，二是变更为碳排放更低的木结构。

木结构

目前建筑的结构跨度约为 6.2 米，这样的跨度完全可以采用木结构实现。与钢铁材料和混凝土材料相比，木材的碳排放显然更低更环保，让该项目更符合可持续性方面的要求。

实木楼板

另一种降碳方法是改用「交叉层压木制楼板」，简称为 CLT (Cross-Laminated Timber)，是一种由多层木板复合组成的多功能建材，通常为三到九层木板，并顺着木纹纵向方向交叉叠合，可用作屋顶和楼板。板层之间通常通过胶合方式（约 1% 的胶水含量）相互连接，其连接技术领域也有新的研发突破，例如采用硬木进行榫接和钉接。为了保证水平方向的力传递，CLT 墙体和 CLT 楼板之间通常使用交叉连接的螺钉连接或螺纹杆连接。近年来，这些螺钉越来越多地被由榉木或桦木制成的高强度连接件所替代，这样的连接方式让人联想到传统木匠工艺中的燕尾榫，将板件牢固、安全地连接起来。

随着时间的推移，作为连接元素的榫钉得到了更广泛的应用。用榉木制成的棒状榫钉被加热至 6% 的含水量，并插进预先钻孔的软木制成的木条中，榫钉会吸收空气中的水分，最终达到 12% 的平衡湿度，这一过程中榫钉将显著膨胀，并与木条极为牢固地结合成为一体。在另一种工艺中，用气枪将榉木和橡木制成的硬木钉打入木条，高压力导致高温度，使得木钉和木条像焊接一样牢固地结合为一体。

交叉层压木板 CLT 可以在水平和垂直两个方向上传递荷载，而传统的木楼板只能在一个方向上传递。部分厂家利用这一特性，通过省略某些木板层或者插入木梁层来创建空腔，空腔内可用于安装设备和管线，也可填充相应的材料提高楼板的受力效率，或者提高其建筑物理方面的性能。此外，交叉层压木板所采用的木材由于其天然结构含有大量气孔，提供了更强的保温性能。交错层压木板的结构本身的致密性也赋予其较高的防火性能，即使未经处理也能满足相应的防火要求（传统木结构往往需要通过加设额外防火层或采用特殊封装才能满足）。在火灾发生时，外层木材能有效防止火焰的蔓延至内部，保护内层板材即使在非常严重的火灾中也能维持长达数小时的结构完整性。与其他木制楼板结构相比，CLT 坚固密实的构造还提升了隔音效果。

虽然锯木加工过程的机械切割和烘干需要大量能源，然而木制销钉和榫钉的最新研发和运用使其摆脱了对胶水粘结剂的依赖。未经化学处理的木材、不含胶水和高质量的木材为室内空间创造出舒适且生物友好的室内气候。木材应来自当地的软木植物，也属于可再生资源。

在到达材料使用寿命后，可对交叉层压木进行材料回收或者焚烧处理，可以被切割成更小的板材，作为次级结构重新利用。其他的处理方式还包括直接重新利用（通过非破坏性拆解）、焚烧（选择适当的焚烧系统）以及进一步加工成其他形式的木基材料。

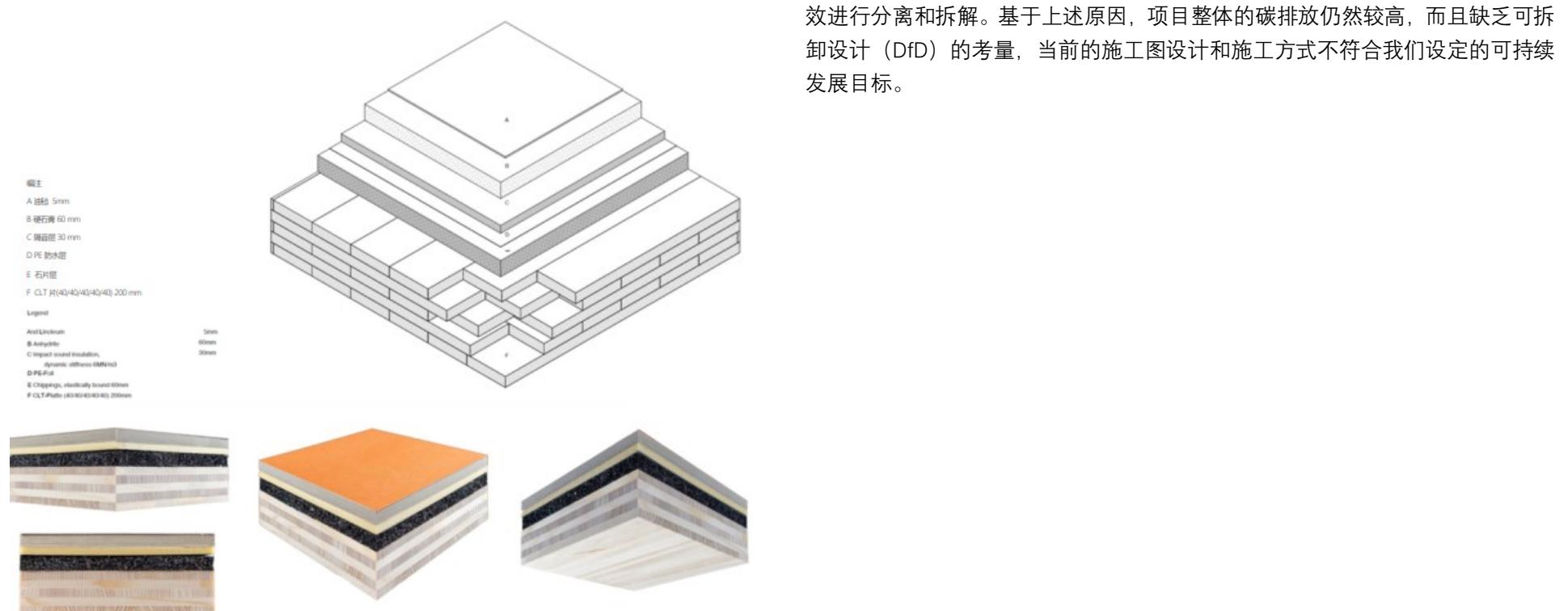


图 53: CLT 交叉层压木材建筑系统 ©ZHAW

保留现有的钢结构和混凝土板系统

如果选择保留当前设计的钢结构和混凝土板系统，则需要解决一些问题，以改善其可持续性。例如目前的钢结构表面需要喷涂防火涂料满足相应的耐火等级，然而这种涂料并不环保。此外，根据建筑施工图中的细部构造详图所示，连接构件并未考虑其可拆卸性，因此在建筑物生命周期结束后，混凝土楼板与钢梁无法有

效进行分离和拆解。基于上述原因，项目整体的碳排放仍然较高，而且缺乏可拆卸设计（DfD）的考量，当前的施工图设计和施工方式不符合我们设定的可持续发展目标。

Conventional Construction Approach

Challenges

- Not easy to disassemble
 - Requires fire resistance coating --> not environmentally friendly
 - Requires cold formed steel deck --> its production process has high CO₂ emission--> not environmentally friendly

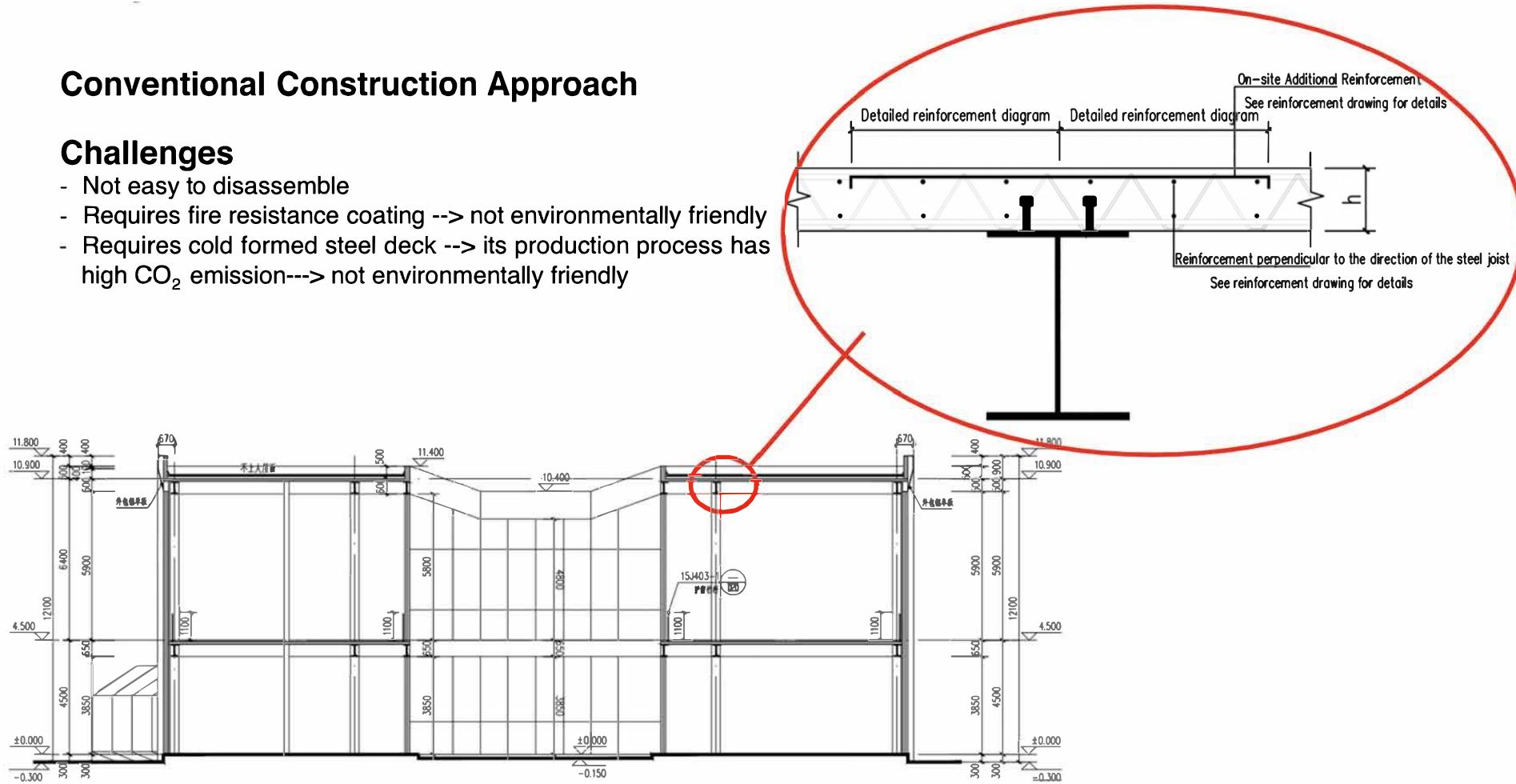
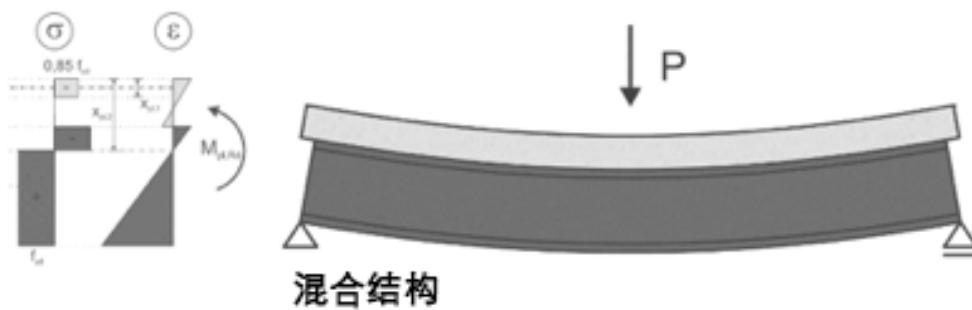
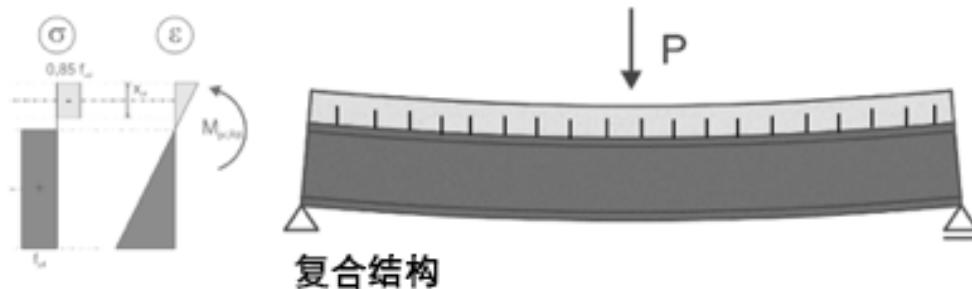


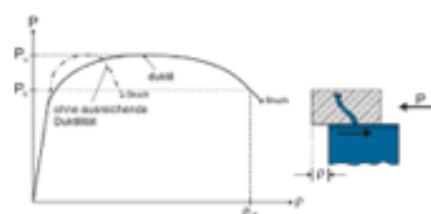
图 54: 当前施工图阶段设计的混凝土楼板与钢梁之间的连接构造详图。©DEMO PROJECT SHAANXI

混凝土楼板与钢梁的连接方法

为了确保符合可拆卸设计（DfD）原则，混凝土楼板和钢梁的连接必须采用可拆卸的抗剪力连接件。一般来说，如果钢材和混凝土这两种独立的材料没有有效的连接在一起，那么这两种材料同时受拉和受压。但是，如果将它们以正确的方式连接起来，可以形成互补：抗拉强度更大的钢梁仅承受拉力，抗压强度更大的混凝土仅承受压力，整体结构受力更加高效，可减小结构构件的截面尺寸，节省用料，提高建筑的功能性和可持续性。



剪力连接器的变形能力和延展性



复合结构

- 不同的建筑材料被组合在一起
- 使用复合材料以抗剪方式连接建筑材料
- 复合接头是形合和力合的
- 不同建筑材料之间存在力交换
- 连接点承受荷载

混合结构

- 不同的建筑材料被组合在一起
- 无剪力连接器
- 复合接头是形合的
- 不同建筑材料之间不存在力交换
- 独立承受荷载

复合行为

图 55: 复合结构 (Composite Structure) 和混合结构 (Hybrid Structure) 之间的区别 ©ZHAW

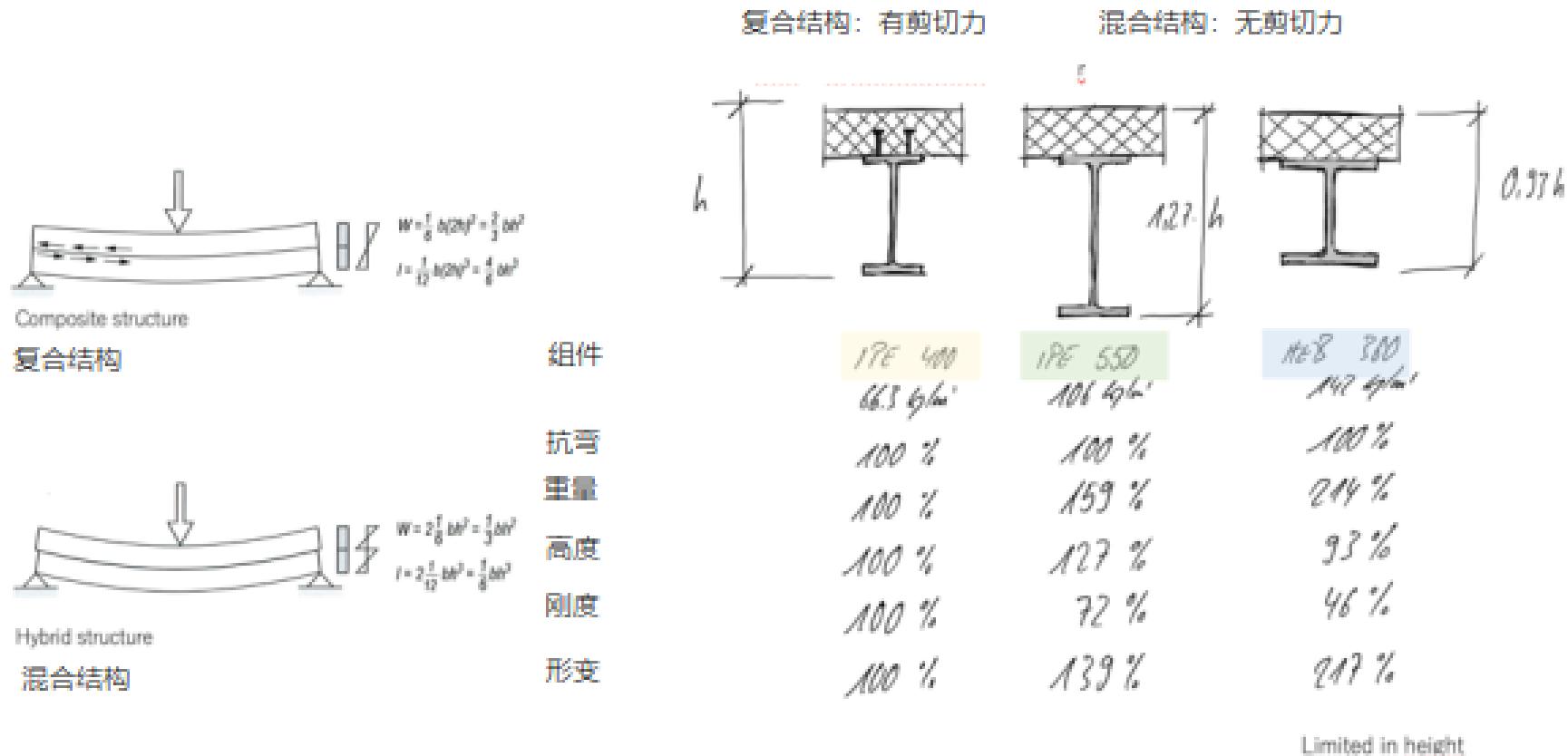


图 56: 复合结构 (Composite Structure) 和混合结构 (Hybrid Structure) 不同的结构变形方式 ©ZHAW

因此，为了有效地传递荷载，同时满足可拆卸设计（DfD）原则，我们对混凝土楼板和钢梁构件之间的可拆卸连接设计进行了研究和设计，建议采用通孔螺栓进行连接，如下图所示。

可拆卸的抗剪结构

预制混凝土板

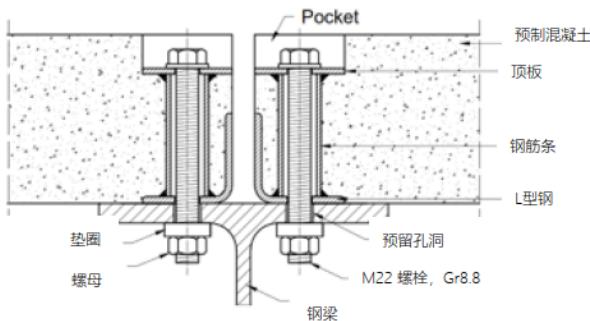


图3.1 剪切连接装置细节图

现浇混凝土板

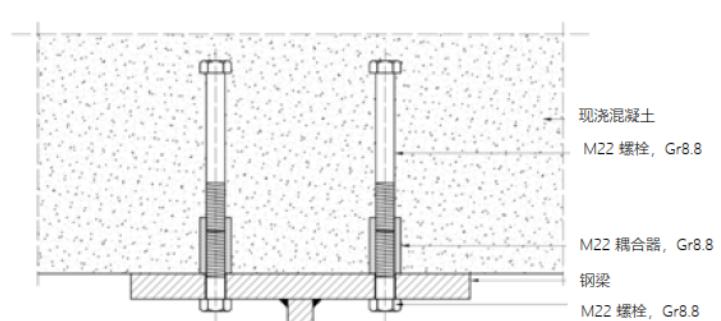


图3.3 剪切连接装置细节图

图 57: 可拆卸的抗剪连接件 ©YANG ET AL.

Table 2.1 可拆卸剪力连接概览

剪力连接 图示	优势	劣势
包壳螺栓	<ul style="list-style-type: none"> 与传统方法相似 高强度 可使用预紧力 	<ul style="list-style-type: none"> 刚度低于焊接螺柱 拆卸时螺栓末端突出板面 螺栓不可更换 楼板的再利用有问题 预制工艺复杂
螺纹螺栓	<ul style="list-style-type: none"> 与传统方法相似 相对来说费用低 	<ul style="list-style-type: none"> 刚度低于焊接螺柱 拆卸时螺栓末端突出板面 螺栓不可更换 楼板再利用有问题 预制工艺复杂
通孔螺栓	<ul style="list-style-type: none"> 可更换 相对来说高强度 拆卸时没有突出部分 可从顶部进入 	<ul style="list-style-type: none"> 刚度低于焊接螺柱 蠕变和收缩导致的预紧力损失 需要额外注意误差
锚栓	<ul style="list-style-type: none"> 没有误差问题 可用于预制混凝土和现浇混凝土 	<ul style="list-style-type: none"> 预制构件必须在混凝土中钻孔 刚度低于焊接螺柱 强度相对较低

卢森堡大学

可拆卸组合梁：具有多线性荷载-滑移行为的剪力连接的分析计算方法

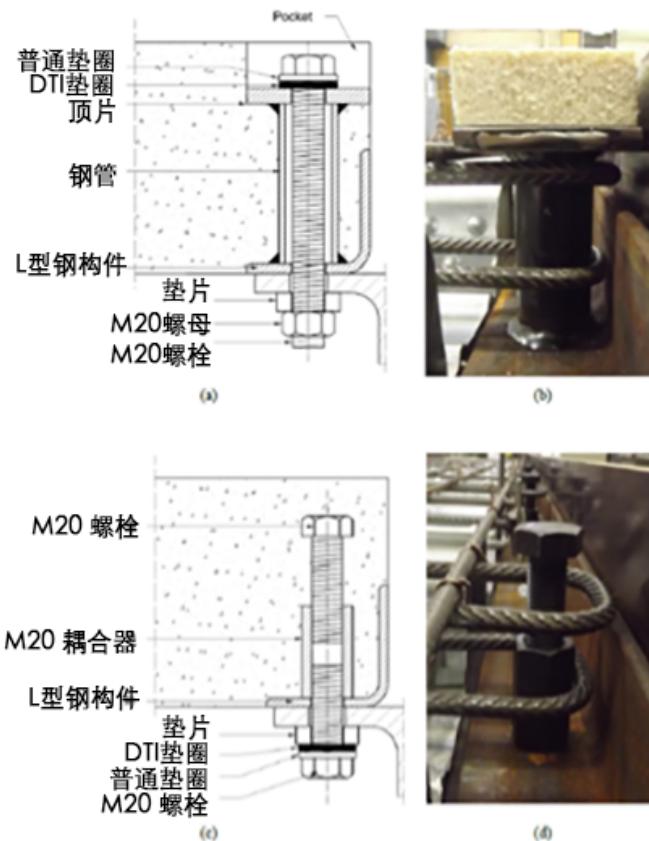


图3.8 梁测试中应用的剪力连接器系统

减少资源消耗
优化构造
可拆卸和再利用的设计

下文将详细介绍我们建议的可拆卸连接方式：

贯通式螺栓（用于预制混凝土楼板）

贯通式螺栓作为抗剪力连接件，是在浇注混凝土前，先将高强度结构螺栓插入钢梁腹板上预先钻好的孔中。以下图为例，贯通式螺栓作为抗剪力连接件，分组排列成数排螺栓进行固定，可用于钢梁-预制混凝土复合结构。通过贯通式螺栓作为抗剪连接件，提供了一种可持续且可拆卸的解决方案，通过促进建筑材料再利用、减少建筑废料，并提高了结构构件的长期适应性和灵活性，从而促进循环经济。

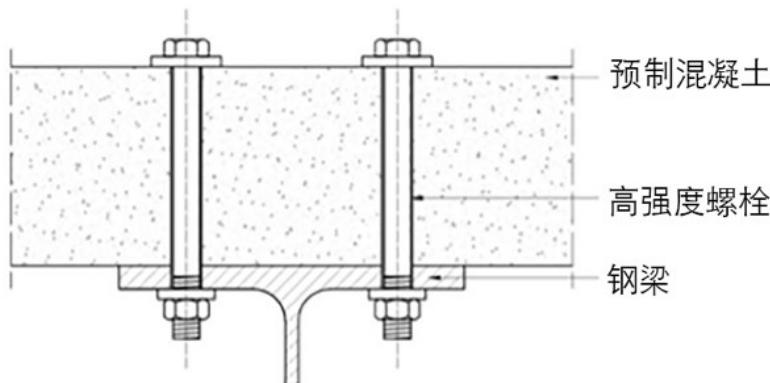


图 59: 贯通式螺栓：钢梁和预制混凝土构件的可拆卸连接。图片来源：KOZMA, A. (2020). DEMOUNTABLE COMPOSITE BEAMS: ANALYTICAL CALCULATION APPROACHES FOR SHEAR CONNECTIONS WITH MULTILINEAR LOAD-SLIP BEHAVIOUR (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITY OF LUXEMBOURG, LUXEMBOURG). ©KOZMA

预制混凝土楼板

此外，目前该项目施工图所示的型钢和混凝土楼板施工设计中，现浇的混凝土楼板需要使用冷弯型钢板作为混凝土浇筑的模板，然而这些冷弯型钢板的生产过程中会释放出大量二氧化碳。因此，如果选择螺栓连接的可拆卸施工方法，混凝土楼板也选择可在工厂预制，并在现场组装，这样来就可以避免使用冷弯型钢板。值得注意的是，在施工结束后，现浇楼板和预制楼板的材料自身全生命周期碳排放量几乎是相同的，这当中都包括了两种不同的生产方式导致的碳排放。为了提高可持续性，无论是通过重复使用的冷弯型钢板，还是通过采用预制楼板，设计的重点都是通过减少冷弯型钢板的用量来降低建筑物的全生命周期碳排放，减少建材生产过程的环境影响，因此每种方法都有其独特的优势。

下图比较了传统使用冷弯型钢板作为模板进行现浇的混凝土楼板，和不需要使用冷弯薄壁型钢板的预制混凝土楼板，两者的二氧化碳排放量对比。与使用冷弯薄壁型钢的传统方法相比，这种方法可减少约 300 千克的二氧化碳排放量。

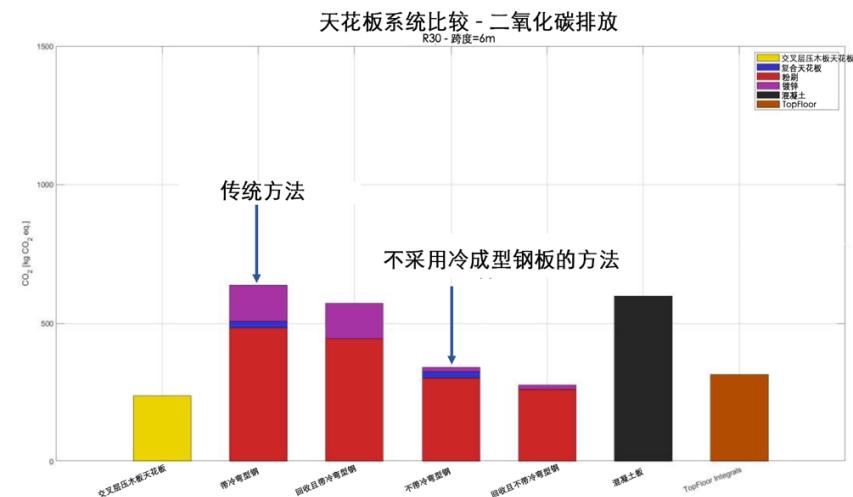


图 60: 不同施工方法产生的二氧化碳排放量对比（单位：千克）©ZHAW

型钢填充环保混凝土

如前所述，在传统施工工艺中，型钢需要涂上防火涂料（如下图所示），然而这些涂料往往并不环保，因此不适合用于零碳示范项目。

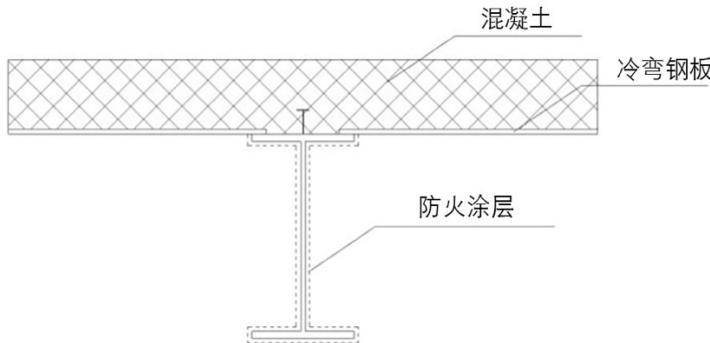


图 61: 混凝土楼板和钢梁处常见的施工详图，采用冷弯钢板作为混凝土浇筑模板，同时需要在钢梁上喷涂防火层。 ©ZHAW

为了避免出现这种情况，建议改用环保混凝土 Cleancrete® 填充钢梁所组成的混合结构系统 (Hybrid System)。如下图所示，该系统由两个 C 型钢和环保混凝土 "Cleancrete®" 组成，后者是一种不含水泥的混凝土，主要由粘土土壤或挖掘土壤、水和天然添加剂 Oxacrete® 组成。在不需要承受高抗压强度的情况下，"Cleancrete®" 作为水泥混凝土的替代品，可以节约资源并提高可持续性。水泥的制备是混凝土生产过程中碳排放最高的部分，而天然添加剂 Oxacrete® 完全不含水泥。因此，通过减少混凝土的水泥用量，其碳排放量将大大低于传统混凝土材料。该产品还通过将低品质的挖掘土壤材料进行升级利用 up-cycle，进一步提高其可持续性。与传统混凝土相比，Cleancrete® 的二氧化碳排放量减少了 90%，这正是因为它采用夯土代替水泥，大大减少了水泥用量。此外，该系统细部构造设计中的外露式连接确保了维护和拆卸的方便性。

根据该方法设计的 2 个 C 型钢仅在连接处需要喷涂防火涂料，因此防火涂料的总体用量明显低于传统做法。

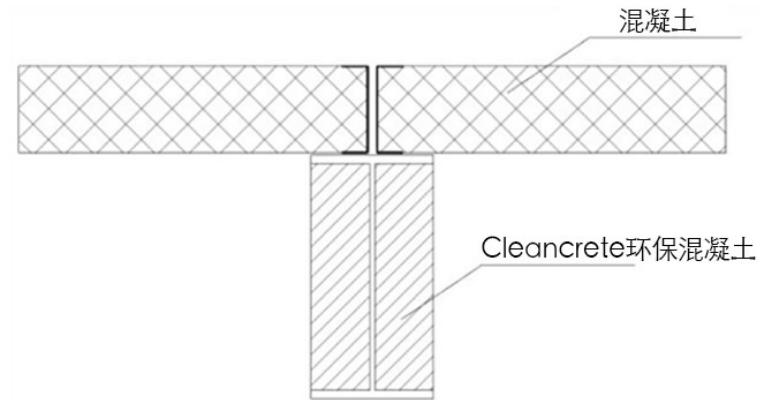


图 62: 建议改进后的混凝土楼板和钢梁混合结构系统，采用可拆卸连接件和 Cleancrete® 替代防火涂层。 ©ZHAW

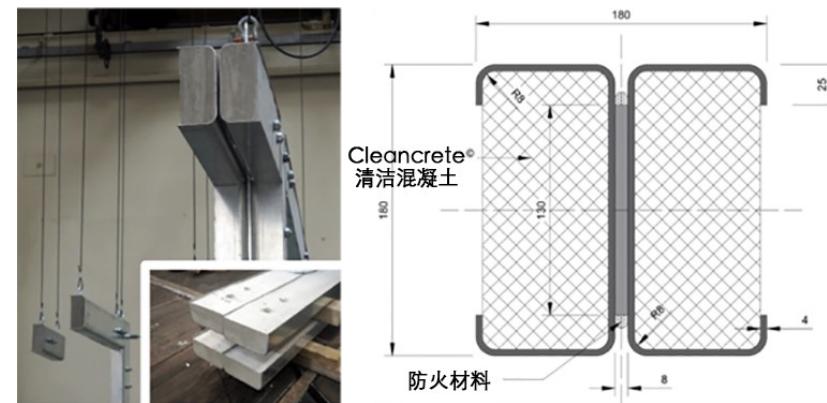


图 63: 型钢填充环保混凝土混合结构系统的细部设计：既可提供所需的防火性能，又可在建筑使用年限结束后进行拆卸。 ©ZHAW

采用环保秸秆作为木制外墙的保温材料

根据瑞士团队与陕西项目团队的会谈，示范项目设计团队对使用环保秸秆作为外墙保温材料和可重复使用的木制外墙表示出浓厚兴趣，这一构造做法与 K.118 项目类似（如下图所示）。



图 68：K.118 项目中可重复循环利用的木制外墙系统，以及采用环保秸秆作为保温层。
@IN SITU

下面是我们针对陕西蜜蜂博物馆提出的外墙设计方案，利用秸秆代替岩棉作为外墙保温材料。

- 160mm 岩棉的导热系数： 0.037 W/mK
- 360mm 压缩秸秆包的导热系数： 0.043 W/mK

360mm 厚秸秆保温的保温性能略逊于 160mm 厚岩棉保温，同时需要综合考虑外立面的细部设计，以确定 360mm 秸秆保温方案（相比较于 160mm 厚岩棉保温方案）是否可行。通过相应的设计和施工调整，有可能将蜜蜂博物馆的外墙 ACC 板材中作为保温材料的岩棉替换为压缩秸秆。

需要注意的是，木制外墙的最外侧一层必须采用防火石膏纤维板，或者符合中国防火标准规范的板材，以保护和密封秸秆保温层。这层石膏板除了防火以外，还需要作为外墙通风层的支撑结构，在石膏板上安装金属龙骨或木龙骨，留出通风空间，最后安装各种外立面饰面层（如木板、钢板、铝板、纤维水泥板、玻璃等）。

正如 K.118 项目一样，从可持续发展和隐含能耗的角度来看，采用木制外墙和秸秆保温的外立面构造设计更加合理。

以上设计建议基于瑞士标准和规范，必须根据中国标准和规范进一步验证其合理性和合规性。

下面列出了瑞士建筑规范对于秸秆作为保温材料的招标具体要求：

- 谷物：斯佩耳特小麦、黑麦、普通小麦、三粒小麦、大麦，不含燕麦
- 颜色和气味：（金色）黄色、新鲜、无霉味
- 打谷脱粒：时间越长越好，损坏的秸秆越少越好
- 抖动筛选时：不对稻草进行切割或切碎
- 几何形状：边缘平直，表面均匀，表面互成直角。应尽可能呈立方体
- 草捆密度：约 100kg/m³；不应该能够将手伸入秸秆捆中，或者只能勉强伸入。
- 综合容重：100 ± 15 kg/m³
- 规格：最大约 50cm/80cm，大部分约 36cm/50cm

此外：

- 尽量减少秸秆包末端的绳索，避免深入秸秆内部
- 茎秆方向主要垂直于约束部位
- 虫害率尽可能低
- 无真菌侵染（灰色稻草/秸秆）

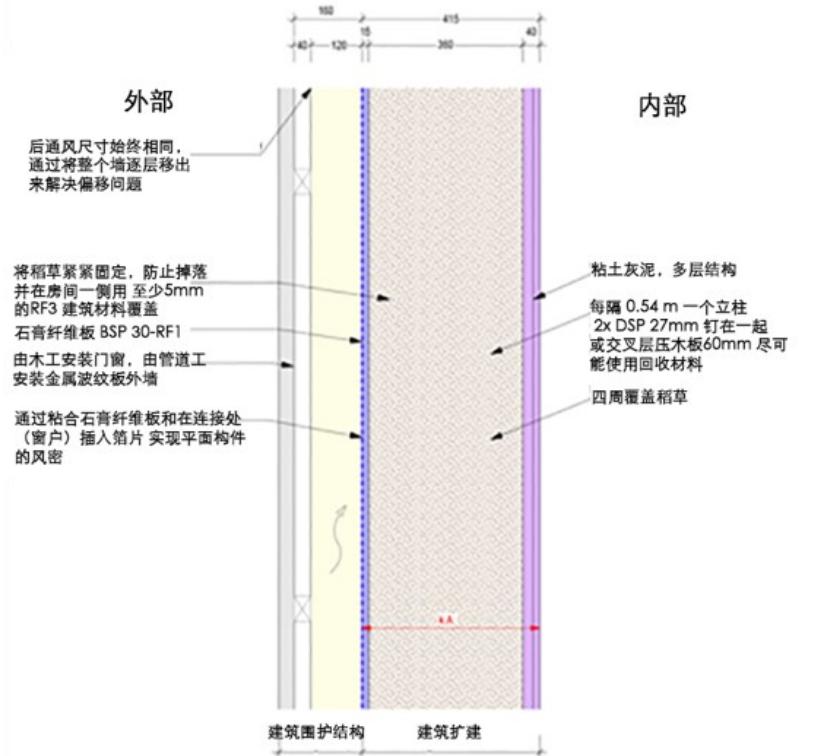


图 64: 温特图尔 K.118 项目外立面细部设计剖面图 © IN SITU

外墙-楼板-梁的连接处细部设计

针对木制外墙 - 混凝土楼板 - 钢梁连接处的细部设计, Graser Troxler Architekten 根据循环建造原则设计的 Herbstweg 住宅项目提供了一个优雅的可拆卸解决方案, 如下图所示。



图 65: HERBSTWEG 住宅项目, 钢结构, 木制外墙, 可拆卸连接。@GRASER TROXLER



图 66: HERBSTWEG 住宅项目的外立面细部设计, 钢结构与采用可拆卸连接件的木制外立面 @ZHAW

6.2.4 设计建议

根据业主当前的零碳建造诉求，为了简化混凝土楼板-钢梁-木制外墙的连接，综合上述参考案例，建议采取一种创新的构造设计方案，以实现可拆卸设计、循环建造和可持续性。

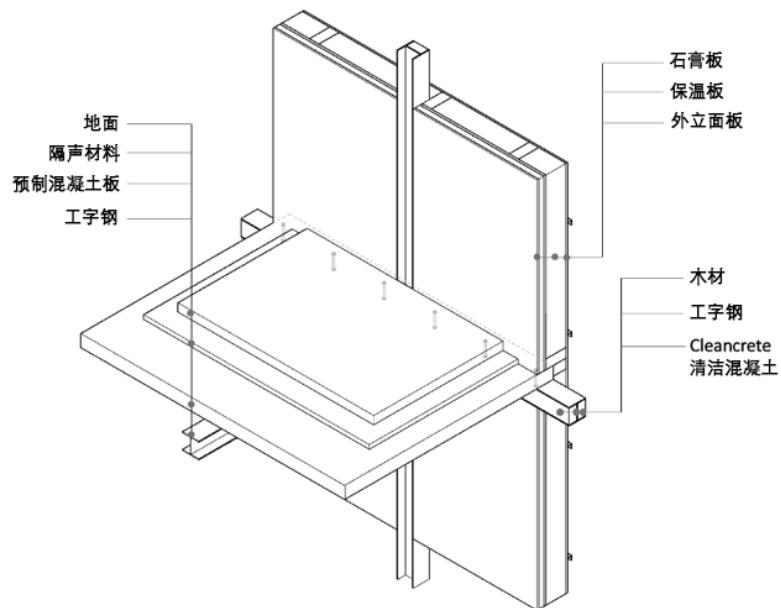


图 67: 建议的设计方案轴测图。©ZHAW

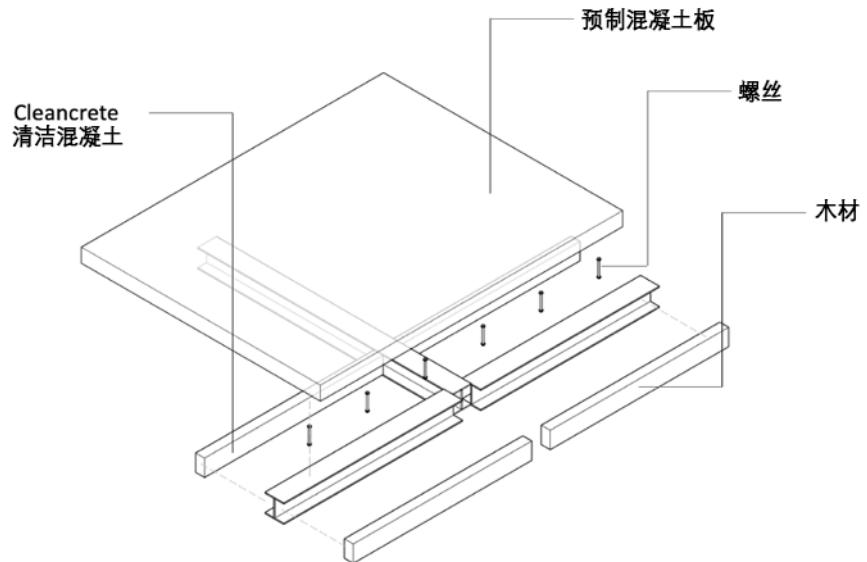


图 68: 建议采用可拆卸的「混凝土楼板-钢梁」连接构件施工做法轴测图。©ZHAW

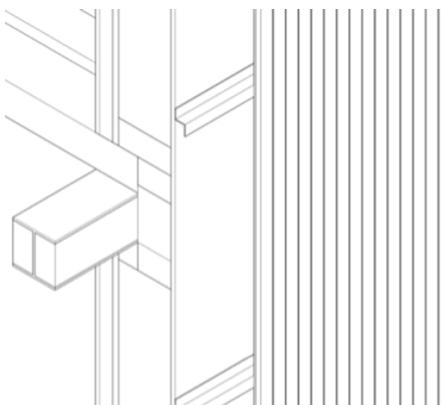


图 69: 建议采用的「混凝土楼板-木制外墙-钢梁」的连接处的细部详图。©ZHAW

利用回收钢材打造开放式露台屋面

开放式露台屋面可采用回收重复使用的钢材建造，从而进一步展示建材循环利用的可持续性。回收重复利用钢构件不仅可以延长这些材料的生命周期，还可以减少钢铁生产过程中的碳排放。

考虑回收再生材料的尺寸

将回收再生材料纳入建筑设计是推动可持续发展的关键步骤，在建筑设计阶段，需要准确掌握这些材料的尺寸信息，并进行精心设计。

优化混凝土楼板几何结构设计

如果项目最终仍考虑采用混凝土楼板，我们建议按照苏黎世联邦理工大学 ETH Zurich 建筑结构教席“Block Research Group”的原则优化几何结构设计。这种方法侧重于利用几何选型的方法提高结构效率，最大限度地减少混凝土材料的用量，从而减少混凝土带来的负面影响。

附录

A1. 术语释义

在当前学术讨论中，“循环建造”方面的术语起源于垃圾废物管理，并在不同的语言区和文化背景中，某些专业术语已经被确定用于指代循环建造的相关策略。然而，这些专业术语的定义和使用方法并不统一。以下是部分专业术语的具体释义：

- 1979 年，Ad Lansink 在荷兰议会上提出了旨在减少垃圾废物的废物处理措施等级制度（也称为“Lansink 梯级”），引起了国际社会的广泛关注：减量（Reduce）、再利用（Reuse）、再循环（Recycle）、带能源回收的焚烧（Incinerate with energy recovery）、焚烧（Incinerate）、填埋（Landfill）。
- 从那时起，垃圾废物分级制度一直不断完善，并根据新的技术可能性进行调整。例如，2000 年荷兰代尔夫特理工大学为建筑行业制定了不同的垃圾废物等级制度，即“代尔夫特梯级”：维护（Prevention）、物件翻新（Object renovation）、构件再利用（Element reuse）、材料再利用（Material reuse）、转化利用（Useful application 例如废旧玻璃瓶融化制造新的玻璃容器）、带转化利用的固化处理（Immobilisation with useful application 例如固化污染土壤的重金属并添加有机物质使其可以重新培育植物）、固化处理（Immobilisation 例如有机废弃物与水泥混合固化为墙体复合材料）、带能源回收的焚烧（Incineration with energy recovery）、焚烧（Incineration）、填埋（Landfill）。

参见 C. F. Hendriks, Nationaal congres Bouw- en Sloopafval, kwaliteit in de keten (Rotterdam: Nederlands studiecentrum, 2000); B. J. H. te Dorsthorst, T. Kowalczyk, C. F. Hendriks, and J. Kristinsson, ‘From Grave to Cradle: Reincarnation of Building Materials’, in Proceedings of International Conference on Sustainable Building 2000 (Maastricht, 2000).

- 在英语文献中，术语“reuse”或“re-use”一词在建筑领域被用于指代建

筑构件的再利用，与构件再利用前后的实际功能无关。“再利用”（reuse）有别于“再循环”（recycling），后者仅指代建筑材料的回收循环利用。

参见 Bill Addis, Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling (New York: Routledge, 2006); Duncan Baker-Brown, The Re-use Atlas: A Designer's Guide towards a Circular Economy (London: RIBA Publishing, 2017).

- 在法语文献中，recyclage（回收）一词与英文 recycling（再循环）类似，指的是建筑材料的再循环利用，往往会丢失材料原有的物质形式。另一方面，réutilisation（保留形式用于相同功能的再利用）和 réemploi（保留形式用于其他功能的再利用）也有区别。术语 récupération 一词则被用作废弃建筑材料再利用的总称。

参见 Jean-Marc Huygen, La poubelle et l'architecte: Vers le réemploi des matériaux (Arles: Actes Sud, 2008); Julien Choppin and Nicola Delon (eds.), Matière grise: Matériaux/réemploi/architecture (Paris: Edition du Pavillon de l'Arsenal, 2014); Michaël Ghyoot, Lionel Devlieger, Lionel Billiet, and André Warnier, Déconstruction et réemploi: Comment faire circuler les éléments de construction (Lausanne: EPFL Press, 2018).

- 在两本最新的德语出版物中，术语“recycling”以其原始含义被使用，意为针对建筑材料和构件进行材料的循环再利用。如果丧失了原有形式，便用 Verwertung（综合利用）一词，并区分为 Wiederverwertung（再利用，即用于同一个建造流程的回收利用，例如旧建筑的瓦片回收用于同一建筑公司的其他项目）和 Weiterverwertung（进一步利用，通常是指降级再利用，例如旧建筑的钢构件回收制作成为建筑装置艺术品）。同样，如果没有丧失原有形式，则用 Wiederverwendung（重复使用）一词指代同等目的的重复使用，而 Weiterverwendung（进一步使用）表示为另一个次等目的的再利用。同时，“向上循环”（upcycling）和“向下循环”（downcycling）也被用来描述材料回收

加工前后的质量梯度变化状况。另一方面，目前还没有一个中性的、不带褒贬倾向的总括术语用于描述指代保留原有形式的建筑构件再利用。

参见 Annette Hillebrandt, Petra Riegler-Floors, Anja Rosen, and Johanna Seggewies, *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (Munich: Detail, 2018); Daniel Stockhammer (ed.), *Upcycling: Wieder- und Weiterverwendung als Gestaltungsprinzip in der Architektur* (Zurich: Triest, 2020).

- 2012 年第 13 届威尼斯国际建筑双年展德国馆策展人 Muck Petzet 从垃圾废物管理行业借用了相关术语：“减量、再利用、回收” (Reduce Reuse Recycle)，并将其与建筑设计和城市规划战略联系起来。因此，这些流行词汇获得了相当大的关注，但其含义也发生了变化。在此，减量 (Reduce) 被用于描述适度节制的「适足策略」(避免过度消费，提倡集约)；再利用 (Reuse) 包括对既有建筑进行各种形式的改建和加建；而回收 (Recycling) 则指代在异地重新利用建筑材料和建筑构件的总称。

参见 Muck Petzet and Florian Heilmeyer (eds.), *Reduce, Reuse, Recycle: Architecture as Resource; German Pavilion, 13th International Architecture Exhibition, La Biennale di Venezia 2012* (Ostfildern: Hatje Cantz, 2012).

- 除了以物质材料为中心的生态经济评估和循环过程进行命名之外，建筑材料和建筑构件的再利用也一直是艺术史和建筑史的研究重点。在德语区的学术讨论中，“spolia”（拉丁语 “spoils”，意为重新利用的建筑碎片）一词备受关注，因为该词与建筑构件的起源和意义密切相关。在学术讨论中，根据建筑材料构件的起源和用途的不同，对 spolia 进行了各种区分。术语“Wiederverwendung”（重复使用）一词被用作建筑材料再利用的中性总括术语，这也拉近了建筑史讨论与当下建筑议题之间的距离。

参见 Stefan Altekamp, Carmen Marcks-Jacobs, and Peter Seiler (eds.), *Perspektiven der Spolienforschung 1. Spolierung und Transposition*, Berlin: De Gruyter, 2013; Hans-Rudolf Meier, *Spolien: Phänomene der Wiederverwendung in der Architektur* (Berlin: Jovis, 2020).

ZHAW 的循环建造研究采纳了上述观点，并以类似于英语术语“Reuse (或 Re-use)”的方式使用德语术语“Wiederverwendung”一词：作为拆卸构件进行再利用的总称，与构件用途、质量标准或其引申含义的变化无关。这为建筑构件的再利用确立了一个总体称谓，而无需进行先验判断，因为这种判断需要对建筑经济、环境影响、建筑设计、文化意义等进行区分，而正如 K118 案例研究表明的那样，这种区分方法在实践中几乎是不可能的，因为建筑构件通常具有多功能属性。

A2. 参考文献

- C. F. Hendriks, Nationaal congres Bouw- en Sloophafval, kwaliteit in de keten (Rotterdam: Nederlands studiecentrum, 2000)
- B. J. H. te Dorsthorst, T. Kowalczyk, C. F. Hendriks, and J. Kristinsson, 'From Grave to Cradle: Reincarnation of Building Materials', in Proceedings of International Conference on Sustainable Building 2000 (Maastricht, 2000).
- Bill Addis, Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling (New York: Routledge, 2006)
- Duncan Baker-Brown, The Re-use Atlas: A Designer's Guide towards a Circular Economy (London: RIBA Publishing, 2017)
- Jean-Marc Huygen, La poubelle et l'architecte: Vers le réemploi des matériaux (Arles: Actes Sud, 2008)
- Julien Choppin and Nicola Delon (eds.), Matière grise: Matériaux / réemploi / architecture (Paris: Edition du Pavillon de l'Arsenal, 2014)
- Michaël Ghyoot, Lionel Devlieger, Lionel Billiet, and André Warnier, Déconstruction et réemploi: Comment faire circuler les éléments de construction (Lausanne: EPFL Press, 2018)
- Annette Hillebrandt, Petra Riegler-Floors, Anja Rosen, and Johanna Seggewies, Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource (Munich: Detail, 2018)
- Daniel Stockhammer (ed.), Upcycling: Wieder- und Weiterverwendung als Gestaltungsprinzip in der Architektur (Zurich: Triest, 2020).
- Muck Petzet and Florian Heilmeyer (eds.), Reduce, Reuse, Recycle: Architecture as Resource; German Pavilion, 13th International Architecture Exhibition, La Biennale di Venezia 2012 (Ostfildern: Hatje Cantz, 2012)
- Stefan Altekamp, Carmen Marcks-Jacobs, and Peter Seiler (eds.), Perspektiven der Spolienforschung 1. Spoliierung und Transposition, Berlin: De Gruyter, 2013
- Hans-Rudolf Meier, Spolien: Phänomene der Wiederverwendung in der Architektur (Berlin: Jovis, 2020)
- Guido Brandi, Baubüro in situ – K.118 – Kopfbau Halle 118, Winterthur, Switzerland; Architettura circolare / Circular architecture, Casabella 939, Novembre 2022, Mondadori, 2022
- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction-challenges and opportunities. Procedia engineering, 118, 1296-1304.
- Thormark, C. (2007, September). Motives for design for disassembly in building construction. In International congress sustainable construction, materials and practices challenge of the industry for the new millennium, Lisbon.
- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction-challenges and opportunities. Procedia engineering, 118, 1296-1304.
- Circular Construction, Re-Use and Design for Disassembly in the Swiss Furniture Industry and in teaching BA-Architecture Students at ZHAW
- <https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular-economy-in-the-furniture-industry.pdf>
- <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/what-is-the-linear-economy>
- https://www.pusch.ch/fileadmin/kundendaten/de/Unternehmen/Furniture_Industry_And_Circular_Economy_Policy_Paper_EFIC.pdf
- <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/european-furniture-industry-its-recovery-towards-innovative-green-and-circular-economy>
- [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/640158/EPRS_BRI\(2019\)640158_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/640158/EPRS_BRI(2019)640158_EN.pdf)
- <https://www.clubofrome.org/history/>
- <https://www.steelcase.com/eu-de/produkte/arbeitsstuhle/ara/>
- <https://c2ccertified.org/>
- <https://girsberger.com/de/loesungen/remanufacturing/>

- Case Study: Teaching principles of Circular Construction, Re-Use and Design for Disassembly to BA Architecture students by using furniture as a didactic object
- <https://www.zhaw.ch/de/archbau/institute/zbp/lehre/lehrprojekte-dtef/>
- <https://www.shapertools.com/>

可拆卸设计

- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction-challenges and opportunities. Procedia engineering, 118, 1296-1304.
- Thormark, C. (2007, September). Motives for design for disassembly in building construction. In International congress sustainable construction, materials and practices challenge of the industry for the new millennium, Lisbon.
- <https://www.bam.co.uk/media-centre/news-details/bam-opens-circular-building-at-london-design-festival>
- <https://www.frener-reifer.com/news-en/circular-building-installation-and-exhibition-in-london/>
- <https://emphase.ch/house-of-switzerland/>
- <https://www.spillmanechsle.ch/?p=2753&lang=de>
- Wieser, C. (Ed.). (2017). House of Switzerland: a dictionary of elements. Park Books.
- Analysis of the Shaanxi Project
- Kozma, A. (2020). Demountable Composite Beams: Analytical calculation
- approaches for shear connections with multilinear load-slip behaviour (Doctoral dissertation, University of Luxembourg, Luxembourg).

A3. 缩写词汇表

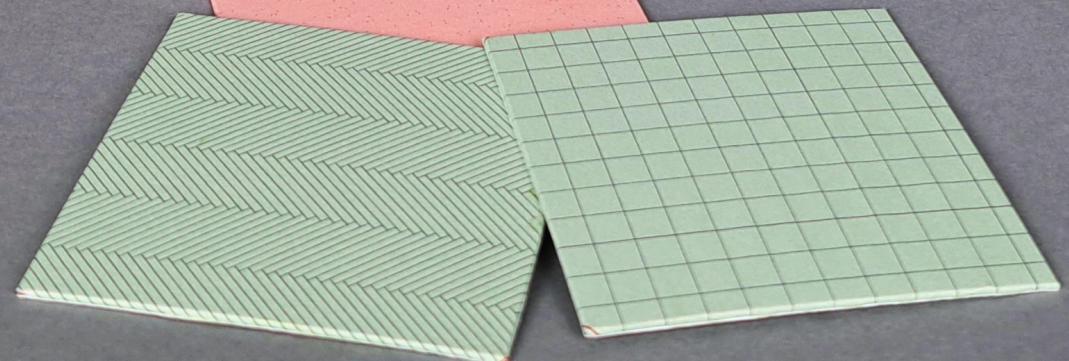
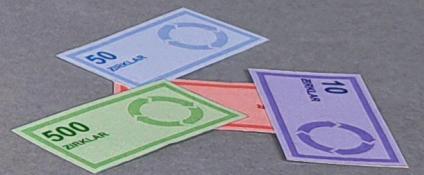
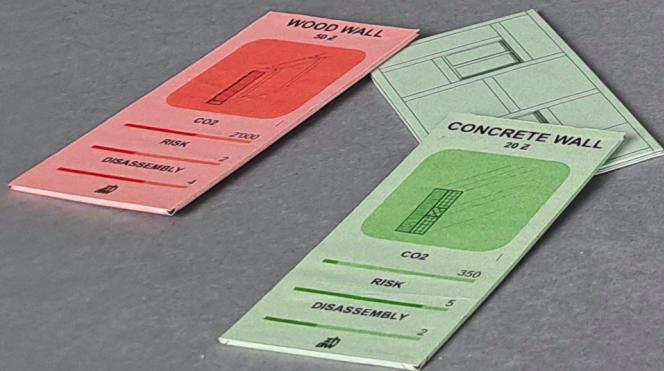
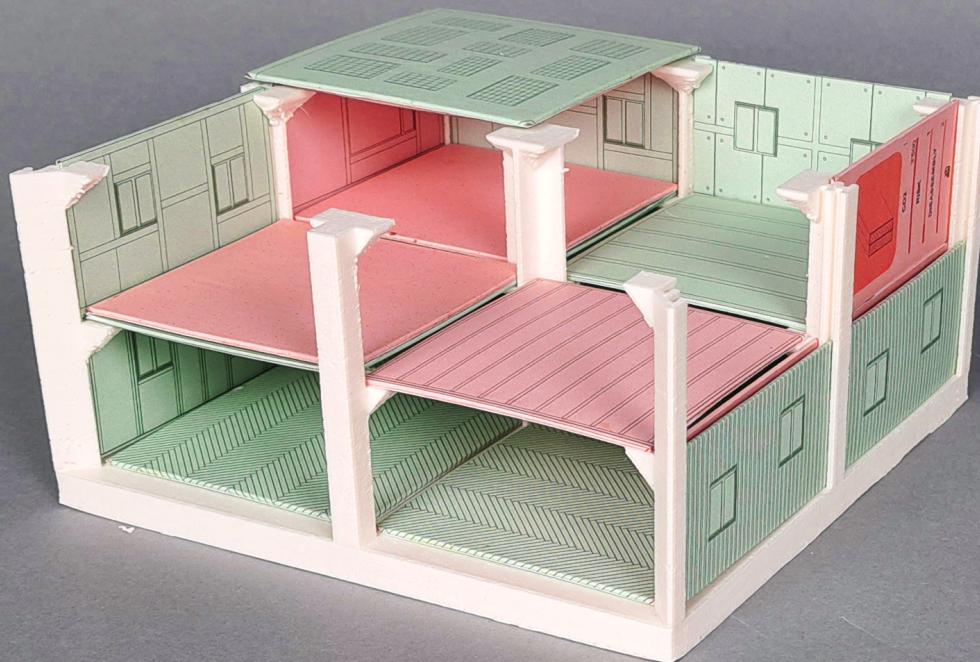
DP	示范项目
HVAC	暖通空调
SDC	瑞士发展与合作署
Mohurd	住房和城乡建设部
ZEB	零碳建筑
Intep	Integrale Planung GmbH
Skat	Skat Consulting Ltd.
CABR	中国建筑科学研究院
UAD	浙江大学建筑设计研究院
SUP	THAD SUP 工作室 (清华大学建筑设计研究院)
HSLU	卢塞恩应用科学与艺术大学
Low-Tech	Low-Tech Lab GmbH
FHNW	瑞士西北应用科学大学
ZHAW	苏黎世应用科学大学
Willers	Willers Jobst Engineering AG
DfD	可拆卸设计

A4. 再利用游戏导则

REUSE GAME

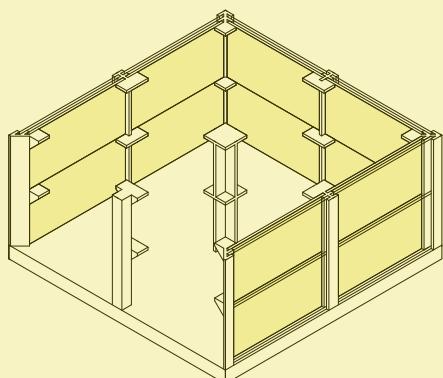
再利用游戏



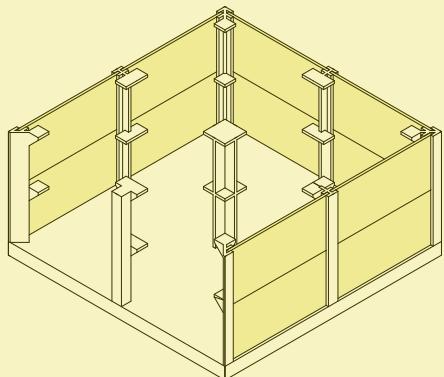


TO BUILD THE EXTENSION, YOU WILL NEED

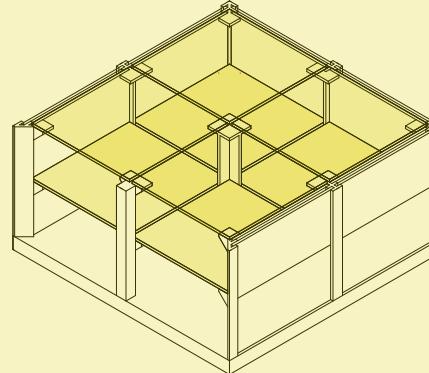
要建造这个扩展部分， 你需要



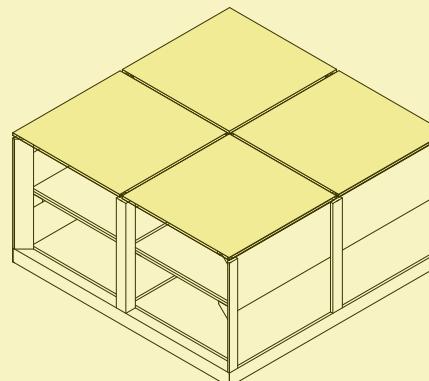
12 FACADE ELEMENTS
12个立面



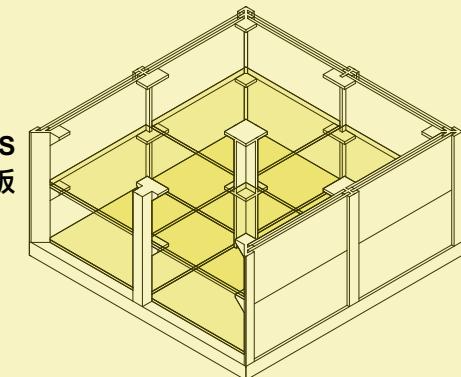
12 WALL STRUCTURE ELEMENTS
12个墙面结构



8 SLAB ELEMENTS
8个板块



4 ROOF ELEMENTS
4个屋顶

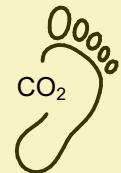


8 FLOORING ELEMENTS
8个地板

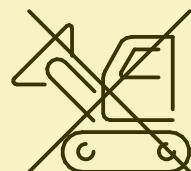
RULES 规则



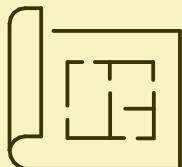
THE COMPONENTS CAN
BE NEW OR REUSED
部件可以是新的也可以再利用



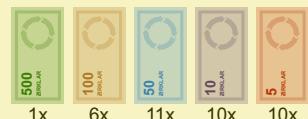
THE BUILDING MUST
BE LOW IN CO₂
建筑必须低碳



... BUT ALSO EASY
TO DISMANTLE
同时也要容易拆解



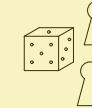
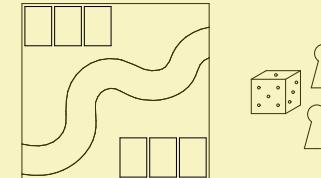
... AND BE AESTHETICALLY AND
STRUCTURALLY FEASIBLE
并在美学和结构上是可行的



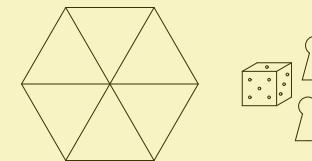
YOU HAVE A MAXIMUM
BUDGET OF 1600 Z
你最多有1600Z的预算

GAME SETTING 游戏设置

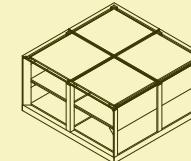
1: COMPONENT HUNTING 部件搜寻



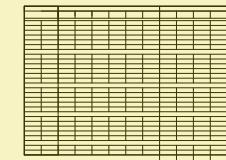
2: COMPONENT TESTING 部件测试



3: PROJECT DESIGN 工程设计



4: EVALUATION AND DISCUSSION 评估和讨论





MATERIAL:

1 game board
"Components hunting"

1 token per team and 1 dice

1600 Zirkulars per Team

The Bank of reused materials

材料:

1个游戏棋盘——“材料搜寻”游戏

每队1个棋子和1个骰子

每队1600个Zirkulars

再利用材料银行

1: THE HUNT

搜寻

1. Each team rolls the dice and the team with the highest total starts the game.
2. The first team places its token on the "START" square, rolls the die and moves its token forward as many squares as the die indicates.
3. On each square, the team receives a card referring to the category it has just landed on. The team can choose to buy all, some or none of the materials on offer.
4. The second team can then roll the die.
5. The first team to land on or pass through the "FINISH" square gets the bonus card and stops playing. The other team can continue until it is their turn to finish.

SEARCH

Finding materials is a challenging task for architects. They must engage with various sources, including contacting multiple dealers (such as businesses and companies specializing in used building components, including industries undergoing changes or demolitions).

Additionally, they often utilize intermediaries like online consulting platforms and companies that facilitate connections between buyers and property owners, such as Ricardo and Salza. Architects also conduct individual research efforts, which involve scouting demolition sites and establishing direct contact with property owners.

寻找

寻找建筑部件是建筑师面临的一项具有挑战性的任务。他们必须与各种资源互动，包括联系多个经销商（如专门从事二手建筑材料的企业和公司，包括正在发生变化或拆除的行业）。此外，他们经常利用在线咨询平台和促进买卖双方联系的公司，如Ricardo和Salza等中介机构。建筑师还进行个体研究工作，包括寻找拆迁场地并与房地产所有者直接联系。

ASSESSMENT

Once the components have been found, the architects have to sort out very systematically what can be used and what cannot. There are several criteria for this. It has to be logically feasible, so it has to be easy to transport, dismantle and store. There are, of course, architectural criteria, such as colours, geometry and proportions. Technical criteria are also very important: the objects have to be suitable in terms of structure, building physics and fire protection. Also if a component costs more to re-use, the client won't like it. And finally, you have to calculate whether it's worth the cost in ecological terms. Although you can cross almost the whole of Europe with a reused component and still be better off in terms of CO2 emissions, that may not be the case if you have to cross an entire ocean, for example.

评估

一旦找到了这些组件，建筑师们必须非常系统地整理出什么可以使用，什么不能使用，这有几条准则。它必须在运输上是可行的，因此在运输、拆卸和存储方面必须简便。当然，还有建筑标准，如颜色、几何和比例。技术标准也非常重要：物体在结构、建筑物理和防火方面必须合适。另外，如果重新使用某个组件的成本更高，客户可能不会喜欢。最后，你必须计算在生态方面是否值得成本。比如，尽管你可以将一个再利用的组件运过整个欧洲并且在二氧化碳排放方面仍然更有利，但如果需要穿越整个海洋，情况可能就不同。

DOCUMENTATION

An essential phase in the process is thorough documentation of all the components. The individuals responsible for this task, often referred to as "hunters," must first identify the manufacturer to obtain relevant documentation. Subsequently, they compile this documentation and generate CAD drawings, occasionally including 3D models. These collected pieces of information are then used to create a comprehensive passport for the located materials.

记录

该过程中一个重要的阶段是对所有组件进行彻底的文档记录。负责这项任务的个人通常被称为“猎手”，他们必须首先确定制造商以获取相关文档。随后，他们整理这些文档并生成CAD图纸，有时包括3D模型。这些收集到的信息会被用来为定位到的材料创建一份全面的档案。

DISMANTLING

The dismantling phase is of extreme importance, although it can pose significant challenges. There are instances where architects wish to rescue components in excellent or near-new condition, but are unable to do so due to strong adhesion that makes removal without damage impossible. Demolition is usually carried out by either a specialist company or a demolition contractor.

拆解

拆解阶段非常重要，尽管可能存在一些重大挑战。有时建筑师希望拯救处于极好或几乎全新状态的组件，但由于坚固的粘附使得部件在拆除时会产生损坏。拆除工作通常是由专业公司或拆迁承包商进行。



MATERIAL:
1 game board
"Components testing"
1 token per team and 1 dice
The money left over

材料：
1个游戏棋盘“零部件测试”
每队1个棋子和1个骰子
剩下的钱

2: THE TESTING 测试

1. Each team in turn throws the dice once.
2. The number on the die equals the corresponding box
3. The teams have to do what is written in this box

- 1、每队轮流掷一次骰子
- 2、骰子上的数字对应相应的方格。
- 3、队伍必须按照方格上写的内容执行

TRANSPORT

The cost of transporting components is a significant factor in the project budget. You need to coordinate the transfer of the components from the mine to storage, possibly to a repair facility, and finally to the construction site. Often, different companies are involved in these stages, and effective management of all these companies is crucial.

STORAGE

From the time you find an interesting component to the time you can actually use it can be a long time, sometimes several years. During this time you will need a suitable storage facility. While in some cases it's possible to store items in a garage or underground, more often than not you'll need to rent dedicated square metres from a specialised company.

运输

运输零部件的成本是项目预算中的一个重要因素。你需要协调将零部件从矿山转移到存储地点，可能还要转运到维修设施，最终运送到建筑现场。通常，在这些阶段涉及不同的公司，有效管理所有这些公司至关重要。

存储

从你发现一个有趣的组件到实际使用它可能需要很长时间，有时甚至几年。在这段时间里，你将需要一个合适的存储设施。虽然在一些情况下可以将物品存放在车库或地下，但更常见的是你需要从专业公司租专用的位置。

PREPARATION

Reused components often require adjustments, repairs, or refurbishment work before they can be reinstalled. In some cases, testing may also be necessary.

REINSTALLATION

A meticulously documented and well-planned process can ensure a successful reinstallation of the components. Nevertheless, it can be challenging to find companies willing to undertake the installation of reused components.

Additionally, these companies may be hesitant to provide warranties for their work, as they typically do with new components.

准备

再利用的组件在重新安装之前通常需要调整、修理或翻新工作。在某些情况下，可能还需要进行测试。

重新安装

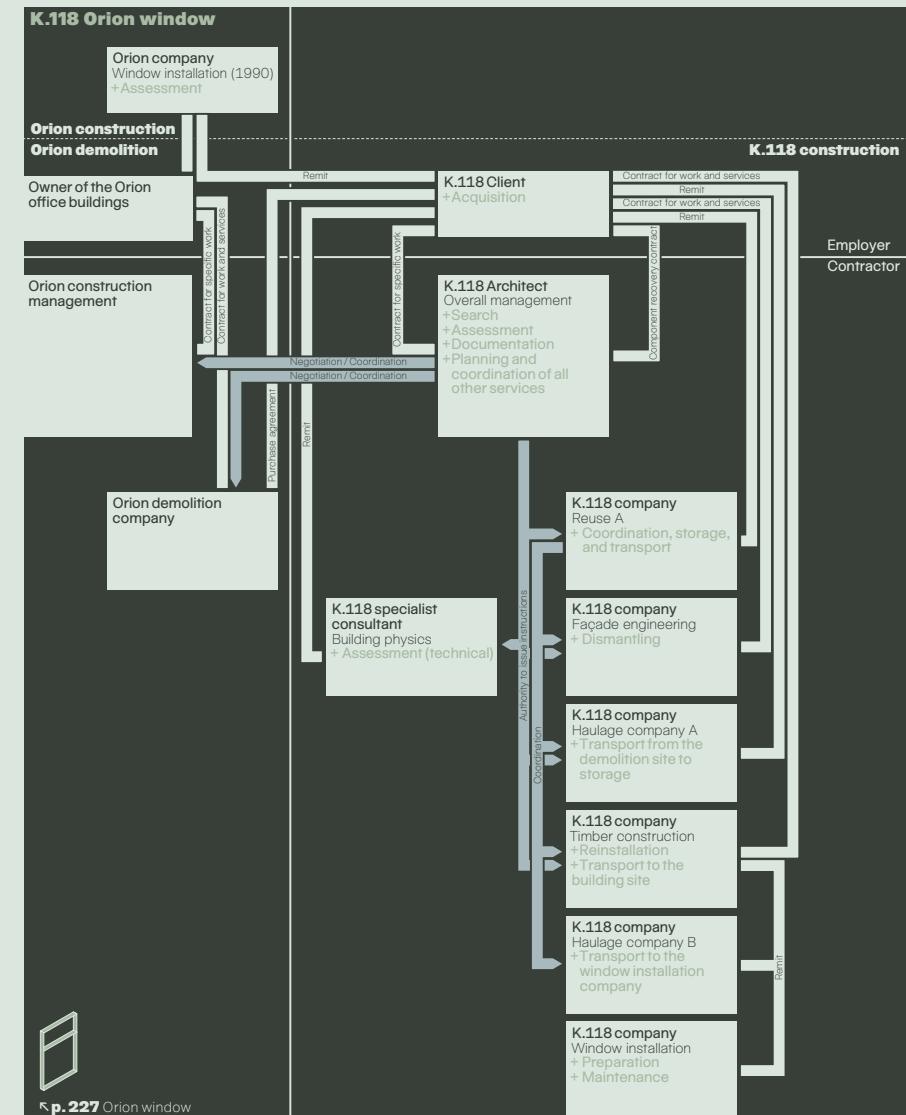
一份详细记录和精心规划的流程可以确保零部件的成功安装。然而，找到愿意承担再利用零部件安装的公司可能会具有挑战性。此外，这些公司可能不愿提供再安装的部件保修，因为他们通常在新零部件上提供保修。

MAINTENANCE

Similar to new components, regular maintenance of your installed reused components can significantly extend their lifespan. Maintenance is often carried out by the manufacturer, but more frequently, it's entrusted to other companies who are compensated for their services. In some cases, the owner or user may also take on the responsibility for maintenance.

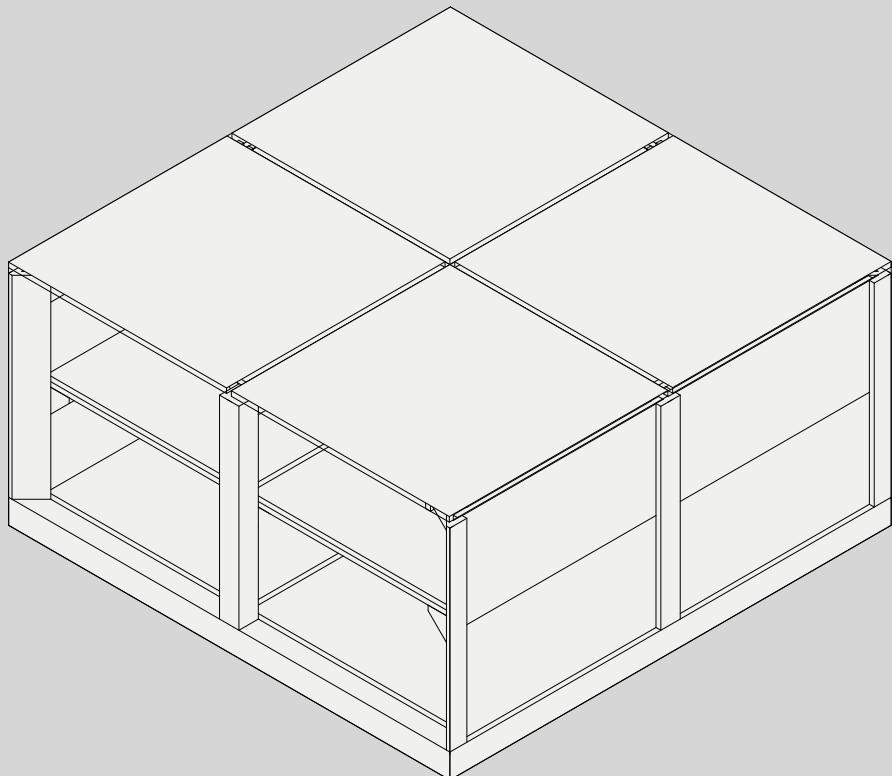
维护

与新组件类似，定期对已安装的再利用组件进行维护可以显著延长它们的寿命。维护通常由制造商进行，但更频繁地，它被委托给其他公司，这些公司会得到服务费用的补偿。在某些情况下，业主或用户也可能承担维护的责任。



3: DESIGN

设计



MATERIAL:

- The money left over
- All the reused materials bought
- The Bank of new materials
- 1 Building structure per team

材料:

- 剩余的资金
- 所有购买的再利用材料
- 新材料银行
- 每队1个建筑结构

1. Each team has to build its extension using:
12 facade elements
12 wall structure elements
8 slab elements
8 flooring elements
4 roof elements
2. All the materials you collect can be used for this. Missing materials can be purchased from the Bank of new components. No reused materials can be bought anymore, exchanges are permitted between the teams.
3. The best project will be the one with the less CO₂, but also the best disassembly score. Esthetic and structure are also very important!

- 1、每个队必须使用以下材料建造自己的扩建部分：
12个立面元素，
12个墙体结构元素，
8个板块元素，
8个地板元素，
4个屋顶元素。
- 2、你收集到的所有材料都可以用于此目的。缺少的材料可以从新组件银行购买。不能再购买再利用的材料，可以在队伍之间进行交换。
- 3、最佳项目将是二氧化碳排放最少的项目，同时拆解得分最高。
美学和结构也非常重要！

Material 交易	Per component 交易					Total 交易			
	Reused 交易	New 交易	Price 交易	CO2 交易	Risk 交易	Quantity 交易	Price 交易	CO2 交易	Disassembly 交易
Slab 交易	Concrete 交易								
	Steel 交易								
	Wood 交易								
	Concrete 交易								
	Steel 交易								
	Wood 交易								
	Concrete 交易								
	Steel 交易								
	Wood 交易								
	Concrete 交易								
	Steel 交易								
	Wood 交易								
	Concrete 交易								
	Steel 交易								
	Wood 交易								
Flooring 交易	Parquet 交易								
	Tiles 交易								
	Parquet 交易								
	Tiles 交易								
	Lino/leum 交易								
	Facade 交易	Wood 交易							
		Metal 交易							
		Wood 交易							
		Metal 交易							
		Plaster 交易							
	Roof 交易	Flat 交易							
		Flat 交易							
	Total 交易								

4: EVALUATION

评估

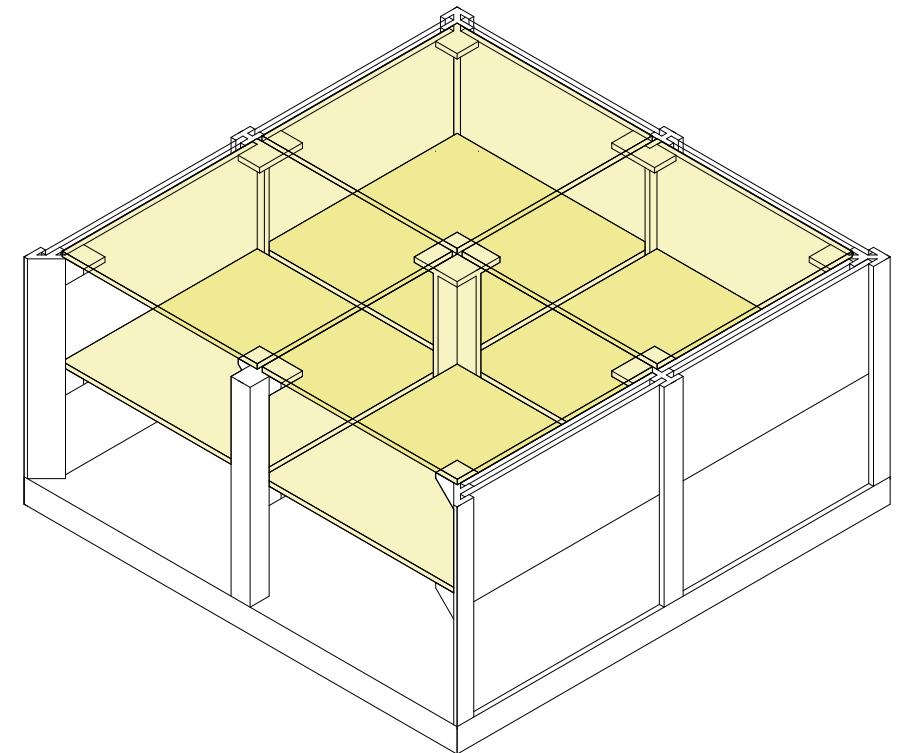
1. Each team must count its number of components by folding up the attached table.
 2. The final evaluation is given by the game master.
- 1、每个队必须通过展开附表来统计其零部件的数量。
- 2、最终评估由游戏主持人进行。

CATALOG

目录

SLAB ELEMENTS

板块元素



WOOD SLAB

木质板材

CO2 二氧化碳

1'500

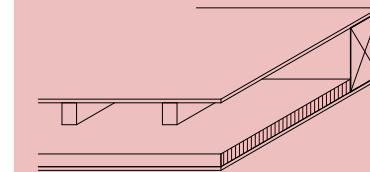
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

4

50 Z



METAL SLAB

钢铁板材

CO2 二氧化碳

4'000

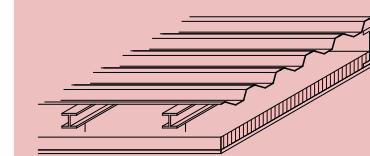
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

6

30 Z



CONCRETE SLAB

混凝土板材

CO2 二氧化碳

5'000

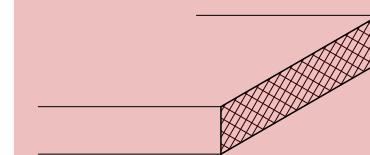
RISK 风险

1

DISASSEMBLY 拆解

2

10 Z



WOOD SLAB

木质板材

CO2 二氧化碳

150

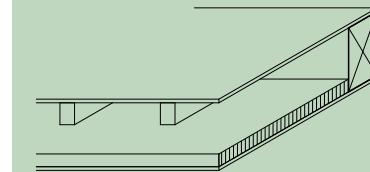
RISK 风险

4

DISASSEMBLY 拆解

4

60 Z



METAL SLAB

钢铁板材

CO2 二氧化碳

400

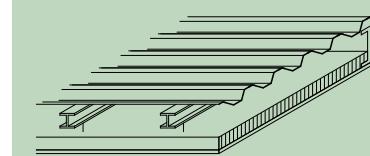
RISK 风险

3

DISASSEMBLY 拆解

6

40 Z



CONCRETE SLAB

混凝土板材

CO2 二氧化碳

500

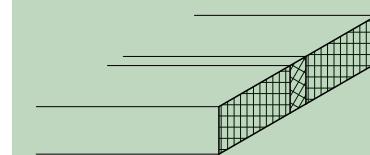
RISK 风险

5

DISASSEMBLY 拆解

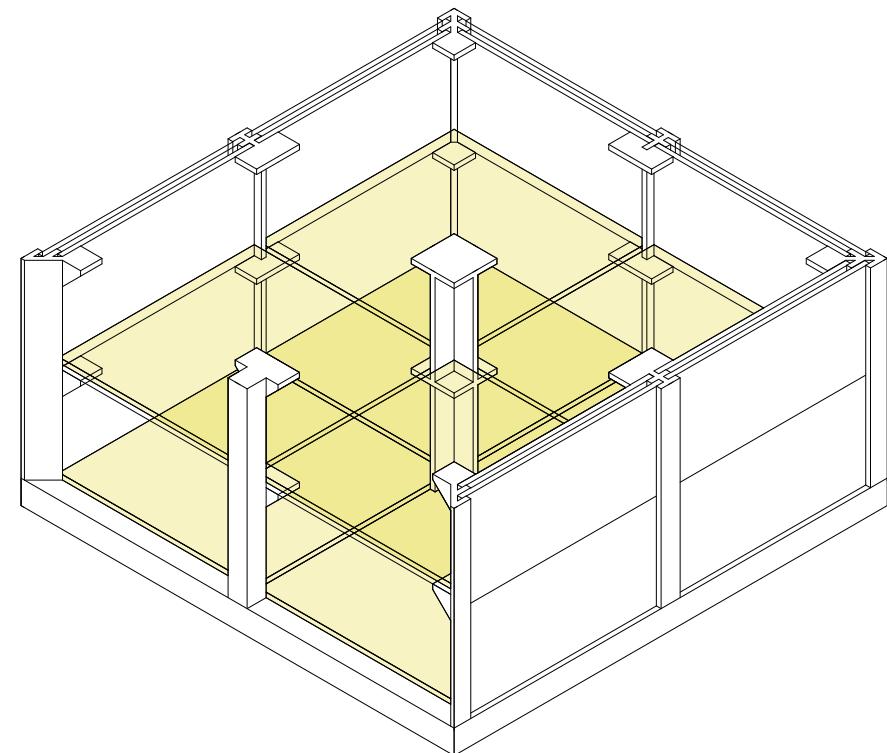
2

20 Z



FLOORING ELEMENTS

地板元素



PARQUET FLOOR

镶嵌地板

CO2 二氧化碳

1'000

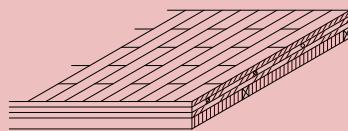
RISK 风险

1

DISASSEMBLY 拆解

5

20 Z



TILE FLOOR

瓷砖地板

CO2 二氧化碳

2'000

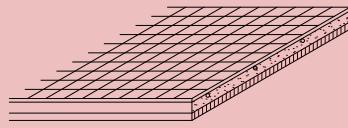
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

3

10 Z



LINOLEUM FLOOR

油毡地板

CO2 二氧化碳

1'500

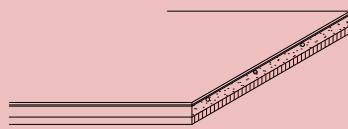
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

2

5 Z



PARQUET FLOOR

镶嵌地板

CO2 二氧化碳

100

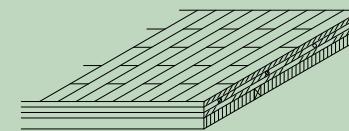
RISK 风险

3

DISASSEMBLY 拆解

5

30 Z



TILE FLOOR

瓷砖地板

CO2 二氧化碳

200

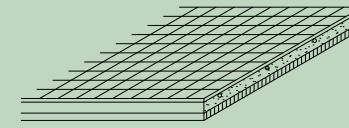
RISK 风险

3

DISASSEMBLY 拆解

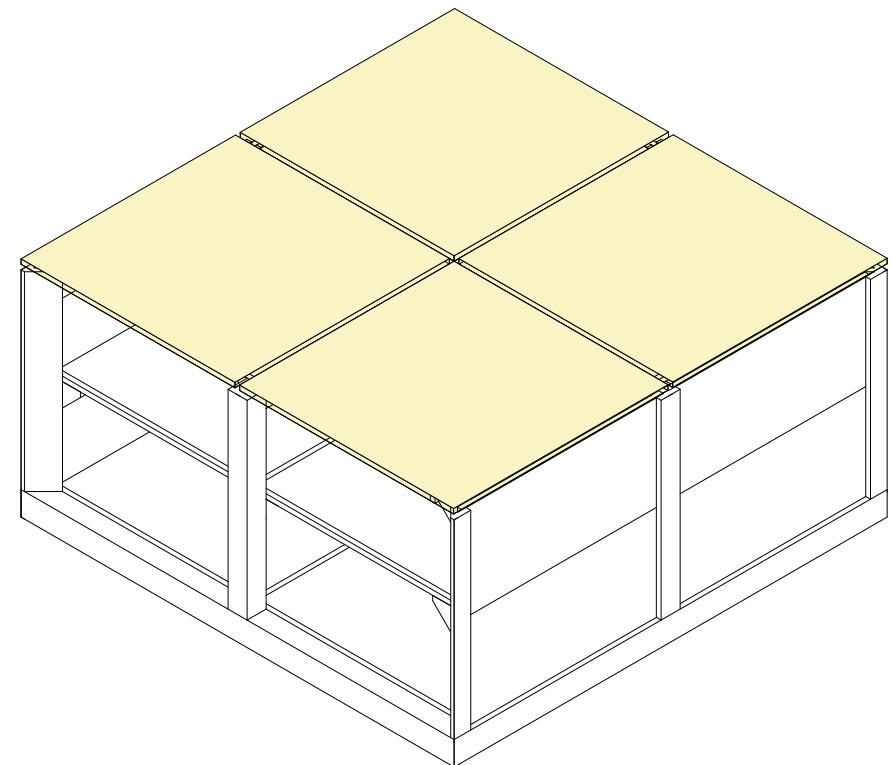
3

20 Z



ROOF ELEMENTS

屋顶元素



ROOF

屋顶

CO2 二氧化碳

5'000

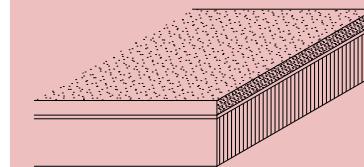
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

4

30 ₣



ROOF

屋顶

CO2 二氧化碳

500

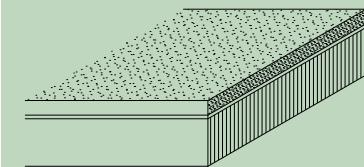
RISK 风险

6

DISASSEMBLY 拆解

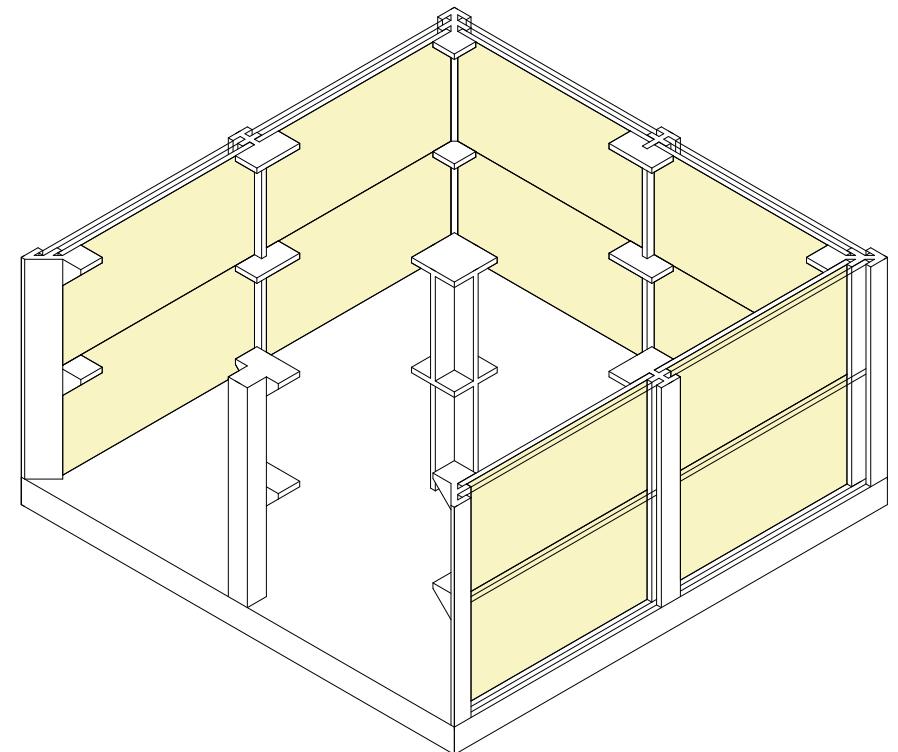
4

40 ₣



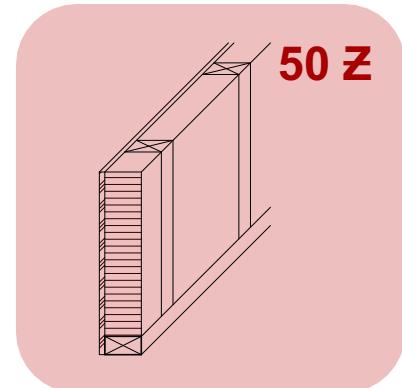
WALL STRUCTURE

墙面结构



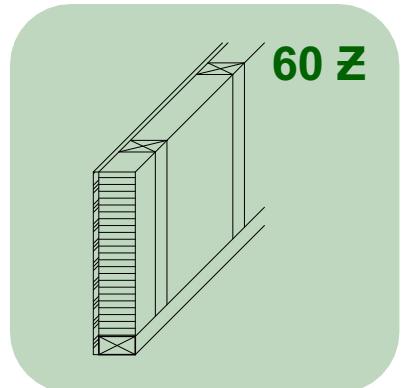
WOOD STRUCTURE 木结构

CO2 二氧化碳	2'000
RISK 风险	2
DISASSEMBLY 拆解	4



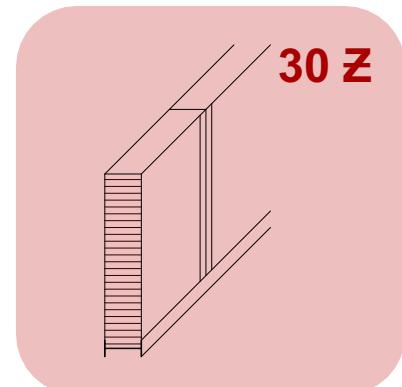
WOOD STRUCTURE 木结构

CO2 二氧化碳	200
RISK 风险	4
DISASSEMBLY 拆解	4



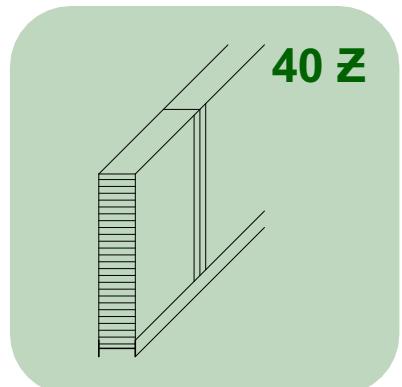
METAL STRUCTURE 金属结构

CO2 二氧化碳	2'500
RISK 风险	2
DISASSEMBLY 拆解	6



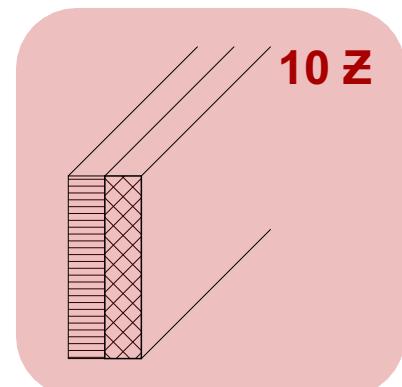
METAL STRUCTURE 金属结构

CO2 二氧化碳	250
RISK 风险	3
DISASSEMBLY 拆解	6



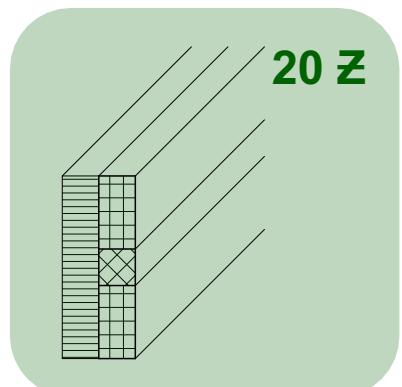
CONCRETE STRUCTURE 混凝土结构

CO2 二氧化碳	3'500
RISK 风险	1
DISASSEMBLY 拆解	2



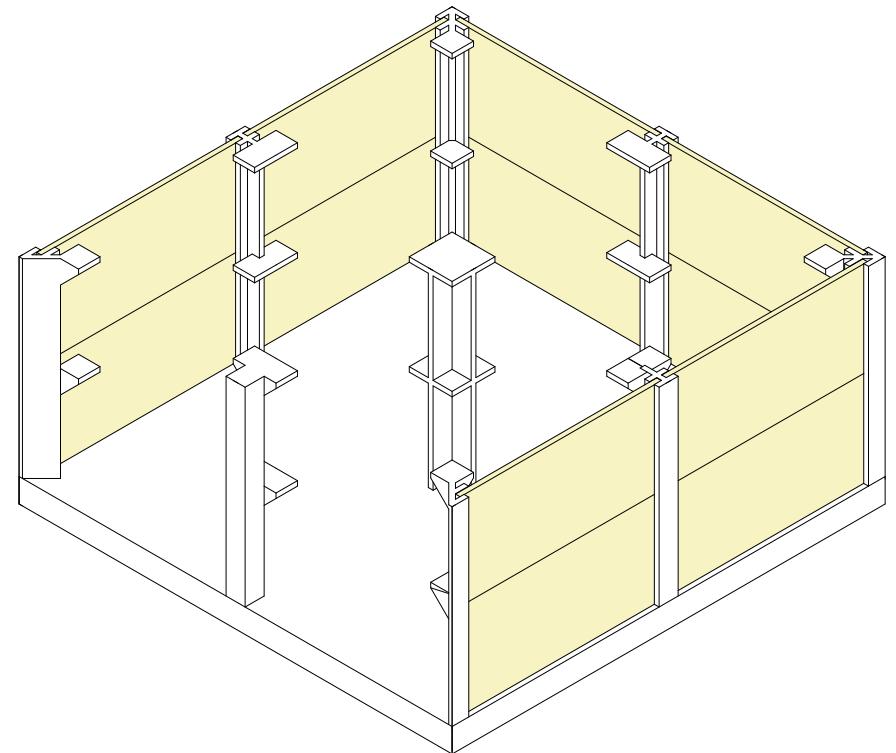
CONCRETE STRUCTURE 混凝土结构

CO2 二氧化碳	350
RISK 风险	5
DISASSEMBLY 拆解	2



FACADE ELEMENTS

立面元素



WOOD FACADE

木质立面

CO2 二氧化碳

500

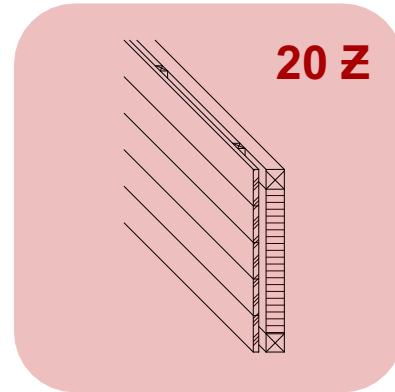
RISK 风险

1

DISASSEMBLY 拆解

4

20 Z



WOOD FACADE

木质立面

CO2 二氧化碳

50

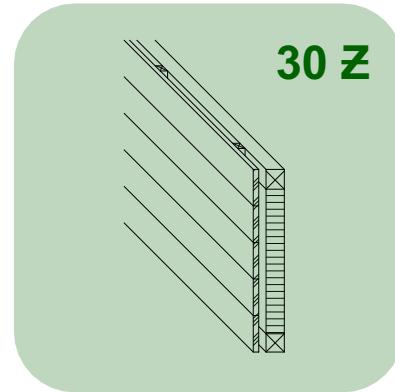
RISK 风险

4

DISASSEMBLY 拆解

4

30 Z



METAL FACADE

金属立面

CO2 二氧化碳

1'500

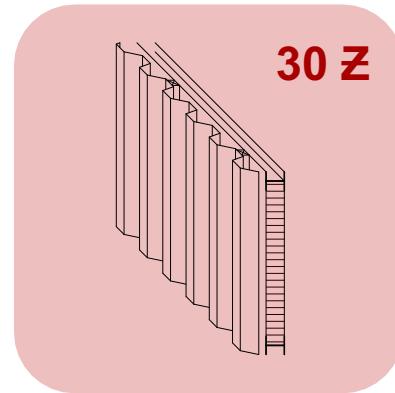
RISK 风险

1

DISASSEMBLY 拆解

6

30 Z



METAL FACADE

金属立面

CO2 二氧化碳

150

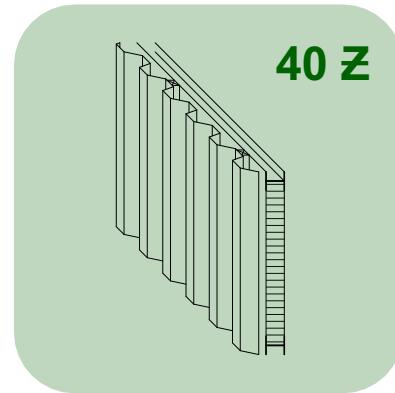
RISK 风险

3

DISASSEMBLY 拆解

6

40 Z



PLASTER FACADE

石膏立面

CO2 二氧化碳

1'000

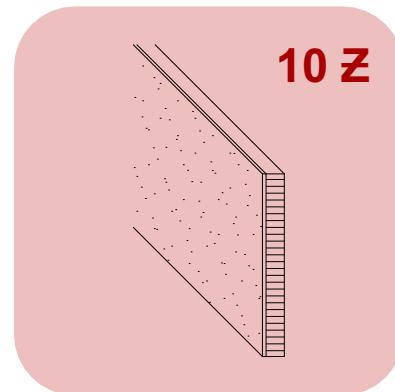
RISK 风险

2

DISASSEMBLY 拆解

2

10 Z





让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together

让我们共同打造气候中和的未来 !



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

intep
skat Swiss Resource Centre and
Consultancies for Development