

气候变化

40/2024

工业生产脱碳

子任务 3：评估水泥行业脱碳措施并确定路线图

作者：

Dietmar Schüwer、Georg Holtz、Valentin Espert
伍珀塔尔气候、环境和能源研究所（伍珀塔尔）

Philine Warnke
弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所（ISI）（卡尔斯鲁厄）

参与人员：

Jacqueline Kligen、Ansgar Taubitz（伍珀塔尔研究所）
Ali Aydemir（弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所）

编写单位：

德国联邦环境署 Umweltbundesamt

气候变化 40/2024

德国联邦环境、自然保护、核安全和消费者保护部

研究项目编号：3719 41 303 0

FB001169/CHI

工业生产脱碳

子任务 3：评估水泥行业脱碳措施并确定路线图

作者：

Dietmar Schüwer、Georg Holtz、Valentin Espert
伍珀塔尔气候、环境和能源研究所（伍珀塔尔）

Philine Warnke
弗劳恩霍夫系统与创新研究所（ISI）（卡尔斯鲁厄）

参与人员：

Jacqueline Klingen、Ansgar Taubitz（伍珀塔尔研究所）
Ali Aydemir（弗劳恩霍夫系统与创新研究所）

德国联邦环境署（UBA）委托编写

德国国际合作机构（GIZ）中德气候变化合作-支持国家自主贡献实施项目为本报告的中文编译提供支持，该项目受国际气候倡议（IKI）资助。

版本说明

编写单位

德国联邦环境署

地址：Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau（德绍-罗斯劳）

电话：+49 340-2103-0

传真：+49 340-2103-2285

buergerservice@uba.de

网址：www.umweltbundesamt.de

研究单位：

伍珀塔尔气候、环境和能源研究所有限公司

地址：Döppersberg 19

42103 Wuppertal（伍珀塔尔）

截稿时间：

2022 年 7 月

编辑：

专业部门 III2.2 资源保护、材料循环、矿业和金属工业

Christian Lehmann、Maja Bernicke

本刊物的 PDF 版本请见：

www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

德绍-罗斯劳，2023 年 2 月

本文作者对内容负责。

摘要：工业生产脱碳——水泥行业脱碳路线图

德国计划到 2045 年实现温室气体中和。2021 年，德国工业部门的排放量约为 1.81 亿吨二氧化碳当量，占全德温室气体排放量的 24%，仅次于能源行业，位居第二¹。约三分之二的工业排放来自于能源密集型行业，其中钢铁和水泥行业的排放量占一半以上。钢铁和水泥行业的工艺流程决定了该行业排放基数大，过程温度高。因此，该行业在脱碳方面面临着巨大的挑战。而钢铁和水泥行业脱碳对实现温室气体中和至关重要。

能源密集型行业的脱碳需要创新的技术理念和配套的长期政策框架。我们应尽早制定政策框架，推动行业行动主体转型，为转型所需的投资提供最大的规划保障。在本项目中，研究人员为钢铁（由弗劳恩霍夫系统与创新研究所主导）和水泥行业（由伍珀塔尔研究所主导）制定了脱碳路线图。本文介绍了子任务 3 的水泥行业脱碳路线图，阐述了该部门当前的脱碳技术方案，以及如何逐步实施这些方案，存在哪些推动或阻碍技术路径实施的影响因素，行动主体在短期、中期或长期可在哪些行动领域采取哪些措施。

在为期两年半的公众参与过程中，项目通过一系列的研讨会、专家访谈和其他活动，吸引了来自产业界、行业协会、社群团体、政府机关、主管部门和学术界的众多利益相关方参与。社会各界的参与确保了项目成果公开透明、参与度高且切实可行。项目为德国水泥和混凝土行业制定了脱碳的总体路线图，描述了所有技术杠杆、相关驱动因素、障碍和行动领域以及深入细致的“热能”、“新型水泥和混凝土建筑技术”、“碳捕集利用与封存（CCUS）”三个子领域的详细路线图。

¹ 联邦环境署，2022 年 3 月：产业部门排放概况

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx

Abstract: DekarbInd – Key points of a roadmap for the decarbonisation of the cement industry

Germany is to become greenhouse gas neutral by 2045. In 2021, the German industrial sector emitted about 181 million tonnes of CO₂ equivalents. This means that it accounts for 24 percent of national greenhouse gas emissions and is the second largest source of emissions in Germany after the energy industry². About two thirds of industrial emissions come from energy-intensive industry. The steel and cement industries in turn cause more than half of these emissions and are particularly challenging due to their process-related emissions and high process temperatures. The decarbonisation of the steel and cement industries is therefore central to achieving greenhouse gas neutrality.

The decarbonisation of energy-intensive industry requires innovative technological concepts and suitable, long-term political framework conditions that open up transformation paths for industry players at an early stage and offer the greatest possible planning security for the necessary investments. In the project, the researchers developed key points for roadmaps for the decarbonisation of the steel industry (led by Fraunhofer ISI) and the cement industry (led by the Wuppertal Institute). The cornerstones of a roadmap for the cement industry developed in work package 3 and presented here give concrete indications of which technological concepts for decarbonisation exist in this industry sector, how these can be implemented over time, which drivers and barriers favour or inhibit these technological paths, and which measures can be implemented by actors in various fields of action in the short, medium and long term.

In a two-and-a-half-year participation process, the project involved numerous stakeholders from industry, associations, social interest groups, politics, authorities and science through a series of workshops and interviews with experts as well as other events. This involvement enabled transparency, participation and practical relevance of the results. The result is an overall roadmap for the decarbonisation of the German cement and concrete industry, which presents an overview of all technological levers and associated drivers, barriers and fields of action. This is supplemented by three detailed roadmaps for the subsectors "Thermal energy supply", "New cements and concrete technologies" and "CO₂ capture and use or storage (CCUS)", which are examined in depth.

² UBA March 2022: Emission overviews in sectors
www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx

目录

目录	7
图片目录	10
表格目录	11
缩略语目录	12
综述	14
1 背景	26
2 基础、目标和方法	27
2.1 路线图的基础	27
2.1.1 路线图：显示各时间段的多维度发展变化	27
2.1.2 制定路线图：与利益相关方的互动过程	27
2.1.3 本项目选择的路线图层级	28
2.2 利益相关方参与的方法步骤	30
2.3 核心小组会议	32
2.3.1 核心小组会议 1：愿景和目标	33
2.3.2 核心小组会议 2：技术	34
2.3.3 核心小组会议 3：路线图（第一部分）	38
2.3.4 核心小组会议 4：路线图（第二部分）	39
2.4 访谈与专题研讨会	40
2.4.1 废弃物衍生燃料（ABS）研讨会	41
2.4.2 新型水泥和混凝土建筑技术研讨会	41
2.4.3 碳捕集利用与封存及基础设施研讨会	42
2.4.4 （政策）工具/市场/社会接受度专题研讨会	43
2.5 利益相关方对话	43
2.5.1 第一次利益相关方对话（SD1）	44
2.5.2 第二次利益相关方对话（SD2）	44
3 利益相关方关于路线图各图层的讨论结果	45
3.1 愿景和目标	45
3.2 技术	47
3.2.1 初始情况和技术介绍	47
3.2.2 热能制备	49
3.2.3 新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）	50

3.2.4 碳捕集利用与封存 (CCUS)	52
3.2.5 各个技术领域之间的相互作用	57
3.3 驱动因素和障碍	58
3.3.1 驱动因素	58
3.3.2 障碍	59
3.4 行动领域	61
3.4.1 监管框架条件	61
3.4.2 打造并维护公平竞争环境	61
3.4.3 跨产业部门的综合能源战略	62
3.4.4 激励并建立低碳节能的建筑市场	62
3.4.5 将新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入建筑实践	62
3.4.6 建筑业的循环经济	62
3.4.7 规划和建设二氧化碳运输基础设施	62
3.4.8 有关碳基础设施的社会对话	62
3.4.9 研究与开发	63
4 水泥行业脱碳路线图的要点	64
4.1 愿景	66
4.2 转型路径	67
4.2.1 热能制备	67
4.2.2 新型水泥和混凝土建筑技术	67
4.2.3 碳捕集利用与封存 (CCUS)	68
4.3 驱动因素	69
4.4 障碍	69
4.5 行动领域	70
5 深入研究特定领域的详细路线图	74
5.1 热能的详细路线图	75
5.1.1 愿景	76
5.1.2 转型路径	76
5.1.3 驱动因素	76
5.1.4 障碍	76
5.1.5 行动领域	77
5.2 新型水泥和混凝土建筑技术 (NZB) 详细路线图	78
5.2.1 愿景	79

5.2.2 转型路径.....	79
5.2.3 驱动因素.....	80
5.2.4 障碍.....	80
5.2.5 行动领域.....	80
5.3 碳捕集利用与封存（CCUS）详细路线图.....	82
5.3.1 愿景.....	83
5.3.2 转型路径.....	83
5.3.3 驱动因素.....	84
5.3.4 障碍.....	84
5.3.5 行动领域.....	85
6 新型水泥和混凝土建筑技术、碳捕集利用与封存两大领域的政策工具与措施.....	86
6.1 新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）方面的可用工具.....	87
6.2 针对碳捕集利用与封存（CCUS）基础设施的工具.....	88
7 参考文献目录.....	91

图片目录

图 1:	通过核心小组、专家访谈、研讨会和利益相关方对话，吸纳利益相关方的专业知识	15
图 2:	水泥生产和混凝土建筑产业链中的减排技术杠杆（橙色）示意图	15
图 3:	水泥行业脱碳愿景和路线图	18
图 4:	绘制路线图的一般步骤	28
图 5:	工业生产脱碳路线图的示意图、选定层级与时间线	29
图 6:	通过核心小组、专家访谈、研讨会和利益相关方对话，整合利益相关方的专业知识	30
图 7:	核心小组与项目团队之间的互相配合	31
图 8:	四次核心小组会议的路线图绘制过程和重点问题示意图 ..	33
图 9:	第一次核心小组会议关于水泥行业脱碳积极愿景的思维导图摘录	34
图 10:	熟料煅烧工艺领域（非代表性）调查结果图示	36
图 11:	新型水泥和混凝土建筑技术领域（非代表性）调查结果图示	37
图 12:	碳捕集利用与封存及基建领域（非代表性）调查结果图示	38
图 13:	在引入新型水泥和混凝土建筑技术的过程中，各种工具杠杆作用的（非代表性）调查结果	40
图 14:	新型水泥和混凝土建筑技术领域（非代表性）调查结果 ..	42
图 15:	水泥生产和混凝土建筑产业链的减排技术杠杆（橙色）示意图	48
图 16:	各个技术领域之间的相互作用	58
图 17:	水泥行业脱碳愿景和路线图	65
图 18:	热能的愿景和详细路线图	75
图 19:	新型水泥和混凝土建筑技术的愿景和详细路线图	78
图 20:	碳捕集利用与封存的愿景和详细路线图	82
图 21:	项目重点政策工具的基本分类	87

表格目录

表 1:	路线图行动领域核心措施的实施主体	24
表 2:	子任务 3“水泥”框架内举办的活动	30
表 3:	水泥核心小组的组成	32
表 4:	访谈和专题研讨会清单	40
表 5:	所需的二氧化碳运输能力	57
表 6:	路线图中的利益相关方图标（主要行动主体 次要行动主体）	66
表 7:	路线图行动领域核心措施的实施主体	71

缩略语目录

3D	三维，立体
ABS	替代燃料
AfA	计提折旧（折旧的税法术语）
BMWi	德国联邦经济和能源部
BMWK	德国联邦经济和气候保护部
BNetzA	德国联邦网络管理局
BTB	德国预拌混凝土行业联合会
bzgl.	关于
bzw.	或
CAPEX	资本支出（投资性开支）
CBAM	碳边境调节机制
CCfD	碳差价合约
CCS	碳捕集与封存
CCU	碳捕集与利用
CCUS	碳捕集利用与封存
CESR	卡塞尔大学环境系统研究中心
CSI	水泥可持续发展倡议行动组织
DAfStb	德国钢筋混凝土委员会
DE	德国
DECHEMA	德国化学工程与生物技术学会
DekarbInd	工业生产的脱碳
DGNB	德国可持续建筑协会
DIN	德国标准化学会
DRI	直接还原铁
E-Kfz	电动汽车
ECRA	欧洲水泥研究院
etc.	等等
EU-ETS	欧盟碳排放权交易体系
EU	欧洲
F&E	研究与开发，研发
FDB	德国装配式混凝土建筑专业联合会
GCCA	全球水泥和混凝土协会

3D	三维，立体
ggf.	必要时，可能
ggü.	相比
HOAI	《建筑师与工程师服务费法定标准》
i.d.R.	通常
IEA	国际能源署
IEAGHG	国际能源署温室气体研发计划
KEI	能源密集型产业气候保护能力中心
KGT	核心小组会议
KSpG	德国二氧化碳封存法
LEILAC	“低排放强度石灰和水泥”项目名称（煅烧炉二氧化碳直接分离技术）
Lkw	载货汽车
Mio.	百万
NGO	非政府组织
NZB	新型水泥和混凝土建筑技术
OPEX	运营成本（运行成本）
PtX	电转 x（借助电力将原料转化为燃料或化学初级产品）
RC-Beton	再生混凝土
RCFs	再碳化水泥石
s. u.	见下文
SD	利益相关方对话
UBA	德国联邦环境署，德绍
UK	英国
VDZ	德国水泥协会
Vgl.	参见
VT	（须深入探讨的）专题
z. B.	例如

综述

“工业生产脱碳”项目子任务 3 旨在与广泛的利益相关方开展对话，以确定水泥行业的脱碳路线图。项目的主要背景是德国联邦政府出台的《气候保护法》³。德国计划到 2045 年实现温室气体中和。从中期来看，2030 年温室气体排放量须较 1990 年减少 65%。2021 年，水泥行业的碳排放量近 2100 万吨，约占德国温室气体总排放量的 2.7%（根据德国联邦环境署和德国水泥协会 2022 年的数据自行计算）。由于工艺原因，熟料生产过程产生的二氧化碳使得水泥行业成为最难脱碳⁴的产业部门之一。因此，减少水泥行业的温室气体排放对于实现气候目标至关重要。

方法步骤

人们对路线图的定义不尽相同。总体而言，路线图是用图形来呈现各个时间段的演变过程。路线图的共同点包括：（1）涉及未来（非预测数据），（2）展现的各个方面具有时间上的关联，（3）致力于实现一个愿景或目标。此外，路线图通常具有几个层级（也称为“Layer”）。

在开展项目过程中，我们与利益相关方协商确定了以下五个路线图层级：

- ▶ **愿景要素：**2045/50 目标体系的主要特点
- ▶ **市场/技术的转型路径：**逐步实施和推广创新（技术）方案
- ▶ **驱动因素：**有利于水泥行业实现碳中和转型的外部条件
- ▶ **障碍：**阻碍水泥行业实现碳中和转型的技术、经济、监管和社会因素
- ▶ **行动领域/措施：**消除或减少障碍的方案，旨在促成或加快转型。

在制定路线图时，项目选定了以下考察范围：德国水泥行业的脱碳目标是尽量避免水泥行业的碳排放；剩余的少量排放⁵须通过水泥和混凝土行业自行进行抵消，例如使用生物燃料，采用二氧化碳捕集技术并对捕获的二氧化碳做永久封存。原则上，我们也可以借助直接空气碳捕集技术、植树造林或类似的排放抵消机制，但上述领域不是此次项目的重点研究对象。在研究中，我们假定混凝土建筑部门的建设工作总量保持不变。随着建筑需求方式的改变（例如偏好木结构建筑），水泥行业的碳排放可能降低，但该议题也不属于本次研究的范畴。我们将 2050 年作为脱碳的时间目标节点⁶。

我们在制定路线图的过程中吸纳了社会各界的意见，积极争取公众参与。期间，利益相关方贡献了广泛的专业知识（图 1）。项目初期成立了**核心小组**，即核心利益相关方小组，在整个项目期间负责提供专业意见。共有来自 18 个机构的 33 名利益相关方参加了四次核心小组会议。核心小组的首要任务是描绘愿景、制定措施、确定转型路径和提供行动建议，评审和讨论每个工作步骤的成果，贡献自身的专业知识，对路线图加以完善。项目还组织了十次专家访谈和四次旨在深入探讨重点领域的专题研讨会。在项目中期与尾声，项目组与利益相关方开展对话，向更广泛的利益相关方群体介绍了中期和最终研究成果，并与之进行了讨论。在整个项目期间，共有 120 多名利益相关方参与了对话过程。

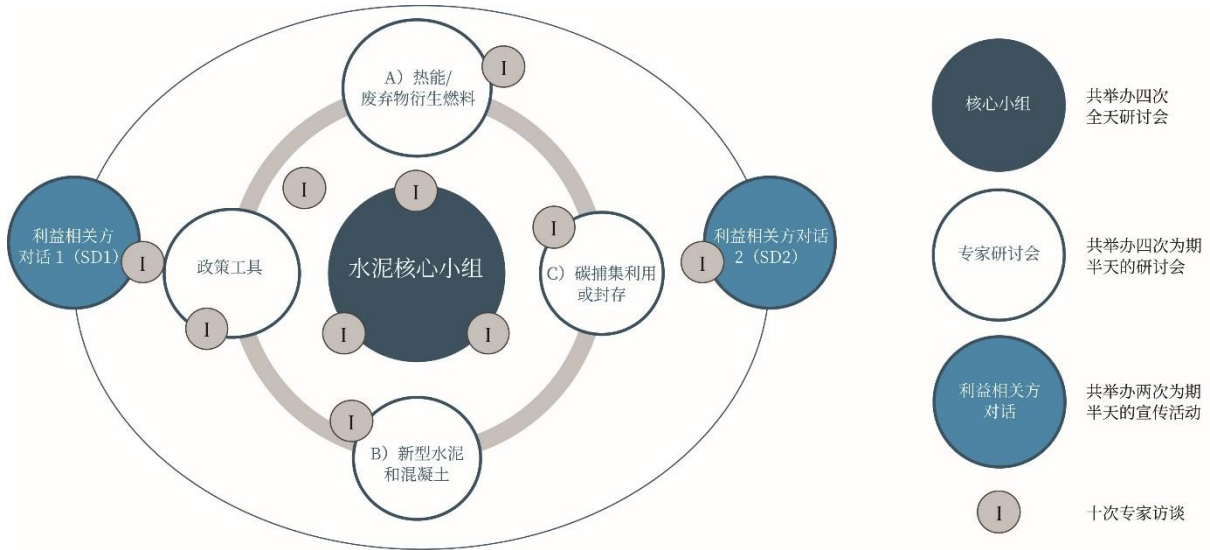
³ 2021 年 8 月 31 日的法律修正案

⁴ 这里使用“脱碳”概念描述实现气候中和的过程。严格来说，这个概念并非最恰当的用词，因为碳是石灰石的重要成分，即便在未来气候中和的水泥行业中也发挥一定的作用。

⁵ 例如来自无法被全部捕获的二氧化碳，因为技术上无法实现 100% 的碳捕集率。

⁶ 本项目于 2020 年 2 月启动，所以在德国《联邦气候保护法》2021 年年中的修订法案决定将德国气候中和的目标年份从 2050 年提前到 2045 年之前，项目就已制定了大致的路线图框架。此次项目的成果为定性研究结论，即便修订后的《联邦气候保护法》规定的目标要求更高，研究成果仍然有效。

图 1： 通过核心小组、专家访谈、研讨会和利益相关方对话，吸纳利益相关方的专业知识



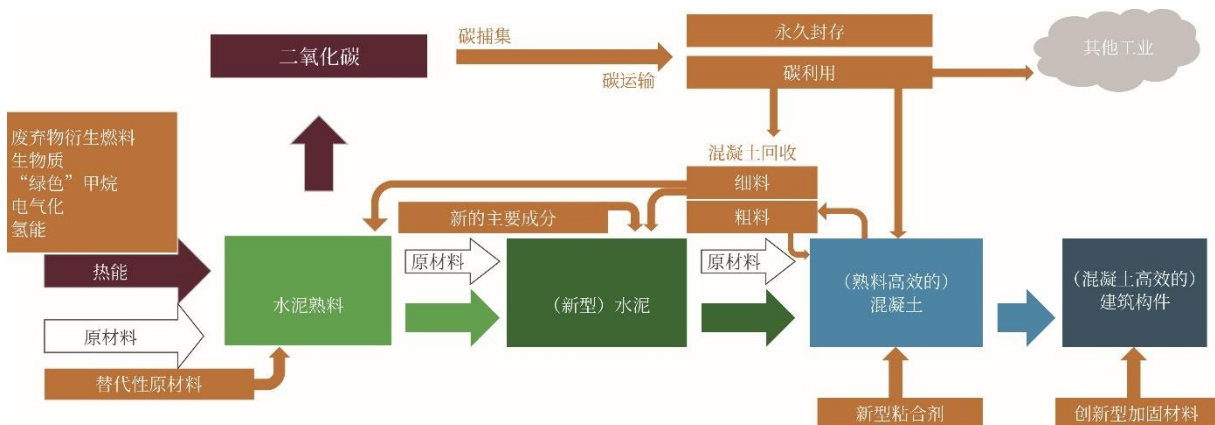
资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

项目首先从技术维度出发制定了三个“细节路线图”，分别涉及“热能制备”、“新型水泥和混凝土建筑技术”（含新型粘合剂）及“碳捕集利用与封存”，继而在（第四个）“总路线图”中整合了三者。在项目团队看来，这四张路线图综合了与利益相关方多次讨论以及项目团队分析的结果。但路线图无法在每个细节上与研讨会参会者或受访专家的看法一一对应。

水泥行业脱碳的技术基础

只要创造了必要的框架条件，从长远来看（到 2045 年或 2050 年），水泥和混凝土生产实现气候中和的目标在技术上便是可行的。水泥行业脱碳可以借助的技术和措施有很多，涉及到混凝土建筑产业链的不同环节。很多情况下，我们可以综合利用各种解决方案。图 2 概述了本项目考察的水泥生产和混凝土建筑产业链中的减排杠杆。

图 2： 水泥生产和混凝土建筑产业链中的减排技术杠杆（橙色）示意图



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

混凝土建筑产业链中的二氧化碳大部分源自水泥熟料的生产过程。目前看来，水泥熟料在很长一段时间里（至少在 2050 年前）仍将是不可或缺的建筑材料。为此，为了完成水泥行业的脱碳任务，项目重点研究了该如何减少或避免熟料生产过程的碳排放。

熟料生产过程中产生的二氧化碳一部分来自熟料煅烧所用的燃料（约占二氧化碳总排放量的三分之一），另一部分则来源于原料石灰石的煅烧过程（约占二氧化碳总量的三分之二）。在生产熟料时，可以考虑改变工艺用热的制备方式，以减少或彻底避免燃料相关的排放。而对于石灰石煅烧过程中释放的碳排放而言，使用脱过酸的替代原材料有助于减少每吨熟料工艺相关的排放，但实际作用似乎极为有限。

高效使用混凝土⁷以及混凝土中的水泥和熟料，有助于降低对二氧化碳密集型熟料的依赖，却无法彻底根除这种依赖。对于熟料高效的混凝土而言，创新工艺和成分优化的新型水泥是关键。新型粘合剂摒弃了传统熟料，可以发挥一定的减排作用，但这种粘合剂的生产依然会产生二氧化碳。

水泥熟料未来仍将是一项重要课题，因为我们无法避免熟料生产中工艺相关的碳排放。可见，水泥行业要脱碳，做好碳捕集和尽可能永久固定捕集到的二氧化碳，这才是重中之重。我们既可以对捕集到的二氧化碳加以利用，也可以将其永久封存。如何处理捕集到的二氧化碳是众多讨论和考虑的焦点。

混凝土回收利用后，粗料（骨料）可用于再生产（再生混凝土），细料则可视情况用于新水泥生产的各段工艺。这些解决方案也是利用和永久固定二氧化碳的基础。

水泥行业脱碳路线图

下文中的总体路线图（

⁷ 本项目在确定研究对象时，假定混凝土建筑部门的建设工作总量保持不变。因此，用以评判混凝土利用效率的依据是每个混凝土建筑构件所需的混凝土量。

图 3) 综合反映了与利益相关方多次讨论以及项目团队分析的结果。但路线图无法在每个细节上都与研讨会参会者或受访专家的观点一一对应。我们在图上标注了与研讨会参会者观点存在明显差异的议题（见图中“闪电”标志）。下文概述了针对这些议题的不同观点。

愿景

熟料生产过程中产生的碳排放量将大幅减少，这是（最迟）到 2050 年要实现的水泥行业脱碳愿景的核心要素。首先，替换能源源可减少工艺用热制备过程中产生的（化石基）碳排放。其次，整条产业链应尽可能高效使用熟料，在建设工作量不变的情况下，所需的熟料消耗量须进一步下降，尽量削减工艺流程相关的排放。碳捕集利用与封存技术可以（在很大程度上）防止剩余的、不可避免的碳排放。应尽可能永久固定或封存捕集到的二氧化碳，不增加地球碳循环的化石碳素。在特定情况下，可以考虑将水泥行业产生的二氧化碳用作其他产业部门的碳源，即便这种做法无法保证能永久固碳。对于因二氧化碳捕集不完全等原因造成的无法避免的残余排放，可采用生物燃料（包括生物源废弃物衍生燃料）的负排放技术，并结合二氧化碳捕集和永久固定或封存来进行补偿或超额补偿，最终确保水泥行业能为气候保护做出积极的贡献。依据此愿景，水泥和混凝土产业应尽力广泛推行循环经济，提高资源效率。在这方面，熟料煅烧过程中废弃物的热利用和材料利用是关键。此外，（混凝土）建筑行业应全面建立循环经济。

图 3: 水泥行业脱碳愿景和路线图

说明：关于措施实施的相关利益相关方群体的定义（即路线图中行动领域右侧的图标），请参见第 4 章开头的解释和表 6。



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

转型路径

热能制备

根据路线图的规划，基于化石燃料的热力供给占比将不断下降，中长期将被完全摒弃。长期来看，只有当替代能源不充足时，才会使用化石燃料（这种情况不大可能发生，也不希望发生）。

应提高废弃物衍生燃料的使用比例，以此替代化石燃料。未来，废弃物衍生燃料的原料仅限于无法回收的废弃物。路线图中还提出，作为补充方案，我们应尽可能采用可再生能源来制备工艺用热，并须围绕着（可再生能源）电力的直接应用场景做更为深入的技术研发。从技术上看，我们至少中期可实现电力直接应用。在熟料煅烧过程中运用（绿）氢也具备技术上的可行性。然而，由于受到技术制约，当前热力制备中的氢能占比仍旧偏低。该领域也是研发工作亟待解决的课题。在中短期，氢能供给仍存在缺口，因此路线图对熟料煅烧工艺中的氢能应用做了长线规划。从技术角度来看，基于能源作物的（可持续）生物质⁸能够完全满足工艺用热的需求。路线图中水泥行业在应用生物质时，须确保其可持续性。

在中长期范围内，所有可再生能源皆是有限资源，其可用量和成本效益因水泥行业的分布不同而有所差异，这也是研究需关注的事项。项目未能就未来熟料煅烧工艺应（主要）利用哪些可再生能源达成共识（见闪电标志）。

新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）

若要通过新型水泥、粘合剂和混凝土施工技术提高熟料利用效率，整条混凝土建筑产业链上的措施必须相互配合。目前，一部分新型水泥和粘合剂⁹已在高度专门化的市场（利基市场）上获得运用。中短期应进一步扩大上述产品的应用范围。中长期应减少或避免钢铁生产过程中高炉矿渣和燃煤发电所产生的粉煤灰。这意味着，部分新型水泥虽在中短期内有助于提高熟料效率，但长期势必会停止这类产品的生产。因此，我们必须围绕煅烧粘土、混凝土碎砂、再活化钢厂的矿渣等其他原料的应用，（继续）开展研究工作，确保上述原料的足量供给，以便在中长期将它们用作水泥的主要成分，大大提高熟料的利用效率。

在新型混凝土领域，路线图计划持续增加含再生骨料的混凝土（再生混凝土）的应用比例。这一措施特别有助于提高资源效率。¹⁰按照路线图中长期的规划，我们须进一步开发并在市场上投放水泥含量比当前更低的新混凝土产品，以期提高熟料利用效率。这需要业内对混凝土成分做精确分类和微调。在产品的市场导入过程中，也需要相应调整市场规则，积累全面的专业知识和实践经验。

要想在未来建造出至少和现在一样高效的混凝土建筑，根据路线图有必要进一步扩大现有混凝土技术的应用范围（如插入式空心体、预应力天花板），用耐腐蚀性材料（如碳、玄武岩）制成的替代加固材料取代目前常用的结构钢。这项措施可减少建筑构件的厚度，从而提高混凝土效率。¹¹从建筑工程学的角度看，不存在任何制约上述方案大规模推广的因素，但我们仍需加大研究和市场推广。路线图中假设，应尽快在合适的细分市场上推广一部分替代材料（如玄武岩），其他替代材料（如碳）将在中长期发挥作用。梯度混凝土、超高强度混凝土和 3D 打印工艺等混凝土高效建筑方式已被应用于一些小型或试点项目。最迟在中期扩大这类建筑方式的应用规模，进一步提高其市场份额。

⁸ 例如短期轮作种植园

⁹ “新型水泥”指主要成分含波特兰水泥熟料的粘合剂。目前（在 DIN EN 197-5 标准发布前），这种形式的水泥尚未上市，或只在获得许可或经一般建设监管机构批准后才能上市。这里所说的“新型粘合剂”指不含传统波特兰水泥熟料的粘合剂。

¹⁰ 再生混凝土的减碳效率取决于具体细节，但减排效果总体有限，因为再生骨料的应用并不能改变或至少不会显著改变熟料需求。

¹¹ 使用结构钢时，建筑构件厚度的测定必须考虑到防腐问题，因此建筑构件的设计厚度往往超出静力学的要求厚度。

目前大宗交易的水泥原则上适用于混凝土建筑的各个应用领域，混凝土制造商通常根据价格来选择水泥产品。熟料效率高的新型水泥和粘合剂并不适用于所有混凝土建筑的应用场景。室内应用场景和简单外部建筑构件对混凝土产品的耐久性要求不高，在这里，熟料效率高的水泥发展潜力巨大。若要提高新型粘合剂的市场占有率，我们首先要开发差异化的应用场景，根据不同的使用目的，相应提供解决方案。在混凝土建筑领域，混凝土标准须加入水泥含量测定的要求。在实际应用时，还可以针对熟料效率优化测定要求。开发差异化的粘合剂和混凝土应用场景是充分挖掘上述减排潜力的先决条件，也是一项非常重要的跨领域任务。

碳捕集利用与封存（CCUS）

为了捕集无法完全通过其他方式避免的剩余二氧化碳¹²，熟料窑必须安装碳捕集设备。按照路线图，德国将在短期内建立一批试点和示范设施，测试并进一步开发不同的碳捕集工艺。¹³中长期内（最晚从2030年左右开始），德国将陆续安装工业规模的碳捕集设施，如有必要，还将对窑炉进行改造或重建。

根据路线图，部分捕获的二氧化碳将通过矿化被永久固定。在混凝土建筑（例如在新拌混凝土中注入二氧化碳、在二氧化碳中硬化预制混凝土建筑构件）或回收再利用（对混凝土拆除废弃物进行再碳化）的各道工序中均可采用此类工艺。混凝土的生产和回收利用在空间布局上高度分散。因此，基础设施的网络也应更加分散，确保可以将二氧化碳和混凝土或拆除废弃物集中到合适的地点，而不是将二氧化碳用于化学原料和动力燃料的应用场景或碳封存场景。

当二氧化碳用于生产化学初级产品和动力燃料时，其利用率高于矿化工艺。但是，必须考虑到，二氧化碳的捕集只能在制成品的生命周期内进行，而且在生产过程中需要大量的氢气。根据路线图，在无法保证永久固定二氧化碳的情况下，倘若能以有利于系统¹⁴的方式提供充足的绿氢，并且碳制备相较于其他方案（如直接空气捕集）更具优势的话，我们可将捕获的一部分二氧化碳用于化学原料和动力燃料的生产。路线图假定中短期内的可再生电力和绿氢供给有限。因此，上述应用场景属于长期规划。尽管如此，我们在中短期内必须建成和运营试点、示范设备，以便进一步开发碳捕集与碳利用的工艺。

捕集到的无用二氧化碳应进行地质封存。在目前及在可预见的未来，地质封存在德国不太可行，法律上不允许，社会和政策也不支持。当前可考虑的主要封存地点包括了一部分欧洲国家（挪威、荷兰、英国、丹麦，视情况也可考虑冰岛）境内枯竭的天然气田和油田，以及北海海底的含盐蓄水层。这些地方正在开发用作碳封存的地质储存设施。挪威计划到2024年建成示范工程，覆盖从水泥厂到碳封存设施的整条碳捕集与封存产业链。按照路线图的规划，德国在建设大规模碳捕集设施之前，境内的水泥厂和碳基础设施亦将落地一批示范项目。二氧化碳的地质封存是否长期可行？我们是否应当只将其视为一种临时手段，尽量缩短地质封存技术的应用时间，直至可永久固碳的工艺成熟上市？对此，参与项目的行动主体意见不一。

路线图假定，绝大多数情况下的二氧化碳利用（或封存）不会直接发生在水泥厂里。因此，我们应尽早规划和建设连接水泥厂、二氧化碳用户和海港的碳基础设施，这是碳捕集形成一定产业规模的先决条件。然而，有待运输的二氧化碳总量和水泥厂的具体地理位置（只有少数水泥厂毗邻大的航运通道）不明，火车和轮船在碳基础设施系统中扮演着重要角色，尤其将在加速发展期发挥举足轻重的作用。在增长阶段，二氧化碳供给方与接收方的关系尚不明确。根据路线图，中长期的二氧化碳运输将主要依靠管网。我们必须尽快行动起来，才能确保在中期内建成此类网络。

¹² 其中包括无法以其他方式回收进行热利用的废弃物所产生的化石基二氧化碳排放。虽说水泥行业原则上可以运用碳中和的能源来避免此类二氧化碳排放，但依然会在其他地方（废弃物部门）产生排放。

¹³ 路线图中没有指明应优先采用哪种碳捕集工艺。

¹⁴ 这表示氢或制氢所需的电力在用于其他领域（如热泵、电动汽车）时不会更具气候保护效应。

驱动因素

二氧化碳价格将不断上涨，这是水泥行业脱碳的一大关键驱动因素。转型路径包含的各种碳减排方案对应着不同的减排成本。如今，二氧化碳价格已在推动水泥行业努力减排（如提高废弃物衍生燃料的使用比例）。随着未来二氧化碳价格的不断上升，越来越多的碳减排方案将比传统工艺更具经济竞争力。然而，单单依靠二氧化碳价格并不能保证水泥行业的转型成功。

其他推动因素也有助于各类减排方案的成功落地，例如改善信息管理和质量控制体系、运用人工智能等手段进一步优化生产流程等，这类数字化举措可大大促进混凝土建筑产业链上水泥熟料的高效利用。越来越多的人认识到资源的有限性，也积极投身循环经济的建设，深化混凝土建筑领域的回收再利用工艺，并借助矿化手段充分利用好二氧化碳资源。

一部分欧洲国家提供二氧化碳封存点，并配套了二氧化碳运输的基础设施，这为妥善处理德国水泥厂的碳排放带来了希望，也促使企业筹建相应的二氧化碳捕集设备。化工产业和动力燃料产业未来有着相当高的碳需求，德国国内产生的二氧化碳有望作为（部分）潜在的碳源，对其加以利用。这一设想进一步推动了相关碳捕集与利用工艺的开发和测试工作。

障碍

路线图并没有从时间角度入手，深入探讨障碍因素。在笔者看来，

图 3 中障碍因素的演变过程大体说明了在哪些时间段（短期、中期、长期）可以或必须消除哪些障碍，以便实施上文所描绘的转型路径。

相比传统产品、工艺或进口水泥，目前的新材料、新技术的经济效益较低，这是阻碍大规模应用低碳粘合剂、混凝土和建筑技术的主要因素。碳中和¹⁵能源（电力、氢能和生物质）当前供应不足，这类能源在水泥行业的应用（尚）不具备经济效益。预计这类碳中性能源未来（至少在中期，也有可能长期）依然属于稀缺资源，价格也将保持在高位。这种稀缺性将限制可再生能源的利用，阻碍可再生能源制备热能、生产绿氢或运用绿电生产基于二氧化碳的化学原料和动力燃料。特定情况下，使用新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术的成本远比传统建筑工艺的成本要高。但供应商做宣传时会刻意强调新工艺比传统建筑方法更具成本优势。项目未对不同方案做经济效益分析，因此，我们很难确定各种方案的市场竞争力未来将有怎样的变化。碳捕集利用与封存工艺的资本和运行成本至少在中短期内将明显高于传统方式。

合适的原料供应量有限，这势必将在多方面阻碍熟料高效与资源高效的混凝土建筑技术的推广与应用：中短期内，高炉矿渣和粉煤灰的供应量减少将导致市场现有熟料高效型水泥、波特兰复合水泥和复合水泥的使用率下降。当前，德国煅烧粘土的供应量十分有限，这将在短期内阻碍波特兰复合水泥的大规模应用。因缺乏合适的再生骨料，再生混凝土的推广也会面临重重的挑战。

如何在建筑实践中运用新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术，这仍是目前的一大挑战。监管和组织架构方面也存在着诸多阻碍因素：一成不变的技术标准、规划未考虑二氧化碳效率、因使用不同的水泥和混凝土产品而造成额外的成本（没有相应的补偿）。这些因素（目前）阻碍了熟料高效方案在市场上的快速推广。总的来说，新产品和新型建筑技术将不断涌入市场，如何整合这些产品和技术将是一项长期的考验。路线图要求在短期内消除当下存在的主要障碍（例如规划未考虑二氧化碳效率的问题）。

本项目将现行的碳捕集利用与封存法律视为发展的最大障碍。欧盟碳排放权交易体系（EU ETS）¹⁶不接受碳捕集与利用的抵消，相关法律也不允许碳捕集与封存。此外，还有其他一系列的法律壁垒有待破除。这些法律壁垒制约了碳捕集与利用设施以及二氧化碳运输设施的设立。路线图计划在短期内消除这方面的障碍，推动碳捕集利用与封存工艺的普及。

人们很难从熟料产地运走二氧化碳，这是目前碳捕集利用与封存解决方案的主要障碍。除了法律问题外，碳基础设施的规划和建设还面临着另一重障碍：目前我们尚不清楚未来二氧化碳运输的起止点和运输量。这增加了管线规划的难度，因为管线在设计时便须设定二氧化碳的输送量，一旦管线建成，就无法再改变管网容量。路线图要求尽快澄清关于碳基础设施的重要未决问题，迅速完成规划，以便在转型路径规定的期限内建成所需的基础设施。

（预计）较低的社会接受度也将是阻碍二氧化碳管线建设的不利因素。根据此前基础设施建设项目的经验，地方层面可能会出现民众抵制活动或旷日持久的法律纠纷。计划建设碳基础设施的每个地点都很可能遭遇来自地方上的阻力。在整个建设期间，我们必须逐步逐地地扫清障碍。

行动领域

根据路线图近期创建以目标为导向的法律框架，尤其要尽快消除当前碳捕集利用与封存解决方案的监管障碍，具体措施包括对《德国二氧化碳封存法》（KSpG）的修订，以及批准对《伦敦议定书》第 6 条的补充。从中长期来看，应当持续制定和调整法律规则，从而配合和支持上述方案的实施。

路线图将在短期内确保低碳型的粘合剂、水泥、混凝土和建筑技术逐步具备经济效益，并创造公平的竞争环境。欧洲排放交易和欧洲层面正在谈判的碳边境调节机制（Carbon Border

¹⁵ 按直接排放量计。

¹⁶ 例外情况：根据欧洲法院的一项判决（“谢菲尔考克碳酸钙（Schaefer Kalk）判决”），允许使用二氧化碳生产沉淀碳酸钙。

Adjustment Mechanism，缩写为 **CBAM**）是实现上述目标的重要工具。如果在短期或中期内，不采取额外措施竞争机制无法产生经济效益，则需要找到适当方式（例如借助气候保护合约）来减缓资本支出（**CAPEX**）和运营支出（**OPEX**）。

路线图规定，应在中短期内邀请各界参与制定跨行业的综合能源战略。最迟在中期内，在可再生能源大规模应用于熟料煅烧工艺之前，该战略须确保有充足的投资资本流向正确的方向。

为了积累知识和实践经验，以便为二氧化碳和资源高效型建筑方式的市场推广做好准备，在短期内建立高度专门化的市场（利基市场），这类市场对相应产品及建筑方式产生特定需求，并且随着时间的推移，规模将逐步扩大。上述举措主要针对新型粘合剂、混凝土和建筑技术，因为其所需作业步骤不同于当前常见的方法步骤。公共部门应进行可持续采购，构建相关细分市场。

根据路线图，必须持续将新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入到建筑实践相关法规须不断采纳新的发展要求，行动主体也必须与时俱进地不断更新知识。其中一项核心措施是将碳足迹纳入建筑物的考察范围，应在短期内予以落实。

建筑业全面发展循环经济是一项中长期的挑战，需要在混凝土拆除废弃物的破碎料分离方面取得技术进步。着手实施一系列的举措迫在眉睫，包括加强再生混凝土中可再生骨料的应用。

此外，应尽快澄清待建碳基础设施的未决问题（如技术和非技术性准入条件）、（初步）规划管网路线和运输流量。在此基础之上，中短期有望开启基础设施建设，确保最迟到 2030 年可以从首批地点运走二氧化碳，并按照转型路径的规划开始大规模运用碳捕集技术。随后将继续扩建碳基础设施，涵盖越来越多的水泥厂，规划也将根据实际情况不断做出调整。关于输送网络接入点的问题，到底应该保证所有地点的“无差别”接入，还是根据运输距离和地理条件，依照效率标准¹⁷来甄选接入点，项目参与方对此持有不同意见。

一场围绕碳基础设施的必要性、范围和具体设计的社会对话很快将启动，从而为基础设施的规划和建设奠定基础。鉴于时间紧迫且（水泥行业的）目标减排量大，无法保证整个过程符合“先社会对话，再规划，最后建设基础设施”的常规流程。对话、规划和初步制定二氧化碳运输方案等环节很可能有部分时间交叠，（必须）同时进行。这就要求我们在开展社会对话时认真审慎，沟通清楚相关各方的目标和决策权。

为了持续改进现有方案并在必要时寻找和开发创新的解决方案，必须在路线图涵盖的整个时间范围内开展研发工作。

表 7 简明列示了行动领域的核心措施（也可参见第 6 章，以及实施措施的主要行动主体）。路线图建议应吸纳其他行动主体积极参与，出谋划策（参见图 17 以及第 4 章开头表 6 的利益相关方群体说明）。

表 7 简要列示了所述行动领域的核心措施，以及实施措施的主要行动主体。其他行动主体也应作为顾问与支持方参与进来（参见

¹⁷ 允许/应该投入多少成本（如管线长度等）来运输多少二氧化碳量。

图 3)。

表 1: 路线图行动领域核心措施的实施主体

行动领域	措施	行动主体
法律框架	修订《德国二氧化碳封存法》(KSpG) (扩大二氧化碳的使用范围, 目前限制于封存)	德国联邦政府, 德国联邦经济和气候保护部
	扩大《联邦污染防治法》(BImSchG) 的适用范围, 覆盖碳捕集与利用的二氧化碳捕集设备 (目前只允许碳捕集与封存)	德国联邦政府
	批准对《伦敦议定书》第 6 条的补充 (支持用以封存的跨境二氧化碳运输)	由德国联邦政府批准 与二氧化碳封存地所在国家签订双边协议 (或在欧盟层面制定超国家法规), 并与二氧化碳供方企业谈判
打造公平竞争环境	碳边境调节机制 (CBAM)	欧盟委员会、理事会和议会
	碳差价合约 (CCfD)	企业与联邦政府签约, 降低气候友好型生产方式的额外成本 (德国联邦经济和气候保护部开发的国家碳差价合约试点方案)
跨产业部门的综合能源战略	系统开发战略 ¹⁸	德国联邦经济和气候保护部, 学术界参与
建立并推广低碳建筑的高度专门化市场 (利基市场)	可持续的公共采购	公共部门作为建筑开发商 (联邦政府、联邦州、城镇、公共企业)
	宣传活动和信息服务 (特别针对规划师及建筑业主)	混凝土生产企业、规划师、建筑业主和行业协会
	修订建筑和产品标准	建筑业主、建筑监理单位 德国钢筋混凝土委员会 (DAfStb) 框架内的建材行业、建筑行业、 科研人员 and 顾问工程师/测试工程师
将新型水泥/粘合剂/混凝土/建筑技术融入建筑实践	为了支持在建筑实践中引入新型水泥和混凝土建筑技术, (尤其要为建筑师和规划师) 提供信息、培训和进修机会	施工监理、行业协会、德国钢筋混凝土委员会 (DAfStb) 高校和科研机构 (比方说可以纳入教学内容); 行业协会和机构, 如“混凝土信息中心” (负责提供信息和培训)、德国钢筋混凝土委员会 (DAfStb) (提供规划协助)
	引入建筑物的碳足迹 (强制标识, 必要时分类和限制)	联邦政府和各部委 (德国联邦经济和气候保护部; 联邦住宅、城市发展和建设部) 是引入碳足迹强制义务的行动主体

¹⁸ www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html

行动领域	措施	行动主体
		搭建建筑物排放数据库，关注建筑材料，可考虑由德国可持续建筑协会（DGNB eV）负责这项任务。
在建筑行业全面发展循环经济	有关再生混凝土、混凝土拆除废弃物分离、模块化建筑的研究、试点项目和示范项目	科研人员、混凝土制造商、水泥/混凝土的综合类企业、设备制造商、规划师/建筑师
碳基础设施的规划与建设	澄清未决问题，如技术和非技术性的准入条件、（初步）规划路线和运输量	燃气网运营商、联邦州（执行/审批）、联邦政府/监管机构（监管和碳管理战略）、碳源所有者企业
有关碳基础设施的社会对话与地方参与过程	发起、组织和实施社会参与活动及对话	联邦政府/州政府、有学者和企业参与的市民社会组织、燃气网运营商、专业的对话/沟通管理机构
研究与开发	研究直接电气化、氢能应用、新型水泥和混凝土、实现二氧化碳永久固定的创新工艺	企业、高校和研究机构（包括行业协会），视情况也包括公共资助机构

1 背景

《巴黎气候协定》旨在将全球平均气温升幅控制在低于工业化前水平 2 摄氏度之内。为此，欧盟计划到 2050 年实现温室气体净零排放，并通过了《欧盟绿色协议》（EU Green Deal），包括一项行动计划和《欧洲气候保护法》提案。在国家层面上，德国联邦政府出台的《气候保护法》¹⁹旨在带领德国到 2045 年实现温室气体中和，中期目标是到 2030 年德国温室气体排放量须较 1990 年减少 65%。

水泥行业约占全球碳排放量的 7%（IEA，2021）。2021 年，水泥行业排放近 2100 万吨，约占德国总排放量的 2.7%（根据德国联邦环境署和德国水泥协会 2022 年数据自行计算得出）。由于熟料生产过程会产生二氧化碳，因此水泥行业是最难脱碳²⁰的行业之一。可见，减少水泥行业排放对实现巴黎气候目标至关重要。

由于全球、欧洲和国家层面的减排目标未对行业减排量做出具体规定，因此无法制定明确的水泥行业减排路径。²¹但水泥行业在全球（GCCA，2021）、欧洲（Cembureau，2020）和国家（VDZ，2020a）层面上制定了 2050 年气候中和路线图。本项目脱碳路线图设定的目标是（最迟在）2050 年实现温室气体中和，并在与利益相关方的讨论中得到证实。

水泥行业脱碳的可用技术和措施涵盖混凝土建筑产业链的各个环节，在实现完全脱碳方面发挥着不同的作用。学界（CSI / ECRA，2017；Nolting et al.，2018；Ruppert et al.，2020；Schneider，2019；Scrivener et al.，2018）对现有技术措施进行了梳理，并在各个层面（德国、欧盟、全球）的路线图中进行了总结（Cembureau，2020；Favier et al.，2018；GCCA，2021；IEA/CSI，2018；Material Economics，2019；VDZ，2020a）。

目前看来，二氧化碳密集型熟料的市场需求将不断减少，但不可能完全消失，这是水泥行业转型面临的重大挑战。我们应减少混凝土建筑产业链上的熟料用量，探讨如何处理“不可避免”的二氧化碳。谈及这些主题时，构建或调整产业链都是核心议题，需要水泥行业（狭义定义）以外的其他行动主体积极参与。这也正是本项目的意义所在。本文分析了技术减排杠杆，接着确定了相应措施与实施方。

¹⁹ 2021 年 8 月 31 日的法律修正案

²⁰ 这里使用“脱碳”概念描述实现气候中和过程。严格来说，这个概念并非最恰当的用词，因为碳是石灰石的重要成分，即便在未来气候中和的水泥行业中也发挥一定的作用。

²¹ 德国在国家层面为整个产业部门规定了到 2040 年的行业目标。

2 基础、目标和方法

“工业生产脱碳”项目子任务 3 旨在开展广泛的利益相关方对话，确定水泥行业脱碳路线图。路线图帮助工商业和政策决定者了解各个时期转型过程中的内在关系、先决条件和潜在措施，深入分析未来的机遇和风险，确定未来的发展步骤，明晰责任。可见，绘定路线图不仅有助于制定战略，也是对外宣传发展目标和政策框架的重要手段。本项目旨在拟定路线图，总结所有要点，明确最主要的矛盾和最迫切的行动领域，不强求各方一定要就路线图达成完全的共识。

在制定路线图时，项目圈定的研究范围如下：德国水泥行业的脱碳目标是尽量减少水泥行业的碳排放；剩余的少量排放²²须通过水泥和混凝土行业自行抵消，例如使用生物燃料，采用二氧化碳捕集技术并对捕获的二氧化碳做永久封存。原则上，我们也可以借助直接空气碳捕集技术、植树造林或类似的排放抵消机制，但上述领域不是此次项目的重点研究对象。我们在研究中假定混凝土建筑部门的建设工作总量保持不变。随着建筑需求方式的改变（例如人们对木结构建筑的偏好），水泥行业的碳排放可能降低，但这一议题也不属于本次研究的范畴。我们将 2050 年作为脱碳的目标节点²³。

2.1 路线图的基础

2.1.1 路线图：显示各时间段的多维度发展变化

人们对路线图的定义不尽相同。总体而言，路线图是用图形来呈现各个时间段的演变过程。路线图的共同点包括：（1）涉及未来（非预测数据），（2）展现的各个方面具有时间上的关联，（3）致力于实现一个愿景或目标。此外，路线图通常有几个层级（也称为“Layer”）。企业路线图通常聚焦技术、市场和产品，而政策战略路线图通常阐述转型的驱动因素、阻碍以及实现转型目标的具体措施。根据侧重点不同，可详细划分转型维度（例如细分为社会、经济和技术驱动因素等）。

2.1.2 制定路线图：与利益相关方的互动过程

在路线图绘制过程（Möhrle & Isenmann, 2008）中，与受影响领域的利益相关方开展互动至关重要。与纯粹的规划文件不同，绘制路线图的意义重大，必须综合考量各种要素在一定时间跨度内的相互关系，从中发现矛盾、冲突和欠缺。此外，各行各业的行动主体也可借此机会了解矛盾焦点，相应调整自身战略。

在绘制路线图的过程中，应综合环境视角与内部视角。人们经常讨论的问题如下：

- ▶ 为何要采取行动？内部和外部动因（例如气候保护目标）
- ▶ 预期将制定怎样的政策框架（例如社会诉求）？
- ▶ 目前状况如何？——现状
- ▶ 发展方向——愿景/替代方案/战略目标
- ▶ 如何实现目标？——行动领域（监管、投资、交流沟通）
- ▶ 如何解决问题？——资源、技术、行动主体

²² 例如来自无法被全部捕获的二氧化碳，因为我们在技术上无法实现 100% 的碳捕集率。

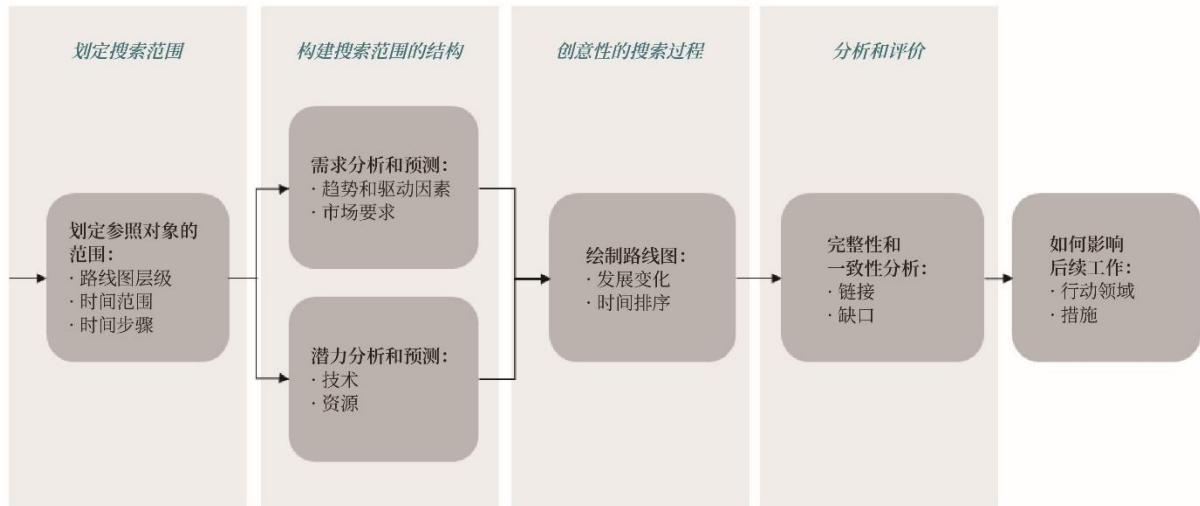
²³ 本项目于 2020 年 2 月启动，所以在德国《联邦气候保护法》2021 年年中的修订法案决定将德国气候中和的目标年份从 2050 年提前到 2045 年之前，项目就已经制定好了大致的路线图框架。本项目成果为定性研究结论，即便修订后的《联邦气候保护法》规定的目标更高，研究成果仍然有效。

► 何时做什么？——时间框架和依赖关系

通过与各个领域的利益相关方互动，我们将上述问题的答案汇编成路线图，并在本地实施。

下图展示了路线图绘制过程，共分五个阶段，过程与结果的视觉呈现一样都很重要。

图 4： 绘制路线图的一般步骤



资料来源：根据 Specht/Behrens 2008、弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所（Fraunhofer ISI）的资料自行绘制。

2.1.3 本项目选择的路线图层级

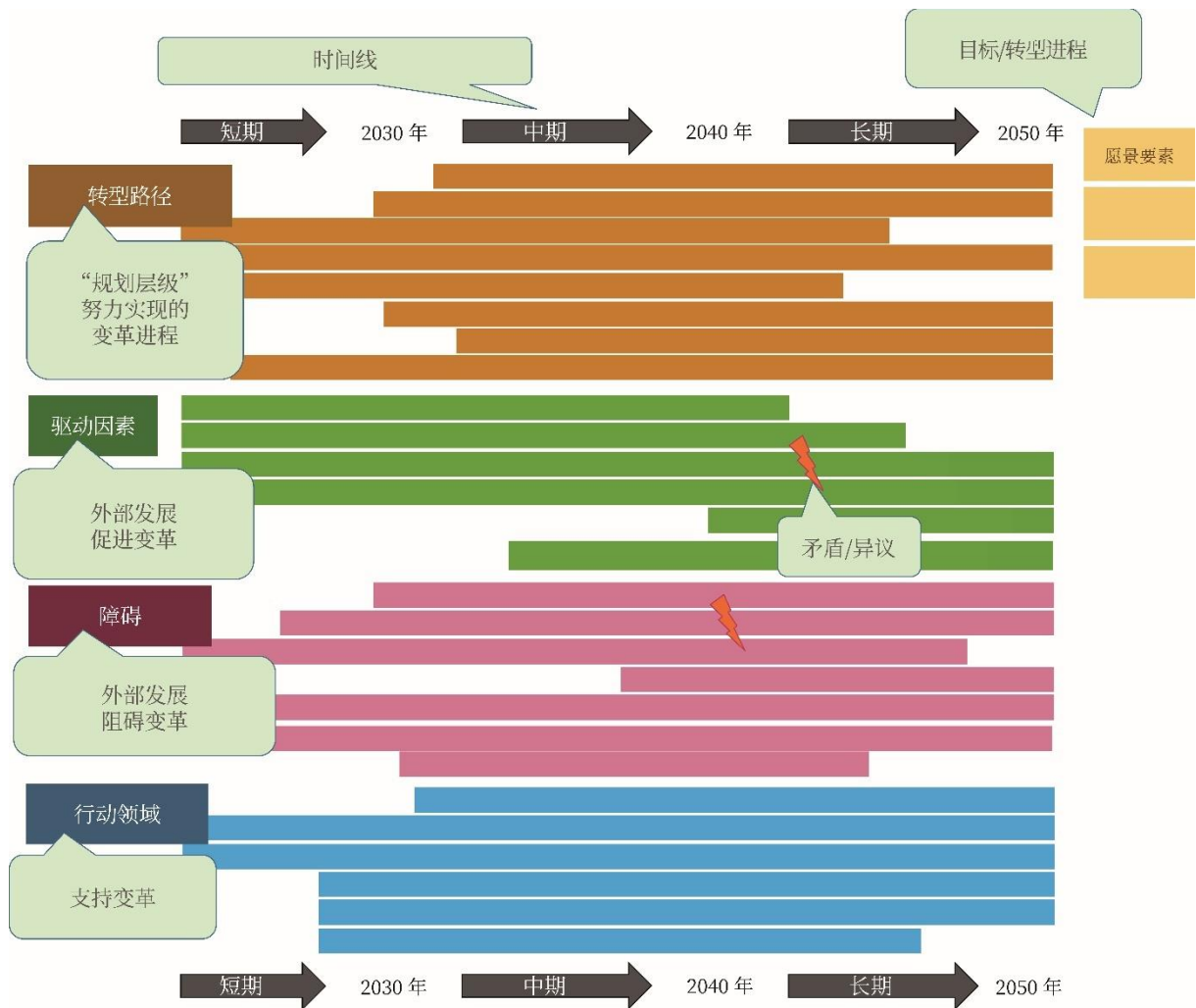
与利益相关方协商后，我们决定从以下五个层级出发绘制路线图：

- **愿景要素：**
2045/50 目标系统的主要特点
- **市场/技术的转型路径：**
逐步实施和推广创新的（技术）方案
- **驱动因素：**
有利于水泥行业实现碳中和转型的外部因素
- **障碍：**
阻碍水泥行业实现碳中和转型的技术、经济、监管和社会因素
- **行动领域/措施：**
消除或减少障碍的方案，旨在促成或加快转型。

实现脱碳目标（2050 年，见上文）分为三个时间段：

- **短期：** 至 2030 年
- **中期：** 2030 年至 2040 年
- **长期：** 2040 年至 2050 年

图 5: 工业生产脱碳路线图的示意图、选定层级与时间线

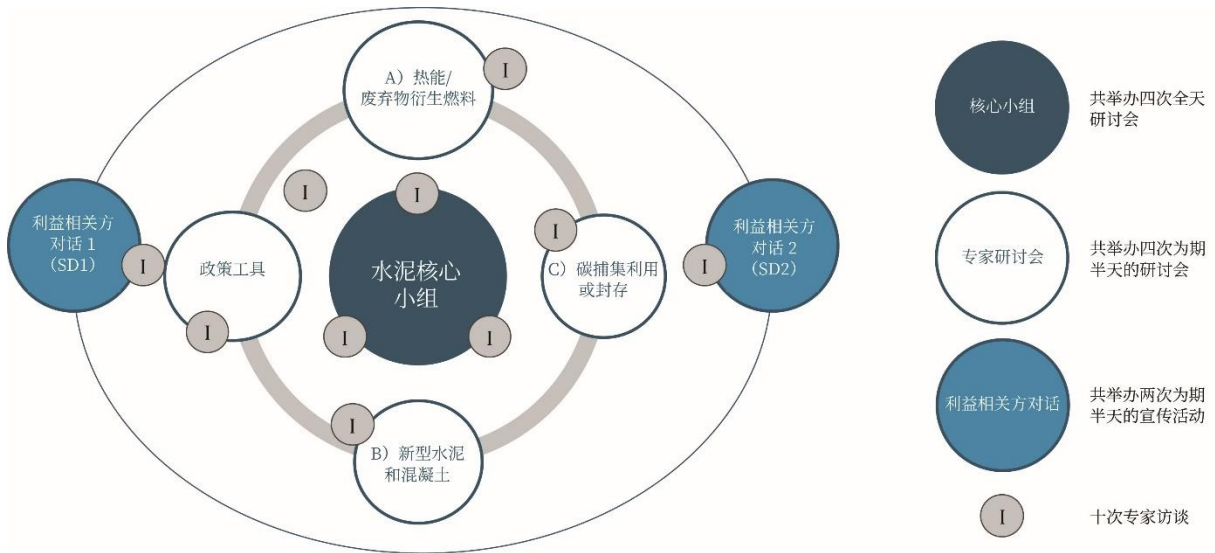


资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

2.2 利益相关方参与的方法步骤

图 6 简要介绍了我们如何在路线图绘制的对话过程中鼓励利益相关方参与，以及整合各方专业知识的方法步骤。

图 6： 通过核心小组、专家访谈、研讨会和利益相关方对话，整合利益相关方的专业知识



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

表 2 按时间先后顺序列示了每场对话、主要议题和成果。

表 2： 子任务 3 “水泥” 框架内举办的活动

小组	日期	主题
核心小组会议		
第一次核心小组会议	2020 年 11 月 4 日	愿景和目标
第二次核心小组会议	2021 年 6 月 15 日	技术、资源与转型路径
第三次核心小组会议	2021 年 11 月 23 日	制定路线图与工具的草案
第四次核心小组会议	2022 年 5 月 17 日	汇总路线图：最终关联、时间范围、工具与行动主体
利益相关方对话		
利益相关方对话 1	2021 年 11 月 2 日	DekarbInd 项目的中期成果
利益相关方对话 2	2022 年 6 月 23 日	DekarbInd 项目的最终成果

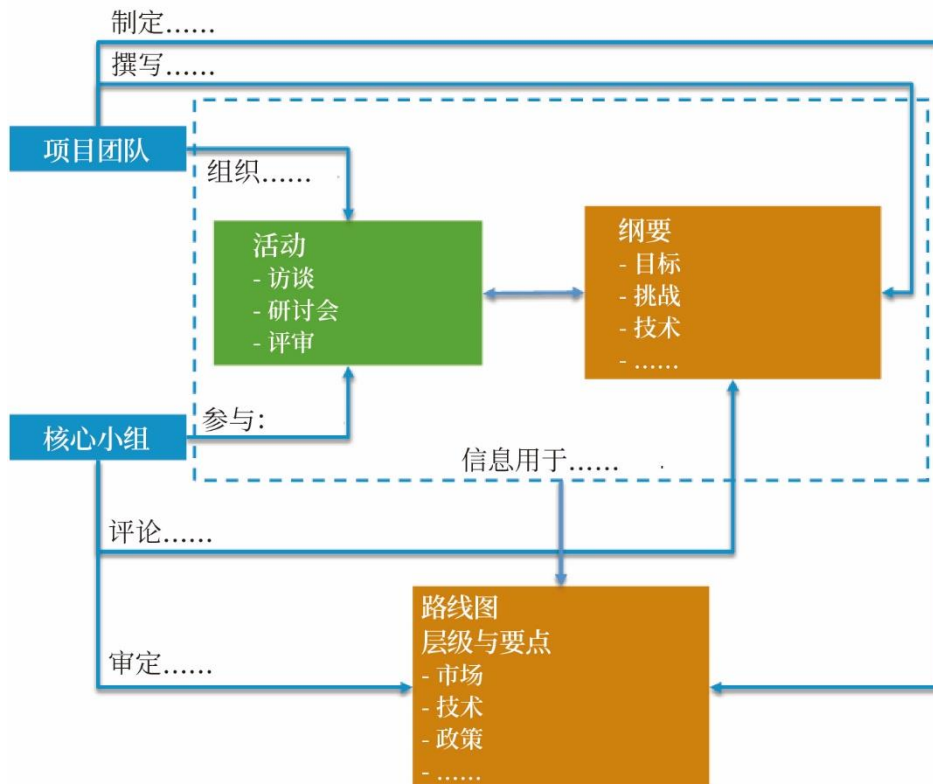
专题研讨会

小组	日期	主题
专题研讨会 1	2021 年 3 月 10 日	替代燃料
专题研讨会 2	2021 年 6 月 24 日	碳捕集与利用 (CCUS)
专题研讨会 3	2021 年 9 月 28 日	新型水泥和混凝土
专题研讨会 4	2022 年 4 月 7 日	(政策) 工具 (重点: 新型水泥和混凝土建筑技术、碳捕集利用与封存)

项目在初期建立了 **核心小组**，即核心利益相关方小组，负责提出专业意见。核心小组由来自产业界、行业协会、政府机关和主管部门、社群团体和学术界的代表组成，总共举行了四次会议（见表 2）。

核心小组的首要任务是描绘愿景、制定措施、确定转型路径和提出行动建议，回顾和讨论每个工作步骤的成果，贡献自身的专业知识，并对路线图加以完善。项目团队与核心小组的主要合作关系如下图所示。

图 7： 核心小组与项目团队之间的互相配合



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

通过核心小组的参与，项目确定了多个需要深入探讨、对水泥行业脱碳至关重要的专题领域。我们围绕上述专题开展了一系列专家访谈，每期访谈的末尾都安排了专家研讨会。例如，废弃物衍生燃料研讨会专门邀请了废弃物处置与预处理领域的相关人士，碳捕集利用与封存研讨会则邀请了化工和气体部门的代表。

表 3 显示了水泥行业核心小组的构成，并按组别和机构进行分类。共有来自 18 个机构的 33 名利益相关方参加了四场核心小组会议。

表 3： 水泥核心小组的组成

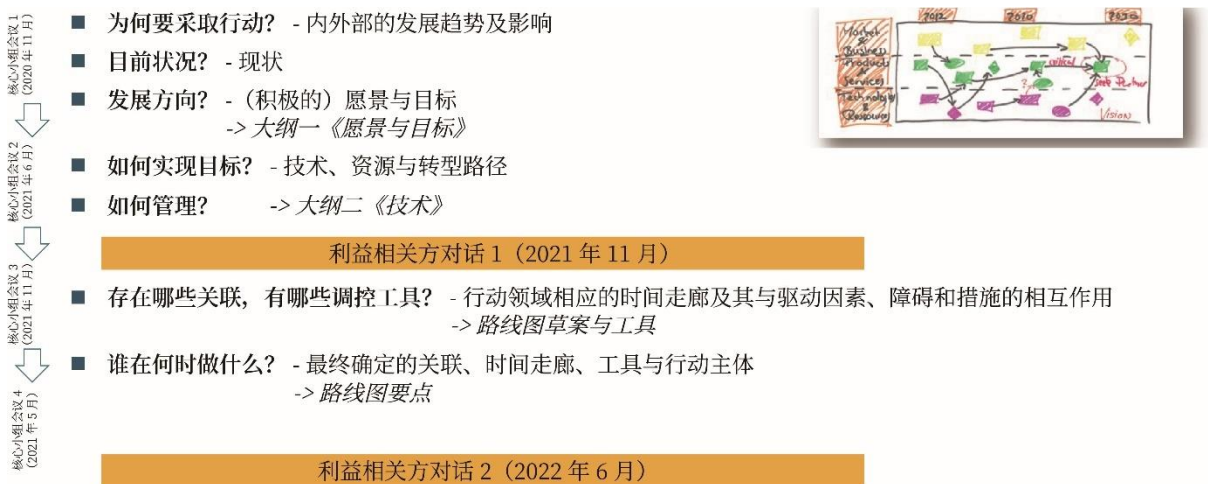
利益相关方群体	机构
生产商	CEMEX 水泥厂有限公司（CEMEX Zement GmbH）、海德堡水泥厂股份公司（HeidelbergCement AG）、Schwenk 水泥厂两合公司（Schwenk Zement KG）、Spenner 有限公司（Spenner GmbH & Co. KG）
机器和装备制造	德国机械设备制造业联合会（VDMA）
行业协会和专业机构	德国预拌混凝土行业联邦协会（BTB）、德国钢筋混凝土委员会（DAfStb）、德国装配式混凝土建筑专业联合会（FDB）、德国化学工程与生物技术学会（DECHEMA）、德国水泥协会（VDZ）
社群团体	Bellona Europe、世界自然基金会（WWF）德国分会
政府和主管部门	阿恩斯贝格（Arnsberg）行政区政府，德国联邦环境、自然保护与核安全部（BMUV），德国联邦经济与气候保护部（BMWK，前身为德国联邦经济和能源部（BMWi）），德国联邦环境署（UBA）
学术界	魏玛包豪斯大学（芬格尔建筑材料研究所）、能源密集型产业气候保护能力中心（KEI）

在整个项目期间，共有 120 多名利益相关方参与了核心小组会议、利益相关方对话、专题研讨会与访谈活动。

2.3 核心小组会议

作为路线图绘制过程中的核心利益相关方小组，水泥核心小组（见表 3）总共召开了四次（线上）研讨会（核心小组会议）。会上，小组专家贡献了专业知识，围绕着图 8 提出的路线图展开讨论，制定/整合了纲要文件和路线图（草案）。下文将详细介绍每场核心小组会议的主要内容。

图 8: 四次核心小组会议的路线图绘制过程和重点问题示意图



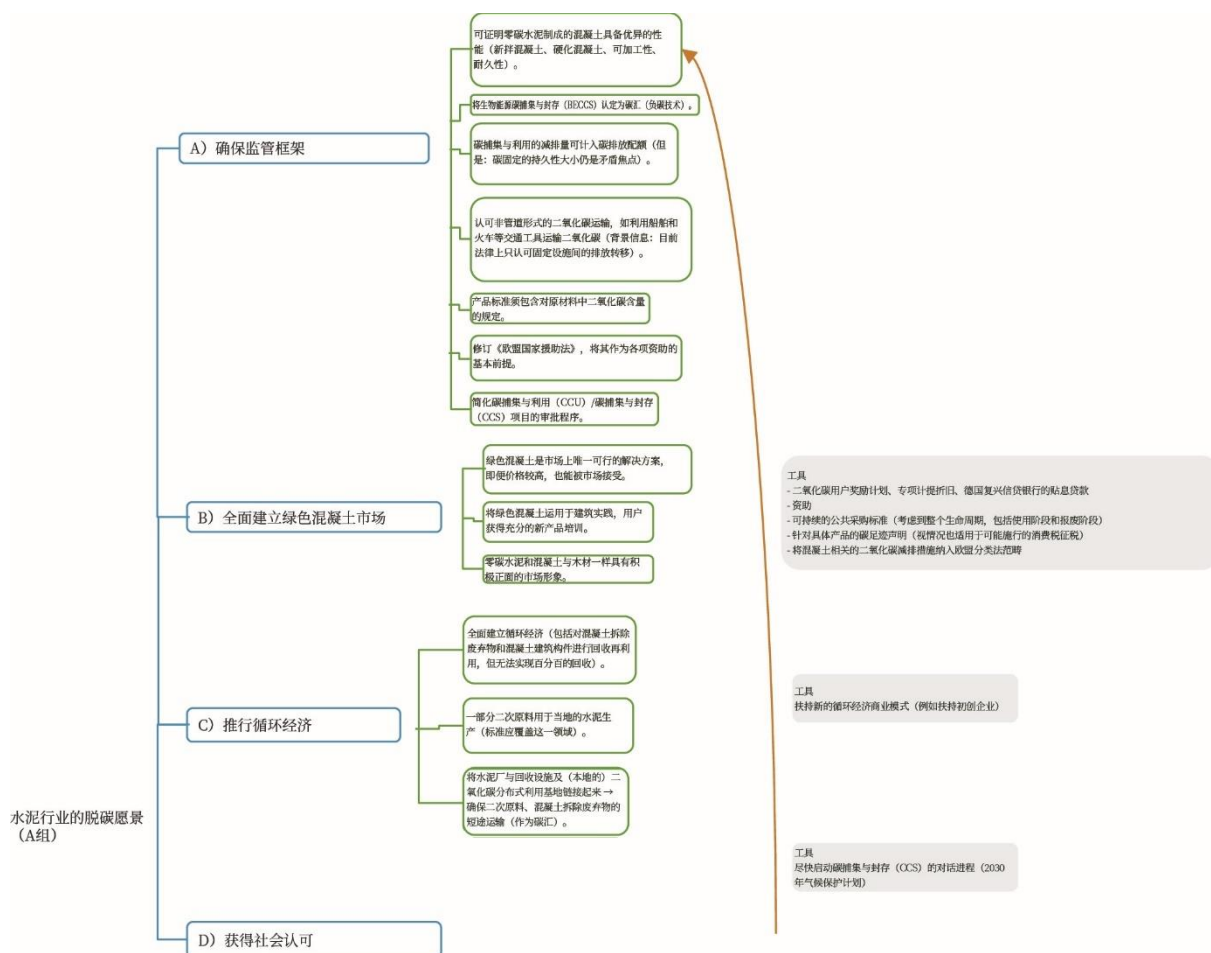
资料来源: 自行绘制, 伍珀塔尔研究所

2.3.1 核心小组会议 1: 愿景和目标

要绘制水泥行业 2045 年完全脱碳路线图, 所有利益相关方必须首先就脱碳目标达成共识。2020 年 11 月召开的首次线上核心小组会议 (KGT 1) 收集并讨论了各方观点, 就关键议题和主要挑战达成共识, 并记录了争议点。这是制定共同路线图的基础。

会议采用现场调查、分组讨论、主持式讨论等形式。首先, 与会者通过集思广益的头脑风暴收集了积极的愿景目标, 然后分两组进行讨论, 并在全体会议上做了总结。第一次核心小组会议在思维导图中记录了技术、环境、经济、政策、市场、劳动、数字化和社会等方面的目标, 为《2045 年水泥行业脱碳的愿景和目标》奠定基础 (参见章节 3.1)。

图 9： 第一次核心小组会议关于水泥行业脱碳积极愿景的思维导图摘录



资料来源：自行绘制，弗劳恩霍夫系统与创新研究所、伍珀塔尔研究所

2.3.2 核心小组会议 2：技术

2021 年 6 月，项目线上召开了第二次核心小组会议，主题为《水泥行业脱碳的技术与措施》。会议旨在概述水泥行业脱碳的最新技术以及小组专家对该领域发展趋势的评估。讨论聚焦直接受影响的利益相关方，即在实践中落实此类技术的人员。会议介绍了技术转型的现状，总结了利益相关方对具体技术的意见。

在会议筹备期间，项目组与核心小组成员和委托方协商确定了以下三个与水泥行业脱碳相关度最高的专题，并进行了详细讨论：

- ▶ 专题 1 热能（熟料煅烧过程）
- ▶ 专题 2 新型水泥和混凝土建筑技术
- ▶ 专题 3 碳捕集利用与封存（CCUS）

研讨会基于前事先准备的纲要，对关键技术进行了讨论和总结。与会者讨论了以下关键议题：

- ▶ 路线图应重点关注哪些技术？
- ▶ 实施过程中最重要的行动领域是哪些？

- ▶ 针对即将召开的第三次核心小组会议：
哪些行动主体可以在哪些行动领域做出积极的贡献？

为了呈现各方意见，我们开展了（非代表性）**调查**，要求行动主体就三大技术的**有效性和面临的挑战**做出评估，并对评估结果进行量化分析，采用1分（低）到5分（高）来打分，并用图表加以总结：

- a) 熟料煅烧过程中的不同能量源；
- b) 新型水泥和混凝土建筑技术；
- c) 碳捕集利用与封存。

针对提出的六个问题，每个专题都生成了**结果图**，包含对挑战大小（y轴）和相应措施有效性高低（x轴）的定量回答。图表显示了四个象限：

1. 低垂的果实：

该象限包含的措施非常有效，且挑战小。应立即着手实施，并将其列为优先实施事项。

2. 高悬的果实：

该象限包含的措施非常有效，但挑战大。这类措施十分有助于实现完全脱碳的目标，应列为优先发展事项。同时，须通过开展进一步研发、出台配套扶持政策措施（规定、促进政策、沟通宣传），甄别和克服（重大）挑战。

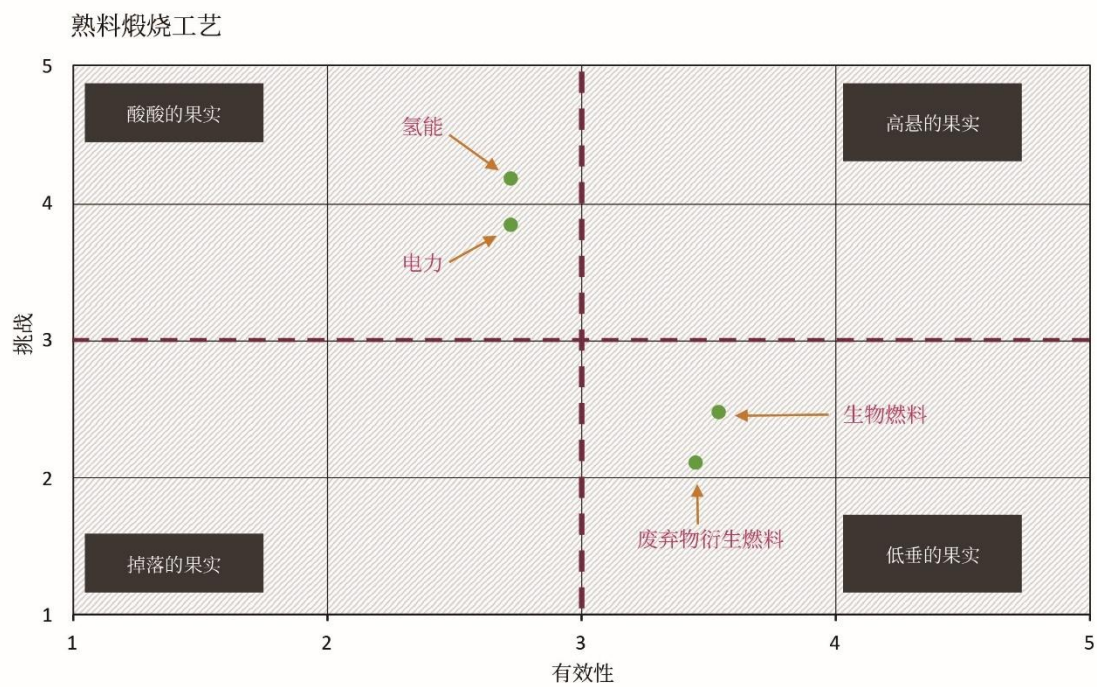
3. 酸酸的果实：

该象限包含的措施有效性较低，且挑战巨大。这类措施也能为实现脱碳做出贡献，但效果十分有限，仅限于某些小众的应用领域。该领域也需要大力开发及制定配套措施，但不应将其作为工作重点。

4. 掉落的果实：

该象限包含的措施有效性较低，但挑战也较小。与“低垂的果实”一样，我们应优先考虑并立即开展相应工作，不过还可能还需要一些支持，用以克服实施过程中的困难。

图 10: 熟料煅烧工艺领域（非代表性）调查结果图示

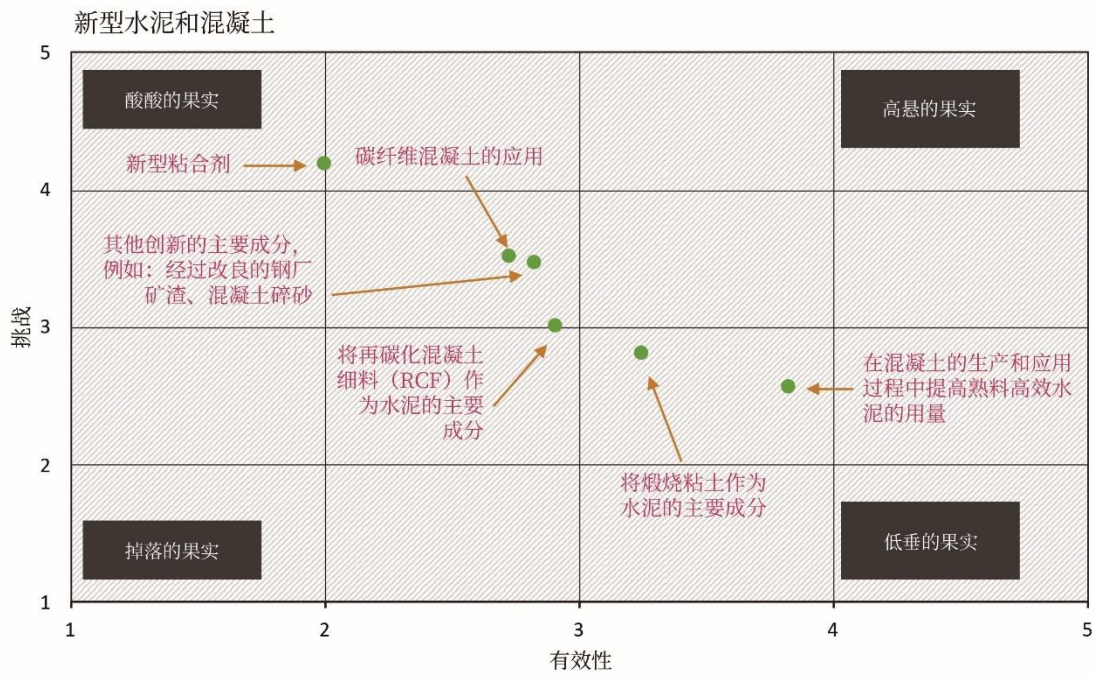


在第一次核心小组会议上，与会者针对不同领域拟定了目标并将其记录在思维导图中。

我们应从下列方面入手，实现水泥行业的脱碳目标：A) 确立监管框架；B) 全面建立绿色混凝土市场；C) 实施循环经济。可采用的手段包括客户激励计划和推广新的循环经济商业模式等。

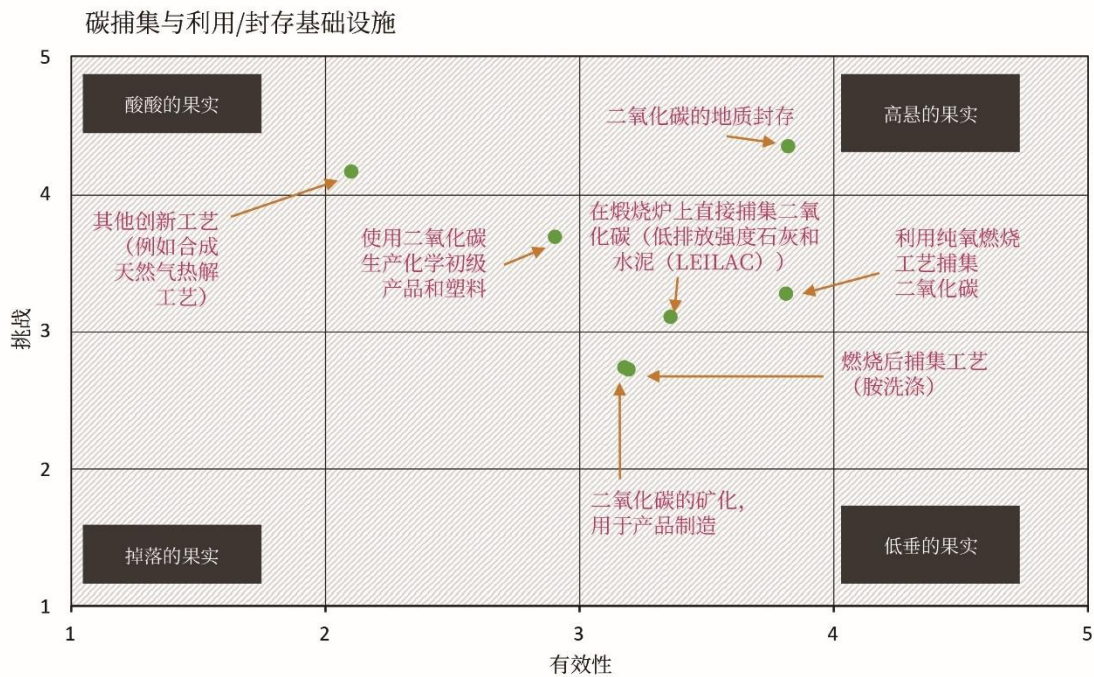
资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

图 11: 新型水泥和混凝土建筑技术领域（非代表性）调查结果图示



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

图 12: 碳捕集利用与封存及基建领域（非代表性）调查结果图示



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

2.3.3 核心小组会议 3：路线图（第一部分）

2021 年 11 月召开了第三次线上核心小组会议，主题是《路线图要点（第一部分）》。会前，项目团队基于前期的工作成果，制定了三个详细路线图草案，分别涉及：A) 热能；B) 新型水泥和混凝土建筑技术；C) 碳捕集利用与封存。会上，参会人员借助在线协作沟通工具 Miro-Board，进一步深入绘制路线图。会议的主要目标是介绍路线图草案，并记录利益相关方的反馈意见。路线图讨论的核心内容是“层级”（见章节 2.1）：

- ▶ 转型路径（技术与市场）；
- ▶ 驱动因素；
- ▶ 障碍；
- ▶ 行动领域/措施（用于实施）；

以及上述因素之间的相互作用（参见章节 2.1.3 的图 5）。

路线图旨在确定重要的内在关系，调整措施、行动领域的起始时间范围，及其与驱动因素、障碍和措施的相互作用。为实现这一目标，推荐采取以下措施：

- ▶ 确定关键的减排措施和相应的技术路线；
- ▶ 确定实施技术措施面临的主要困难；
- ▶ 选定主要行动领域。

核心小组成员积极反馈，达成共识。也有人提出异议并论述了观点理由，指出差距所在并做了补充。会议详细记录了反馈意见，并在修订路线图时予以考虑。这也是第四次核心小组会议的讨论议题。

2.3.4 核心小组会议 4：路线图（第二部分）

2022 年 5 月举行的第四次核心小组会议展示了修订后的路线图草案。除了根据第三次核心小组会议成果（见上文）做出调整外，修订版还吸纳了（特别是有关政策工具的）专题访谈、专题研讨会以及项目组通过文献研究得出的结论。第四次核心小组会议旨在与行动主体共同确定路线图及相关行动领域的（政策）工具。

会议具体内容涵盖三个主要脱碳领域：*A）熟料煅烧工艺；B）新型水泥和混凝土建筑技术；C）碳捕集利用与封存*。此前于 2022 年 4 月召开的政策工具研讨会则重点讨论了 B）和 C）两个专题。本次会议介绍了经研究证实的相关度最高的行动领域，并围绕关键问题展开了讨论：

B）新型水泥和混凝土建筑技术的核心行动领域：

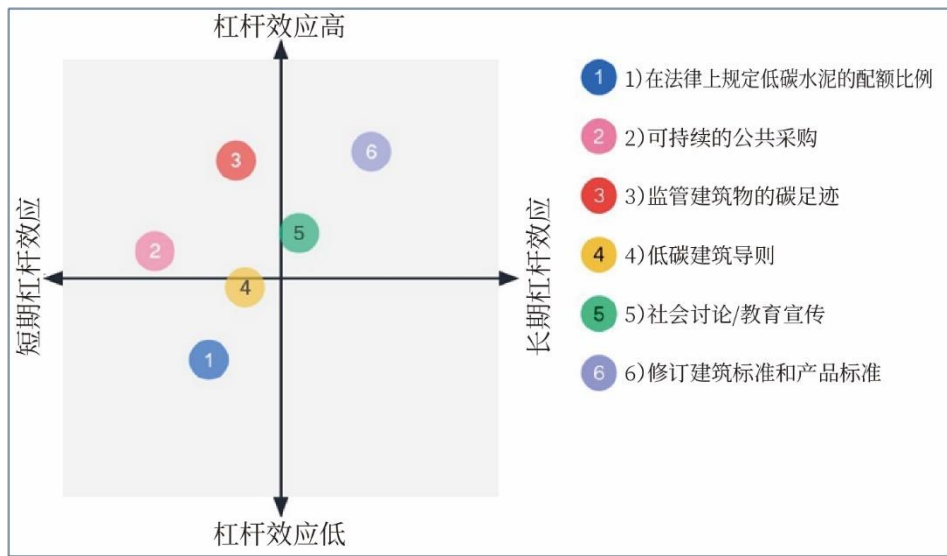
- ▶ 建立市场/推广低碳的建筑方法（低碳水泥的占比规定、可持续的公共采购）
- ▶ 将新型水泥和建筑技术融入建筑实践（修订建筑标准和产品标准、关注建筑的碳足迹、加强教育宣传）

C）碳基础设施的核心行动领域：

- ▶ 碳基础设施的法律框架条件
- ▶ 碳基础设施的规划和建设过程
- ▶ 基础设施的接入条件
- ▶ 社会讨论和公众参与过程

针对“*新型水泥和混凝土建筑技术*”主题领域，项目组开展了一项（非代表性的）调查，考察了行动主体如何评估上述六大工具的杠杆效应（效应从低到高）及实施速度（从短期到长期）。意见调查结果见图 13。反馈显示，参与调查的人员认为，修订建筑标准和产品标准（第 6 项）以及碳足迹监管（第 3 项）具有很高的杠杆效应。他们认为，后者将在中短期内发挥重要作用，而前者属于长期规划范畴。

图 13: 在引入新型水泥和混凝土建筑技术的过程中，各种工具杠杆作用的（非代表性）调查结果



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

2.4 访谈与专题研讨会

项目组织了十次专家访谈和四次旨在深入探讨重点领域的专题研讨会（见表 4）。访谈采用半结构化的视频会议形式，准备了含关键问题与讨论基础的 PPT 文件，将其作为访谈提纲。每个访谈系列结束后会举办专题研讨会。研讨会采用主旨发言的形式，总结了此前个人访谈的结果，并邀请了更多核心小组成员及外部专家来评审和讨论相关议题。

表 4: 访谈和专题研讨会清单

专题	访谈对象或研讨会	重点内容
熟料煅烧工艺	CEMEX 水泥有限公司	脱碳措施（熟料煅烧工艺以及综合性）
	废弃物衍生燃料研讨会（2021 年 3 月）	废弃物衍生燃料：可用量和可用性（纲要文件三）
碳捕集利用与封存及基础设施	卡塞尔大学 环境系统研究中心（CESR）	化工行业的碳捕集与利用
	海德堡水泥股份公司	再碳化混凝土细料（RCF），福特雷（Fortera）工艺（捕集水泥厂排放的二氧化碳，将其与氧化钙结合制成活性碳酸钙——译者注），在二氧化碳环境下的硬化，碳捕集
	CEMEX 水泥有限公司	碳捕集利用与封存
	碳捕集利用与封存研讨会（2021 年 6 月）	碳捕集利用与封存及基础设施（纲要文件四）
新型水泥和混凝土建筑技术	魏玛包豪斯大学（芬格尔建筑材料研究所）	新型水泥、新型粘合剂、替代原材料

专题	访谈对象或研讨会	重点内容
	德国预拌混凝土行业联合会 (BTB)	预拌混凝土的脱碳潜力
	德国装配式混凝土建筑专业联合会 (FDB)	预制混凝土的脱碳潜力
	新型水泥和混凝土建筑技术研讨会 (2021 年 9 月)	新型水泥和混凝土建筑技术的潜力与挑战 (纲要文件五)
(政策) 工具/市场/社会接受度	德国联邦经济和气候保护部 (BMKW)	水泥行业背景下的新型碳捕集利用与封存基础设施
	德国水泥协会 (VDZ)	新型水泥和混凝土市场、水泥行业的碳捕集利用与封存基础设施
	德国钢筋混凝土委员会 (DAfStb)	新型水泥和混凝土市场
	政策研讨会 (2022 年 4 月)	针对新型水泥和混凝土以及碳捕集利用与封存的 (政策) 工具 (纲要文件六)

2.4.1 废弃物衍生燃料 (ABS) 研讨会

为期半天的 (线上) “水泥行业未来替代燃料的可用量与可用性” 研讨会于 2021 年 3 月 10 日举行。参会人员包括来自以下行动主体的 16 名成员: 水泥生产商 (4 人)、废弃物处置公司 (3 人)、企业协会 (1 人)、咨询公司 (1 人)、学术界 (2 人)、政府机关和主管部门 (1 人) 和项目团队 (伍珀塔尔研究所代表 3 人和弗劳恩霍夫系统与创新研究所代表 1 人)。

此次研讨会旨在深入了解水泥行业使用废弃物衍生燃料的潜力 (2030 年至 2050 年的阶段展望), 探讨废弃物衍生燃料的可用量、可用性与相关法律框架。研讨会首先借助 Mentimeter 实时互动投票工具征求意见, 伍珀塔尔研究所也针对每种废弃物组分做了简短的主题演讲。会上, 代表们讨论了每种废弃物组分的市场可用量、预处理成本、焚烧过程中的能量转化、熟料化学方面的影响以及技术难点。

研讨会的主办方撰写了会议纪要, 纪要与调查结果构成了章节 3.2.2.1 推论的基础。纲要文件《水泥行业替代燃料的未来可用量与可用性》在定稿前征询了与会人员的意见。

2.4.2 新型水泥和混凝土建筑技术研讨会

“新型水泥和混凝土建筑技术” 研讨会于 2021 年 9 月 28 日召开, 来自水泥生产领域 (3 人)、机械装备制造 (2 人)、企业协会 (7 人)、学术界 (3 人)、政府机关与主管部门 (1 人)、项目组 (3 人) 的共 19 名代表参加了此次会议。会议旨在验证和记录更多专家观点, 澄清待探讨的问题, 评估特定的减排方案, 汇报和评审目前的文献研究和访谈结果, 并邀请更多专家探讨上述议题。与会专家就混凝土的结构要求及其对新型水泥和混凝土实际应用的影响进行了深入思考, 并就该领域的政策工具给出了初步评估。

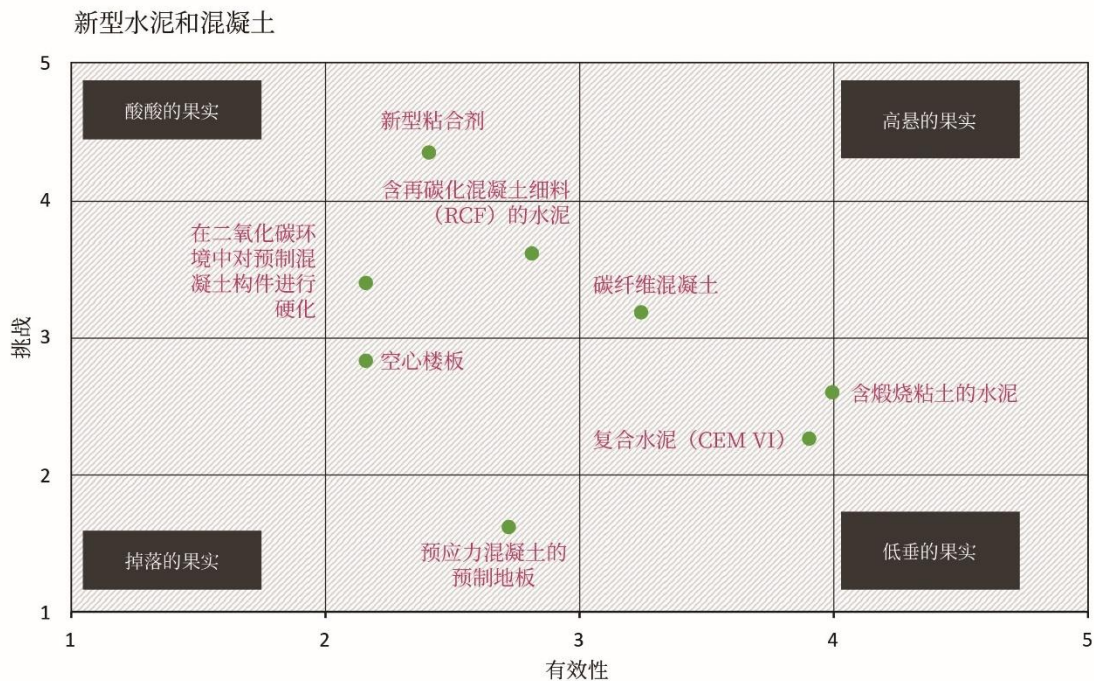
在一项调查中, 行动主体就下列新型水泥/混凝土领域的二氧化碳减排方法的 *有效性和挑战* 进行了定量评估, 评分最低 1 分 (低), 最高 5 分 (高), 评估结果以图表分析的形式呈现:

- ▶ 含煅烧粘土的水泥
- ▶ 含再碳化混凝土细料 (RCF) 的水泥

- ▶ 复合水泥（CEM VI）
- ▶ 新型粘合剂
- ▶ 在二氧化碳环境中的预制混凝土构件的硬化
- ▶ 空心楼板
- ▶ 碳纤维混凝土
- ▶ 预应力混凝土的预制地板

回答结果生成了结果图示（图 14），包含对挑战大小（y 轴）及相应措施有效性高低（x 轴）的定量回答。章节 2.3.2 已对图中“低垂的果实”、“高悬的果实”、“酸酸的果实”和“掉落的果实”四个象限的划分做过说明。

图 14： 新型水泥和混凝土建筑技术领域（非代表性）调查结果



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

研讨会主办方撰写了会议纪要和纲要文件。会议纪要、纲要文件与调查结果构成了章节 3.2.3 推论的基础。纲要文件《应用新型水泥、新型粘合剂和混凝土建筑新方案以减少二氧化碳排放量的可行方案》在定稿前征询了与会人员的意见。

2.4.3 碳捕集利用与封存及基础设施研讨会

2021 年 6 月 24 日召开的半天线上专家研讨会邀请了水泥生产领域（3 人）、化工（3 人）、气体基础设施（1 人）、学术界（2 人）、政府机关和主管部门（2 人）以及项目组（4 人）的总共 15 名利益相关方参会。与会者以项目团队的主旨发言为基础，围绕关键问题讨论了该如何处理水泥行业中不可避免的二氧化碳。讨论涉及以下方案：

1. 通过碳化利用二氧化碳（建筑材料等）
2. 其他创新方法（例如将二氧化碳分离成炭黑和氧）
3. 地质封存
4. 利用二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料

会上，代表们听取了一系列优秀案例的主旨发言，关于二氧化碳运输方案和源汇关系。报告后，与会者讨论了可行的运输方案、关系和决策因素以及物流问题，并确定了关键的行动主体。研讨会旨在运用综合视角探讨碳经济和气候中和，分析未来情景以及研究二氧化碳产业的基础设施（包括空间维度的讨论）。

基于上述资料检索、访谈和讨论的结果，项目修改更新了纲要内容，并提交与会人员和受访专家征求意见。章节 3.2.4 概述了讨论的主要结论。

2.4.4 （政策）工具/市场/社会接受度专题研讨会

2022 年 4 月 7 日召开的半天线上研讨会围绕着（政策）工具专题展开，共邀请到 21 名专家参与（另外还有来自伍珀塔尔研究所的 4 名成员作为项目组代表）。与会者来自水泥生产与加工领域（4 人）、化工行业（1 人）、行业协会（7 人）、非政府组织（1 人）、咨询公司（2 人）、学术界（3 人）以及主管部门与政府机构（3 人）。研讨会再次聚焦两大技术行动领域，即新型水泥和混凝土建筑技术市场和碳捕集利用与封存基础设施。因此，会议分为两部分进行：

在研讨会的前半部分，13 名外部利益相关方讨论了新型水泥和混凝土相关的（政策）工具²⁴，明确了以下关键行动领域：

- ▶ 建立市场/推广低碳的建筑方式；
- ▶ 将新型水泥和建筑技术融入建筑实践。

在会议的第二部分，17 名利益相关方就碳捕集利用与封存领域的（政策）工具展开讨论，议题包括碳捕集、二氧化碳的去向（通过碳化加以使用、用于生产化学初级产品和动力燃料，以及二氧化碳的地质封存）和基础设施要求。研讨会明确了以下关键行动领域：

- ▶ 碳基础设施的法律框架条件；
- ▶ 碳基础设施的规划和开发过程；
- ▶ 社会讨论和公众参与过程。

两次研讨会都旨在邀请更多专家来评审和讨论文献研究和访谈成果，澄清尚待解决的问题，评估上述两大领域特定的（政策）方案，深入探讨各类（政策）工具的优缺点及其相互作用。涉及的主要问题包括：水泥行业（整个产业链）实施脱碳技术需要借助哪些中短期措施？德国国内的行动主体可以采取哪些措施，这是讨论的焦点所在。相关措施包括建立正式的规划程序和国家监管机制、公私磋商、公私合作、公民的参与和对话。

项目组在会后撰写了纲要文件，并发送给与会人员征求意见。第 6 章介绍了纲要文件《水泥行业脱碳的政策工具和利益相关方活动（重点：新型水泥和混凝土建筑技术以及碳捕集利用与封存基础设施）》的主要结论。

2.5 利益相关方对话

Dekarblnd 项目在中期和尾声阶段组织了利益相关方对话（SD），向更多利益相关方介绍了中期和最终成果，并与之展开讨论。除科技交流（宣传）外，对话的另一个明确目标是协助

²⁴ 此处使用的“（政策）工具”一词既指政策工具，也指利益相关方的活动。

参与者建立联系网络，扩大核心小组范围，涵盖水泥和混凝土行业、气体行业、化工行业、行业协会与工会、非政府组织、学术界和政府主管部门等其他行为主体。笔者和德国联邦环境署认为，建立联系网络至关重要，网络有助于鼓励利益相关方参与，实现水泥行业全产业链的脱碳目标。

2.5.1 第一次利益相关方对话（SD1）

第一场利益相关方对话于 2021 年 11 月 2 日在线上举行，共有 40 人参会（另有 3 名伍珀塔尔研究所的成员和 2 名弗劳恩霍夫系统与创新研究所的成员作为项目组代表）。与会人员来自水泥生产领域（10 人）、机械装备制造行业（2 人）、行业协会（6 人）、社群团体（4 人）、政府机关与主管部门（12 人）以及学术界（6 人）。主旨发言介绍了之前探讨的二氧化碳减排方案，涉及领域包括水泥熟料生产中的热力制备、新型水泥和混凝土建筑技术以及碳捕集利用与封存和基础设施等，并就关键问题展开讨论。

2.5.2 第二次利益相关方对话（SD2）

第二次水泥行业利益相关方对话于 2022 年 6 月 23 日在柏林举行。因新冠疫情原因，这是 DekarbInd 项目在 2020 年至 2022 年期间举办的唯一一场线下活动。活动为期两天，第一天（6 月 23 日）会议介绍了最终成果，旨在确定《水泥行业脱碳路线图》的主要内容（子任务 3），第二天（6 月 24 日）会议则介绍了《钢铁行业脱碳路线图》的主要内容（子任务 2）。水泥行业领域的相关利益方对话一共邀请到 18 人参会（另有 3 名伍珀塔尔研究所的成员和 2 名弗劳恩霍夫系统与创新研究所的成员作为项目组代表参会）。与会人员来自水泥生产领域（4 人）、机械装备制造行业（1 人）、行业协会（4 人）、社群团体（1 人）、政府机关与主管部门（6 人）、学术界（1 人）、气体行业（1 人）。

总结报告介绍了水泥熟料生产和产业链上的碳减排方案和总路线图，概述了可用工具和措施。后期的深入讨论环节介绍了工具研究成果，具体阐述了 A) 热能 B) 新型水泥和混凝土建筑技术和 C) 碳捕集利用与封存三个子领域的路线图，并展开了讨论。

3 利益相关方关于路线图各图层的讨论结果

3.1 愿景和目标

如章节 2.3.1 中所述，第一次核心小组会议（KGT1）提出 2045 年水泥行业应完全脱碳，并在会上讨论了应制定怎样的目标。与会者综合考虑了经济、政治、数字化、技术、研发、全球发展（市场等）、社会、社会责任与价值观、劳动力市场与员工、气候与环境等多重因素，起草了气候中和水泥行业的愿景，就关键议题和主要挑战达成共识，也记录下了争议点。这是多方共同制定路线图的基础（见章节 4 和 5）。

项目团队在此基础上撰写了《2045 年水泥行业脱碳的愿景和目标》，概括了核心论点。核心小组成员针对草案提出了自己的意见。以下论点并未反映所有参与者的全部观点。

水泥和混凝土生产环节有可能实现气候中和

与会者认为，从技术角度出发，水泥和混凝土的生产有可能实现长期的气候中和。但该行业并不存在所谓的“王牌技术”，需采用互补的技术方案，综合运用可再生能源、新型水泥和粘合剂，确保熟料、水泥和混凝土的高效利用。此外还应配合运用混凝土回收利用技术、碳捕集与封存/碳捕集与利用（CCS/CCU）。

与会者在拟定愿景时，清楚地看到了各个层面存在的重大挑战。虽然燃料变更（废弃物、电力、生物质、氢、合成气）或碳捕集（碳捕集与封存/碳捕集与利用）等脱碳战略在技术上已趋向成熟，或部分正在开发的过程中，但仍然缺少相应的政策框架。

在与会者看来，关键行动领域主要包括：设立监管框架条件、提高社会对基础设施（二氧化碳、氢）的接受度，让市场逐步接受价格偏高的绿色水泥/混凝土产品。

燃料相关的二氧化碳排放量可大幅减少

与会者提出了多种利用熟料制备热力的备选方案，这些方案可大幅减少或避免燃料相关的碳排放，但其长远效用尚待确定。除了废弃物衍生燃料外，生物质、生物甲烷、可再生甲烷、氢能和电力也至关重要。上述能源源各有利弊，需对窑炉技术进行不同程度的调整、改造或重新设计。我们在选择合适的能源源时，不仅要考虑排放，还须考虑其他因素，如可用性、能源效率、生态可持续性、价格，以及与整个系统的相互作用（例如在利用废料时）。

对工艺相关的二氧化碳进行碳捕集利用与封存

水泥熟料由石灰石生产而成，这种原材料目前在全球没有大批量的物美价廉的替代品。因此，碳捕集与利用/碳捕集与封存是避免熟料生产过程中原料相关碳排放的重要手段。石灰石在煅烧过程中会产生二氧化碳。

在进行碳捕集与利用时，必须首先了解二氧化碳的来源（原料相关还是燃料相关），以及中间产品或最终产品碳封存的持久性，并对其进行定义和分类。例如，在用合成燃料时，燃烧过程中产生的二氧化碳被排至大气中。倘若工艺流程使用的原料（石灰石）不断产生化石二氧化碳，我们要实现熟料煅烧工艺的碳中和，就必须采用碳中和的燃料。

水泥行业的愿景之一是到 2050 年建立跨区域的二氧化碳运输基础设施。国内外的长期协调合作对上述设施的建设和运营至关重要。工厂附近若存在源汇关系（水泥厂和二氧化碳封存地点），则应优先选用分散式的解决方案，并且要在空间规划阶段就考虑到未来的基础设施需求。

扩大混凝土建筑的循环经济规模

实行全面的循环经济，包括对混凝土拆除废弃物和混凝土构件进行回收利用，不但意义重大，而且困难重重。当前常见的是降级回收（拆除和碾磨废旧混凝土，用于道路和轨道建设），

或在混凝土生产中用再生混凝土替代砂和骨料，闭环式回收是对上述两种做法的有效补充。今后，混凝土拆除废弃物的细料将可作为原材料使用。

从气候保护的角度看，回收废旧混凝土组分并将其用作生产熟料（作为石灰石的替代品）和水泥（作为熟料之外的主要成分）原料，可以避免水泥生产过程中与工艺相关的排放。这方面的商业化工艺流程还有待开发。追求高回收率固然重要，但我们很难在技术和经济上实现100%的材料闭环。

与会者从（二氧化碳）循环经济的角度出发，饶有兴趣地了解了在新拌混凝土中加入二氧化碳（再碳化）以及预制构件在硬化过程中吸收二氧化碳的方法。

为提高闭环效率，应尽量优先选用分散式解决方案，由此缩短原料、二次原料、二氧化碳和拆除材料的运输路线。

经济与工作——绿色水泥和混凝土带来的机遇

水泥行业脱碳为德国企业提供了巨大机遇，帮助国内企业成为绿色水泥和混凝土生产行业的领头人。装备制造和循环经济领域也一样孕育着巨大的商机。

数字化促进绿色水泥和混凝土以及循环经济

数字化和自动化（工业 4.0、建筑信息模型 BIM、批量生产等）可促进新型水泥的应用，监测水泥/混凝土的碳足迹。因此，数字化可推动绿色水泥/混凝土的市场化。

数字化还能为建设高效的水泥混凝土循环经济做出重要贡献。

绿色水泥和混凝土的市场需求

与会者认为，市场拉动因素对行业脱碳的意义重大。由于绿色水泥/混凝土产品的价格预期较高，为创造市场需求，必须采取客户激励计划、计提折旧框架内的特别折旧规定、优惠贷款和直接资助等措施。

除资助措施外，修改公共采购的标准（要求考虑建筑材料的整个生命周期）、针对具体产品出具碳足迹声明以及将混凝土中的二氧化碳减排措施纳入欧盟分类范畴等举措，亦可激活绿色水泥/混凝土市场。

除了零碳水泥/混凝土本身的市场接受度外，提高行业对二氧化碳再利用产品的接受度，也会间接助推碳捕集与利用的减碳技术。因此，我们应采取适当的措施和手段，积极宣传推广。

在利用水泥和混凝土时，应充分发挥其在建筑行业的特殊性能。必须对各个应用领域的水泥进行分级/细分，从而提高熟料和水泥的使用效率。

为确保（具有新特性/改良特性的）新型水泥能在实践中得到安全的应用，还必须对使用者进行充分的培训，促进水泥生产商、混凝土行业和建筑业（包括规划师、建筑师等）在工艺链中的合作与交流。

监管框架——建立绿色水泥和混凝土的公平竞争环境

为了提高新型水泥和粘合剂的使用效率，必须迅速确立规范（定义和界定、产品标准和建筑标准）。当务之急是要证明（近）零碳水泥制成的混凝土产品的性能（新拌混凝土、硬化混凝土、可加工性、耐久性等）。产品标准须考虑二氧化碳强度。

除了及时澄清审批等问题外，与会者还希望从法律角度承认碳捕集与利用/碳捕集与封存 的负排放。如有必要，也可综合利用负排放的替代燃料（ABS）或生物质等能量源，推动该领域的商业开发。

德国目前还未大批量进口水泥，但水泥生产商担心无法在德国市场上将（近）零碳水泥或混凝土的额外生产成本转嫁出去。为防止不正当竞争和碳泄漏，欧洲甚至全球范围都须营造公平的竞争环境。因此，必须找到适合打造国际公平竞争环境和防止熟料生产碳泄漏的措施。与

会者建议应考虑实施碳差价合约（CCfD）、欧盟碳边境调节机制（CBAM）、基于二氧化碳足迹的消费税或产品标准等措施。

公民参与是提高社会接受度的基础

一些与会者希望，零碳水泥/混凝土能够与木材一样受到社会高度认可。

只有社会认可碳基础设施的建设和运营，并将其用于碳捕集与封存，才能抵消不可避免的、与工艺相关的碳排放。为了实现生态、社会、经济全面可持续发展目标和促进气候保护，前瞻性地规划基础设施、尽早建立社会对话是成功的关键。

与其他产业部门的协同发展

与其他能源密集型行业相比，水泥行业工艺相关的排放比例较高，因而具有特殊地位。因此，碳捕集与封存/碳捕集与利用是避免因原料产生排放的重要手段。在建设和利用碳基础设施时，应与其他行业协同发展。因为其他行业同样也须捕获不可避免的、与工艺相关的碳排放（碳捕集），或吸收水泥行业的碳排放（碳捕集与利用）。此外，协调和促进能源伙伴关系，加速氢能和电转 X 产品（PtX）的市场发展，也是行之有效的跨行业措施。

3.2 技术

技术调研旨在汇总水泥行业脱碳的技术方案，供与核心小组专家的讨论。在第二次核心小组会议（见章节 2.3.2）、围绕“废弃物衍生燃料”“新型水泥和混凝土建筑技术”“碳捕集利用与封存”等专题召开的七次专家访谈和三次专家研讨会（章节 2.4）期间，与会者从项目团队提供的文献研究出发，重点讨论并确定了水泥行业脱碳所需的技术。此举一方面可以展示技术改造的可行性，另一方面也可以借此机会了解利益相关方对特定技术的不同看法。

3.2.1 初始情况和技术介绍

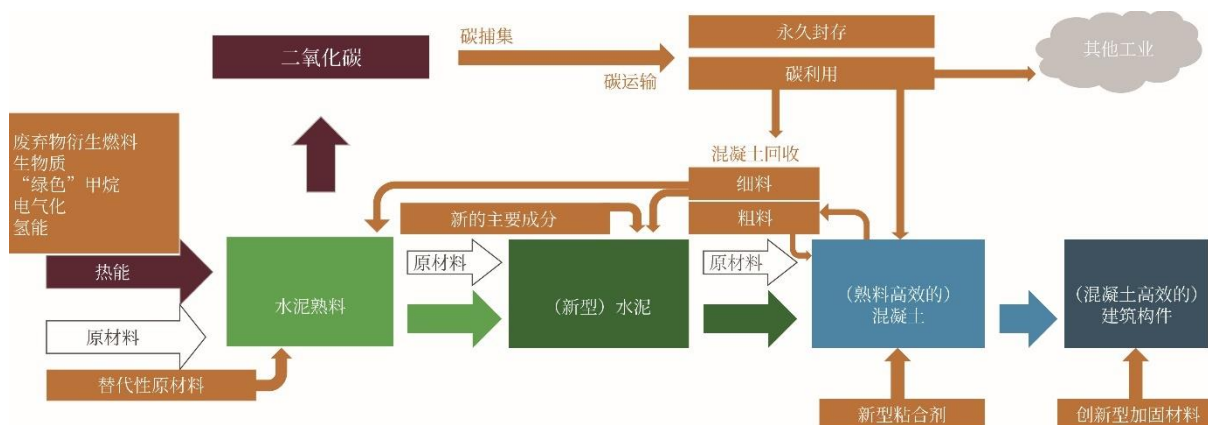
倘若可以提供必要的框架条件，从长远来看（到 2045 年或 2050 年），在技术上有可能实现水泥和混凝土生产的气候中和。水泥行业脱碳可以借助多种技术和措施，涉及混凝土建筑产业链的不同环节。很多情况下，我们需要综合利用各种解决方案。学界（CSI / ECRA, 2017; Nolting et al., 2018; Ruppert et al., 2020; Schneider, 2019; Scrivener et al., 2018）对现有技术措施进行了梳理，并在不同层面（德国、欧盟、全球）的路线图中做了归纳总结（Cembureau, 2020; Favier et al., 2018; GCCA, 2021; IEA/CSI, 2018; Material Economics, 2019; VDZ, 2020a）。

图 15 水泥生产和混凝土建筑产业链中的减排杠杆，下文将简要阐述。该图以混凝土建筑产业链为基础，其中：

- ▶ 水泥熟料的生产利用原料和热能；
- ▶ 水泥熟料与其他主要和次要成分被研磨形成水泥；
- ▶ 水泥与砂、骨料和水混合制成混凝土；
- ▶ 最后用混凝土生产建筑构件。

关于水泥和混凝土生产的详细介绍，请参阅（VDZ, 2002）。

图 15: 水泥生产和混凝土建筑产业链的减排技术杠杆（橙色）示意图



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

混凝土建筑产业链中的二氧化碳大部分源自水泥熟料生产。目前看来，水泥熟料在很长一段时间里（至少在 2050 年前）仍将是不可或缺的建筑材料。因此，为了完成水泥行业的脱碳任务，项目重点研究了该如何减少或避免熟料生产的碳排放。

熟料生产过程中产生的二氧化碳一部分来自熟料煅烧过程中所使用的燃料（约占二氧化碳总排放量的三分之一），另一部分则来源于原料石灰石的煅烧过程（约占二氧化碳总量的三分之二）。

在生产熟料时，可以考虑改变工艺用热的制备方式，或彻底避免燃料相关的排放。而对于石灰石煅烧过程中释放的碳排放，使用脱过酸的原材料有助于减少每吨熟料工艺相关的排放，实际作用却极为有限。

高效使用混凝土²⁵及混凝土中的水泥和熟料，有助于降低对二氧化碳密集型熟料的依赖，却无法彻底根除这种依赖。若要提高混凝土中的熟料效率，关键是要采用创新工艺和成分优化的新型水泥。新型粘合剂摒弃了传统熟料，也可以发挥一定的减排作用，但这种粘合剂的生产还是会产生一定的二氧化碳。

水泥熟料的未来发展仍是一项重要的课题。我们无法避免熟料生产中工艺相关的碳排放。可见，水泥行业要脱碳，做好碳捕集和尽可能永久固定捕集到的二氧化碳，这才是重中之重。我们既可以对捕集到的二氧化碳加以利用，也可以将其永久封存。如何处理捕集到的二氧化碳是众多讨论的焦点。

回收混凝土后，粗料（骨料）可用于再制（生产再生混凝土），细料则可视情况用于新水泥生产的各段工艺。这些解决方案也是利用和永久固定二氧化碳的基础。

水泥行业脱碳的各种技术和措施相辅相成，很难明确细分。但是，为了表述清楚，本项目划分了以下技术领域，并对每项技术的减排作用做了具体的讨论：

- ▶ 热能制备
- ▶ 新型水泥和混凝土建筑技术（包括新型粘合剂）
- ▶ 碳捕集利用与封存

²⁵ 本项目在确定研究对象时，假定混凝土建筑部门的建设工作总量保持不变。因此，用以评判混凝土利用效率的依据是每个混凝土建筑构件所需的混凝土量。

3.2.2 热能制备

目前，熟料生产过程中产生的二氧化碳约有三分之一源自化石燃料²⁶。如果使用生物燃料、氢、合成甲烷和电力（见下文），通常可以完全避免化石碳排放。总体而言，我们将来仍会使用不可回收物生产的废弃物衍生燃料（ABS）。

上述能量源各有利弊，需要对窑炉技术进行不同程度的调整、改造或重新设计。在选择能量源时，除排放因素外，还必须考虑其他因素，如可用性、能源效率、生态可持续性、价格以及与整个系统的相互作用（例如利用废料时）。

3.2.2.1 废弃物衍生燃料

未来，原则上可以利用更多的废弃物衍生燃料（见信息框，目前约 70%；VDZ，2022）。支持利用废弃物衍生燃料的理由如下：1) 使用的应是后期将做热处理的废物。水泥行业不利用这些废弃物，产生的二氧化碳会转移到废弃物处理部门；2) 可以将焚烧灰渣作为材料加入熟料，（在较小程度上）减少熟料生产过程中工艺相关的排放；3) 将废弃物衍生燃料中的生物源成分与碳捕集和永久固定相结合，由此实现负排放。

尽管如此，我们预计水泥厂废弃物衍生燃料的平均组分质量会下降。为了不断提高废弃物衍生燃料的占比，废弃物清运处理单位必须和水泥行业加强合作，及时对窑炉和水泥厂进行现代化改造。

信息框：废弃物衍生燃料

根据德国水泥协会（2022）的信息，水泥厂使用的废弃物衍生燃料（ABS）主要由工业废物、城市生活垃圾经处理后的破碎料、废旧轮胎、溶剂、废油和污水污泥等生产而成。废弃物是否适合热利用，取决于热值、质量、大小/形状/粒度、污染物含量以及水泥厂的技术设备。废弃物衍生燃料在水泥厂的燃料组合中占比越高，当地废弃物供应和处理能力的挑战就越大（须符合数量和质量上的要求）。

与标准燃料石煤粉和褐煤粉等化石燃料相比，废弃物衍生燃料的碳排放减少了近一半（约 51 kg CO₂/GJ）（根据德国水泥协会（2022）和 Lechtenböhmer 等（2006）资料自行计算）。若对含有生物成分的废弃物加以热利用，也会产生生物源二氧化碳。目前，废弃物衍生燃料的生物源碳含量平均约为 30%（根据德国水泥协会（2022）和 Lechtenböhmer 等（2006）资料自行计算）。

某些材料（如废油、溶剂、废旧轮胎等）的成分通常不会发生太大变化，而其他废物破碎料（如城市生活垃圾）的成分则可能会发生显著改变。总体而言，鉴于废物总量的变化和回收利用技术的改进，预计未来废弃物衍生燃料的质量（热值、污染负荷、可燃性/粒度/块度）和价格都会发生一定的变化，中长期的平均热值会下降。

工商业的塑料废弃物是水泥窑热力供给的主要来源。水泥行业所用的替代燃料基于混合塑料等残留物，现有技术无法对其进行物质回收，只能将其作为能源使用。但从中长期看，这些材料可采用新技术进行化学回收，对水泥行业的供应量将相应下降。

3.2.2.2 生物燃料

纯粹从技术角度看，生物燃料（固体生物质、沼气、生物甲烷）可为熟料煅烧过程提供全部所需热量。将生物燃料与碳捕集和永久固定技术相结合后，可实现负排放。限制生物燃料利用的主要因素包括：生物质的可用量，其他产业部门是否也需要资源有限的可持续生物质。在整个能源系统转型的过程中，其他部门（发电、运输、家庭）释放的生物能源可用于（水泥）工业，而且不会对生态系统造成额外负担（参见 Prognos et al., 2021）。

²⁶ 包括废弃物衍生燃料中的化石部分。在德国水泥行业中，当前废弃物衍生燃料所提供的热能占比约为 70%。

3.2.2.3 氢

目前看来，因技术限制，氢在水泥熟料的生产中只能替代一定比例的含碳燃料，氢能的最大占比仍有待研究确定。²⁷ 对许多水泥厂而言，能否获取氢能取决于未来氢基础设施能否延伸到农村地区，是否有充沛的（可再生）电力用于现场驱动电解槽。

3.2.2.4 合成甲烷

纯粹从技术角度出发，合成甲烷可为熟料煅烧提供全部热量。但合成甲烷对可再生电力的需求非常大（与氢相比大幅提高），从而阻碍了其应用。

3.2.2.5 直接电气化

未来可采用两种方式直接使用电力供热²⁸：通过直接捕集二氧化碳对煅烧炉进行电气化供热（电气化 LEILAC 工艺；见章节 3.2.4）和使用等离子燃烧器。目前有一家试验工厂正在研究 LEILAC 工艺，可实现电力直接供应 60% 的热力。等离子燃烧器是电气化供热领域的成熟技术，但其在水泥行业中的应用仍处于早期研究阶段。

不同的能量源可以产生协同效应。例如，按比例使用氢可以弥补废弃物衍生燃料热值低的问题。从经济角度来看，能源价格、二氧化碳价格（或通过碳捕集利用与封存避免二氧化碳排放的成本）以及不同能源组合所需要的投资多少，决定了水泥企业的最终选择。目前看来，废弃物衍生燃料和生物质比氢和直接使用电力更具经济效益（自行计算）。

3.2.3 新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）

为了降低熟料生产过程中的二氧化碳，应在保证建筑物安全性和耐久性的前提下，提高水泥生产和混凝土建筑中的熟料使用效率。为此，我们可以从三个层面入手：

- ▶ 生产熟料含量低的粘合剂，包括：
 - 使用传统硅酸盐水泥熟料的新型水泥
 - 不含硅酸盐水泥熟料的新型粘合剂
- ▶ 在混凝土中使用熟料高效水泥
- ▶ 高效利用混凝土的建筑。

这些措施必须配合使用，不能单独实施。

3.2.3.1 新型水泥

随着其他主要成分的含量上升，水泥熟料的比例（“熟料系数”）目前已降至 71%（VDZ, 2020a）。炉渣砂和磨碎的（未煅烧的）石灰石量在“其他主要成分”中的占比最高（VDZ, 2020b）。此外，发电厂的粉煤灰被用作活性成分，它们在水泥和混凝土的生产中发挥着重要作用。根据标准，作为（惰性）成分的未煅烧石灰石占比不得超过水泥主要成分质量的 20%²⁹，这是为了保证建筑的粘合剂性能。考虑到钢铁行业即将完成转型³⁰，燃煤发电逐步被淘汰，炉

²⁷ 例如，（矿产品协会等，2019）一项研究模拟了在配有五级旋风预热器和煅烧炉的水泥厂窑炉主燃烧室中，氢占比 50%（按照所输入的热能计）的情况。这相当于总输入热量的 20%。

²⁸ 其他仍处于早期研究阶段的创新技术也可能在后期发挥作用（例如，温度高达 1,700°C 的电窑，见 <https://coolbrook.com>）。

²⁹ 根据水泥标准，在石灰石水泥的主要成分中，未煅烧石灰石的质量比例可为 35%（CEM II/B-LL）。不过，这种水泥的应用可能性十分有限。

³⁰ 炉渣砂是在高炉炼铁的过程中产生的。根据目前钢铁产业转型的场景，高炉炼铁将越来越多地被基于氢的直接还原铁（DRI: Direct Reduced Iron）工艺所取代。

渣砂和粉煤灰活性成分的产量中期预计会减少。因此，如何在上述成分供应量减少的情况下，将熟料系数保持在现有水平或进一步降低熟料系数，这对于水泥生产商来说是个挑战。在这方面，采用包含创新成分的新型水泥是重要的解困之法。

依照 2021 年 7 月发布的 DIN EN 197-5 工业标准，我们今后可在新型波特兰或其他复合水泥中运用炉渣砂。这些水泥包含三种主要成分（如熟料、炉渣砂和磨碎的石灰石），能提高熟料（和炉渣砂）的利用效率。

煅烧粘土和再碳化混凝土细料（RCFs: recarbonated concrete fines，即混凝土拆除废弃物经再碳化后的再生细料）是当前主要的创新型活性成分，未来可能用于生产熟料系数低于 65% 的常用水泥³¹。尽管学界围绕着煅烧粘土的利用开展了广泛的研究，但再碳化混凝土细料的生产工艺仍有待进一步的开发。

此外还有众多创新型主要成分（如钢铁厂的改良矿渣、混凝土碎砂）也在研究和开发过程中。但用这些成分仅能生产出熟料系数大于 65% 的水泥，无法超越含有高比例磨碎石灰石（CEM II/B-LL）的水泥。而前者的潜在应用范围相对更广。此类水泥的应用规则尚未确定，故目前无法置评。

3.2.3.2 新型粘合剂

与硅酸盐水泥相比，不含传统水泥熟料的新型粘合剂可降低粘合剂的排放，减排量取决于粘合剂类型。相较于波特兰水泥（贝利特水泥）可减少约 10%，甚至可（在理论上）达到负排放（基于硅酸镁的粘合剂）。然而，由于受制于其建筑性能，加之所需原材料（如铝土矿）的储量有限、价格昂贵，新型粘合剂仅限于某些特定用途（利基）（Scrivener 等，2018）的应用。目前尚未开发出硅酸镁基粘合剂的量产工艺。因此，根据专家提供的信息，新型粘合剂到 2050 年的市场潜力较低，仅为 5% 左右（Favier 等，2018；VDZ，2020a）。

3.2.3.3 在混凝土中使用高效利用熟料的粘合剂

混凝土及其组分要求取决于所需的抗压强度、耐久性和可加工性。粘合剂含量会因要求不同而（显著）不同。因此，与“全能混凝土”相比，符合预期用途的混凝土组分可提高熟料利用效率。

在混凝土生产和使用中，尤其是对于混凝土耐久性要求不高的构件（如室内构件）而言，我们可以提高熟料高效水泥产品的用量³²。使用者在规划时必须清楚一点：使用熟料含量较低的水泥会降低混凝土的早期强度（预制混凝土构件在仓库中的硬化时间、构件在施工现场的负荷）。也可以采取其他措施（细磨、混凝土外加剂）作为早期强度降低的适当弥补。

与熟料高效水泥类似，在混凝土中添加更高比例的“填料”（如石英砂、石英粉或未研磨的石灰石等）也能降低混凝土中的水泥比例。科学研究表明，（在实验室中）将不同成分研磨成精确匹配的粒度后，同时调整混凝土中的水灰比并使用混凝土外加剂，可以生产出熟料利用效率极高的混凝土。若要将这种产品投放市场并扩大规模，至少要做到以下几点：水泥/混凝土的生产发生很大的变化、混凝土制造商具备更多的专业知识、积累不同应用领域试点项目的经验并调整标准。

³¹ 这意味着熟料系数低于石灰石水泥（CEM II/B-LL）。

³² 例如，在假定内部构件占比 50% 的建筑物中使用暴露等级为 XC1 的混凝土最小水泥用量（240 kg/m³），不在整栋建筑物中采用外部构件适用的混凝土产品（暴露等级为 XC4 或 XF1；最小水泥用量均为 280kg/m³），这种情况下，水泥需求量将减少约 7%（自行计算）。

3.2.3.4 混凝土高效建筑

混凝土建筑的各类工艺均可以提高建筑构件中混凝土的使用效率。必须注意的是，这些工艺与熟料高效水泥的应用之间可能产生冲突，因为某些混凝土高效的建筑方式（尤其是超高性能混凝土）要求使用富含熟料的水泥。只有具体到构件，我们才能综评熟料实际的节省情况。

原则上，由碳（碳纤维增强塑料 CFK）、玄武岩、玻璃、不锈钢或涂层钢材制成的替代加固材料可以大幅节省混凝土。这是因为用不易腐蚀的材料代替目前常用的结构钢，可以显著减少构件厚度。从建筑工程学的角度看，这种技术的大规模推广无需担心任何限制。不过，碳纤维混凝土（CF 混凝土）不利于健康。但使用玻璃和不锈钢等材料则会导致成本大幅增加。此外，碳纤维混凝土的可回收性问题仍待解决：例如如何经济有效地从建筑垃圾厂大量的无加固或有钢筋的材料中识别出碳纤维增强塑料筋混凝土。弗莱贝格工业大学（*Technische Universität Bergakademie Freiberg*）处理机械和回收系统技术研究所（IART）正在研究初步的解决方案。另一个挑战是在用常规设备对碳纤维混凝土进行机械处理时，通常会产生大量细粒和粉尘。根据 C³ 项目³³的数据，尽管在碳纤维混凝土用碳的材料循环研究中尚未发现符合世界卫生组织定义的可吸入性纤维碎屑，但研究人员强调，碳纤维混凝土的各个生命阶段都有碳纤维粉尘排放，这对人类和技术构成重大威胁（Jäckel et al., 2022）。预应力混凝土是一种成熟高效的混凝土技术，需进一步评估这项技术在德国多层建筑预应力预制楼板领域的应用潜力。

为了节省混凝土，我们可以将空心件插入建筑构件（通常是楼板）中混凝土负荷较小的部位。“梯度混凝土”方法遵循类似原则，根据负荷的不同，在构件的不同层面使用不同的混凝土或加入“填充材料”（如小塑料球或膨胀粘土球）。

超高性能混凝土的粘合剂含量高于普通混凝土。与后者相比，前者的抗压强度高、耐久性强，能够制造出更精巧的构件。此类混凝土一般由硅酸盐水泥制成，有较高的混凝土利用效率，通常可以节省一定量的水泥熟料。

此外，行业中有一系列的试点项目或已完结的研究项目探讨了混凝土高效的建筑方法，但本项目不对此做深入研究。这里包括 3D 打印工艺³⁴和模块化的建筑方法，有助于在建筑物使用阶段结束后重复使用整个构件³⁵。

3.2.3.5 粘合剂和混凝土的差异化使用

与目前广泛使用的水泥相比，高效利用熟料的新型水泥和粘合剂的应用范围有限³⁶，在使用时必须根据使用目的进行精确调整。我们还可以根据相关构件要求调整混凝土组分，从而将混凝土中的水泥或熟料含量限制在必要的范围内。建筑规划还应考察这类新型水泥与熟料混凝土（如预应力混凝土、超高性能混凝土等）占比高的混凝土高效建筑方法之间的相互作用。因此，在市场推广“新型水泥和混凝土建筑技术”减排方法时，必须根据应用目的采用不同的水泥和混凝土。

3.2.4 碳捕集利用与封存（CCUS）

目前看来，因受工艺限制，粘合剂生产过程中产生的二氧化碳似乎无法完全避免，因此碳捕集以及后续碳利用或封存（CCUS）是水泥行业实现气候中和的关键要素。

³³ 碳混凝土复合材料（Carbon Concrete Composite）C³项目于 2022 年 9 月结束。有关碳纤维混凝土可回收性的具体信息参见：www.carbon-concrete.org/carbonbeton/recycling

³⁴ 参见：例如 www.housedruck.de

³⁵ 参见：例如 www.zirkulaer.com

³⁶ 根据 DIN 1045-2 标准规定的应用规则，主要成分中熟料含量不低于 80% 的硅酸盐水泥、硅酸盐矿渣水泥、硅酸盐石灰石水泥和主要成分中熟料含量不低于 20% 的高炉水泥原则上可用于混凝土建筑的所有应用领域。波特兰复合水泥 CEM II/C-M、复合水泥和不含硅酸盐水泥熟料的新型粘合剂不能同等适用此项原则。

当前正在开发多种碳捕集的方法，预计在不久的将来（胺洗涤）或在 2030 年左右（纯氧燃烧、煅烧炉上直接捕集）可实现规模化的工业应用。这些方法各有利弊，须根据项目情况进行权衡（参见信息框）。我们预计后期还会涌现其他的方案。碳捕集并不是水泥行业转型的技术瓶颈。

信息框：二氧化碳的捕集方法

相较于其他方法，**燃烧后捕集**（胺洗涤）技术最易对现有工厂进行模块化改造。碳捕集率也会随时间提高。因此，燃烧后捕集法特别适用于“碳经济”逐步形成的转型阶段。最大捕集率超过 90%（按产生的所有二氧化碳量计）。然而，最后 10%的捕集需要付出巨大努力（和成本）。胺可能导致环保问题，为此必须制定合适的利用方案。此外，由于胺类再生需要大量热量，能耗相对较高，须开发节能环保的智能化余热利用方案。

与胺洗涤法相比，**纯氧燃烧捕集法**较为节能³⁷：这种方法不必通过燃烧输送空气中的氮气，而是通过冷凝从废气中轻松获取二氧化碳。最大碳捕集率远远高于 90%（按产生的所有二氧化碳量计）。该方法的缺点是无法逐步扩大窑线规模，必须对整个窑炉进行相应的设计或改造，以便使用纯氧或氧/二氧化碳混合物运行燃烧器，还需尽量减少过剩空气的进入。从技术角度来看，我们可以利用这项技术对现有工厂进行改造。但水泥行业与会者认为，大规模的改造对于兴建不久的工厂或窑线而言，产生的经济效益并不高。因此，纯氧燃烧更有可能成为新建窑炉的选择。由于氧气环境中的燃烧温度较高，同时使用低热值的废弃物衍生燃料可以产生协同效应，学界正对此做详细的研究。我们可以通过空气分离或电解设备提供所需的氧气，但此举将消耗更多的（可再生）电力。可以考虑在绿氢生产过程中制备氧气，并在纯氧燃烧法中协同利用。

煅烧炉上直接捕集（LEILAC³⁸方法）（仅）计入了工艺相关的排放量（约 66%）以及煅烧炉产生的排放（约 90-95%），合计占总排放量的约 60%。鉴于捕获的是（几乎）纯净的二氧化碳，该方法非常节能，可用于新建或改造窑炉。扩大单个间接加热煅烧炉的规模在传热方面存在技术瓶颈。³⁹ 目前看来，采用模块化的方法可以扩大规模，超过当前水平，必要时可同时在发电厂安装不同的反应器。LEILAC 方法可与电力热能制备产生协同效应，即可凭借煅烧炉电气化减少燃料相关排放。⁴⁰ 此举去除了煅烧炉的送风、燃烧气体和烟气处理，从而降低了设备费用，有可能避免产生额外的投资性开支（CAPEX）。在目前的技术试验中，间接加热材料连续运行的稳定性仍有待验证。

钙循环捕集等其他方法正在开发或试验中⁴¹。在 CLEANKER⁴²项目中，意大利韦尔纳斯卡（Vernasca）的一家试验工厂（名为 TRL-7）展示了钙循环方案。

资料来源：Hills et al. (2016)、ieaghg (2013)、Project LEILAC (2021)、Voldsund et al. (2019) 以及项目过程中的访谈和研讨会

如何防止水泥行业“不可避免”的二氧化碳排放至大气中，这个问题饱受争议。下文将简要介绍二氧化碳的多种去向：

- ▶ 通过矿化利用二氧化碳（用于建筑材料，也可能用于其他产品）
- ▶ 基于二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料
- ▶ 二氧化碳的地质封存。

³⁷ 考虑到纯氧燃烧法借助空气分离设备提供氧气，以及胺洗涤工艺中胺类再生所需的热量。

³⁸ LEILAC = 低排放强度石灰和水泥（www.project-leilac.eu/leilac2-project）

³⁹ 需要加热的体积以三次幂形式增加，作为热源的外壳面积只以平方形式增加。

⁴⁰ 目前正在 LEILAC2 项目的框架下首次进行 LEILAC1 试验工厂的电气化（www.project-leilac.eu/leilac2-project）。

⁴¹ DekarbInd 项目的知识调查和检索主要集中在前述三种方法上。

⁴² CLEANKER = 通过钙循环工艺生产清洁熟料（www.cleanker.eu）

此外，目前正在研究将二氧化碳分解成碳和氧的方法（参见信息框）。该研究尚处于初期阶段，相关的能源需求或许巨大，因此本项目未将这一方法纳入考虑范畴之内。

信息框：将二氧化碳分解成碳和氧

“NECOC”项目⁴³在研究永久固定二氧化碳的创新方法。该方法首先使用氢（H₂）对二氧化碳进行甲烷化，然后通过热解将甲烷分解成纯净的固态碳（炭黑）和氢。换言之，二氧化碳经由甲烷（CH₄）这个中间步骤被分解成碳和氧。⁴⁴这种工艺在世界范围内独树一帜，步骤复杂，而且能耗巨大。与反应器部件的系统集成和规模扩大化有关的基本问题仍待解决，复杂的相互作用也亟待论证。

在许多情况下，要利用或封存二氧化碳，就必须对其进行运输。建立相应的基础设施是水泥行业脱碳的关键要素，下文也将对此展开讨论。

3.2.4.1 二氧化碳矿化

在建材等行业中，各种生产工艺上的二氧化碳矿化（参见信息框）是二氧化碳利用和永久固定的一种方式，非常有利于气候中和且前景广阔。这些工艺也具有能源优势，因为它们的基础化学过程在正常环境条件下自然发生。但其二氧化碳的吸收能力尚不明确。一些工艺仍在开发过程中，未来的市场潜力与合适的原料来源很难预测。根据已知资料估算，二氧化碳矿化只能吸收水泥生产过程中产生的一（小）部分二氧化碳。由于所用物质（再）碳化本身也会“自然”发生，即使不采用碳捕集与利用方法，至少也能固定部分二氧化碳，只是速度较慢。目前还没有任何关于此类二氧化碳固定附加作用的量化分析。

信息框：二氧化碳矿化的几种方法

在生产“再碳化混凝土细料”（RCF）过程中，再生水泥石在二氧化碳环境中再碳化并固定二氧化碳，由此产生的活性材料可用作水泥的主要成分。不过，在使用此类再碳化混凝土细料前，其建筑工程学特性仍待研究。此外，混凝土拆除物分离和处理技术的研发工作仍面临挑战。若要大规模使用上述材料，还应解决混凝土拆除物的分流和运输问题，获得法律许可（可能会出现《循环经济法》规定的重金属积累）。

在混凝土（包括预拌混凝土和预制混凝土构件生产）的生产过程中，我们可将约占水泥质量 0.15%⁴⁵的二氧化碳注入搅拌机中，使其（大部分）融入混凝土。生产商称，这样做可节省混凝土中的水泥（约 5%）。这项工艺现已在德国获批，可作为内部构件的混凝土外加剂使用。至于此法生产的混凝土制品的耐久性（抗冻性等）如何，尚无可靠的结论。

倘若混凝土部件在再碳化室的二氧化碳环境中（而不是在空气中）硬化，可大大加快混凝土的自然碳化过程。⁴⁶易腐蚀的加固材料有应用限制，目前广泛应用于加固建筑构件的结构钢。

在回收的混凝土拆除物中，可用二氧化碳处理粗料。这样做不但能永久固定二氧化碳，还能使回收的混凝土拆除物更适用于建筑工程领域的再利用。初步经验表明，用此法处理过的再生材料能降低混凝土配方中的水泥含量。⁴⁷

⁴³ www.tvt.kit.edu/21_3547.php

⁴⁴ 该项目目前正在利用从大气中捕获的二氧化碳。不过，在本文作者看来，倘若成功完成开发并实现规模化应用，原则上（在技术上）也可以利用该方法来处理工业源的二氧化碳。

⁴⁵ 该工艺的两个数据均来自 Carbon Cure 公司（2020）。

⁴⁶ 例如：www.solidiatech.com

⁴⁷ 例如：<https://fastcarb.fr/en/home> 和 www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/projekte/rc-beton/transportbeton

我们也可以通过碳化“激活”钢厂矿渣、粉煤灰和其他工业废料，用于生产墙砖和其他产品。⁴⁸

与利用二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料以及地质封存相比，矿化二氧化碳的纯度较低，还能降低所捕获的二氧化碳提纯所需的成本。⁴⁹ 这种应用估计会采用更分散的结构，但需首先解决物流方面的难题。⁵⁰

3.2.4.2 基于二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料

在去化石能源的过程中，化学和动力燃料行业必须开发新的碳源，服务于生产。除了（通过机械和化学方式）回收利用塑料废物，生物质和来自点源或直接空气碳捕集的二氧化碳也是潜在的碳源。因此，利用二氧化碳生产合成化学初级产品和动力燃料或可成为未来利用水泥行业二氧化碳的潜在途径。

在德国，二氧化碳的可用量取决于化工厂和精炼厂的发展情况，目前充满着不确定性。例如，我们还不清楚未来会在德国生产，还是在全球可再生能源产地的“最佳位置（Sweet-Spots）”生产，合成化学初级产品和动力燃料的生产规模又将有怎样的变化。

倘若我们利用成熟工艺，基于二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料，这就需要大量（可再生）电力（用于制氢）。至少在中期内，可再生电力将主要用于更具气候保护效应的领域（如电动交通工具、热泵）。只有当可再生电力“过剩”时，即可再生电力产量超出其他环保效应更高部门的电力需求时，或当德国进口以环保方式生产的（长期而言：气候中和的）绿氢时，用二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料的做法才是理想的二氧化碳利用方法。

此外，基于二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料时，会将碳排放转移至下游产业。因此，要实现长期的气候中和，必须利用其他地方的负排放进行补偿。

可见，只有出现以下情况时，将水泥行业产生的二氧化碳用于化学工业或动力燃料产业才是明智的减排方案：不能或只能部分保证二氧化碳的永久固定；借助“剩余电力”或通过进口提供足够的绿氢；拥有合成碳氢化合物或甲醇的客户。这时，与直接空气碳捕集等替代方法相比，无法避免排放的二氧化碳具有相对的能源优势。由于缺少永久固碳的方法，而且二氧化碳排放无可避免，利用二氧化碳对碳平衡不会产生任何负面影响。

对于熟料生产过程中产生的二氧化碳，化学工业和动力燃料产业的碳捕集与利用能否成为合适的（临时）吸收汇以及其位置与规模，这取决于二氧化碳排放源和利用之间的空间关系、基础设施（原料和产品）、与现有工艺的协同效应、空间要求以及能否获取可再生能源。如果二氧化碳利用不在水泥熟料厂附近，则需要建立必要的碳基础设施。

3.2.4.3 二氧化碳的地质封存

德国原则上已具备陆上二氧化碳地质封存的技术能力，不过德国尚未对潜在的封存地点进行详细审查。政界认为，在目前以及可预见的未来，陆上碳捕集与封存无法得到德国社会的接受，在当前的法律规定框架内也不可能实现。

⁴⁸ 具体以活跃的商业企业 CarbiCrete (www.carbicarete.com) 为例，使用的是钢厂矿渣。目前尚不清楚这项工艺的成功应用是否高度取决于钢厂矿渣中高炉矿渣的比例。NuKoS 项目 (<https://co2-utilization.net/de/projekte/co2-mineralisation/nukos>) 正在研究如何（在实验室规模上）通过对各种钢厂矿渣进行碳化处理来利用二氧化碳。Carbon Upcycling 公司 (<https://carbonupcycling.com>) 使用粉煤灰（市面上有售）和其他原材料作为初始材料，对其进行碳化处理，用于生产混凝土外加剂和其他产品。其他工艺正在探索之中或即将推出市场。

⁴⁹ 也须考虑运输所需的纯度水平。

⁵⁰ 例如，通常大部分混凝土拆除物出现在城市地区，而熟料生产过程中产生的二氧化碳多数情况下出现在靠近石灰石矿的农村地区。

欧洲其他国家利用枯竭的天然气田、油田以及咸水层，开展二氧化碳的地质封存，这些项目即将投入商业运营（参见信息框），这也是德国水泥行业中期碳捕集与封存的潜在备选方案。

信息框：其他欧洲国家的部分二氧化碳地质封存项目

“北部之光”（Northern Lights）项目⁵¹的目标是：从 2024 年起，每年在挪威西面北海的咸水层中封存 150 万吨二氧化碳，计划将封存量扩大到每年 500 万吨。“Porthos”项目⁵²旨在将鹿特丹港区的二氧化碳储存在北海的天然气田中。该系统将于 2024 年投入使用。企业称，初步开发的气田的理论储碳能力为 3700 万吨，年储存量约为 250 万吨。鹿特丹港现有的储碳能力已预留给港区内的各家公司。目前他们正在研究能否扩大项目规模。其他欧洲国家（如英国⁵³）也计划开展更多项目。

另一种二氧化碳地质封存的方法是将溶于水的二氧化碳注入地下，促进活性地下岩石碳化。该方法可在较短时间内（约 2 年）永久固定二氧化碳。不过，这种方法仅能用在符合（罕见的）地质条件的地点。通过活性地下岩层的矿化作用封存二氧化碳的理论潜力巨大，估计冰岛至少可以封存 9500 亿吨（Snæbjörnsdóttir et al., 2014），全世界可封存 100 万亿至 250 万亿吨二氧化碳（Snæbjörnsdóttir et al., 2020）。⁵⁴ 但该方法在各种条件下的应用仍有待研究（Snæbjörnsdóttir et al., 2020），目前还无法对其在全球范围内的实践和经济潜力做出任何论断。冰岛的 Hellisheiði 地热区已用此法储存了 7 万吨二氧化碳。当前研究的重点是如何在该地封存工业源二氧化碳。到 2030 年，冰岛将建成基础设施，每年从北欧工业源头运输 300 万吨二氧化碳。⁵⁵

若要在其他（欧洲）国家运用此方法，首先必须建立跨区域的碳基础设施，将德国水泥厂与海港（鹿特丹、威廉港、汉堡）连接起来。

民间社会组织对二氧化碳地质封存的长期安全性（长达数千年）和可持续性的评估不同，对碳捕集与封存也持有不同立场，有人反对，有人支持。例如，德国联邦环境署持反对意见，他们研究了使用该技术可能对人类和环境造成的潜在风险，并在一份背景文件中提出了如何安全环保地使用封存技术的要求（联邦环境署，2009）⁵⁶。一些非政府组织（尤其是在过去）十分明确地反对采用该技术（如绿色和平⁵⁷）。另一些组织则主张至少可以在工业部门中将碳捕集与封存（CCS）和碳捕集与利用（CCU）作为潜在的气候保护技术，他们支持开展应用研究（如德国观察⁵⁸）。其他非政府组织对此明确表示支持，因为他们坚信，离开了这一技术，人类无法有效遏制人为造成的气候变化（如 Bellona⁵⁹）。目前尚不清楚如果德国采用该技术封存不可避免的工业二氧化碳排放（如水泥行业产生的二氧化碳），其社会接受度会如何。过去，人们对于封存化石能源发电产生的二氧化碳的接受度很低。随着气候保护行动压力的不断增大，科学家尚未得出关于社会对工业二氧化碳排放接受度的明确结论。

⁵¹ www.northernlightsccs.com

⁵² www.porthosco2.nl/en

⁵³ 欧盟关于二氧化碳地质封存的指令（2009 年 4 月 23 日第 2009/31/EG 号指令）将二氧化碳的封存限制在成员国领土、其专属经济区和大陆架范围内。而英国在脱欧后，便不再属于这个范围。
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:DE:PDF>

⁵⁴ 作为比较：2021 年全球能源供应和工业过程产生的二氧化碳排放总量为 363 亿吨二氧化碳（www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2）

⁵⁵ www.carbfix.com/codaterminal

⁵⁶ 联邦环境署 2021：www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen

⁵⁷ Green Peace 2011：www.greenpeace.de/themen/endlager-umwelt/co2-endlagerung/mogelpackung-ccs

⁵⁸ Germanwatch 2017：www.germanwatch.org/de/stichwort/ccs

⁵⁹ Bellona 2021：www.bellona.org/about-ccs/bellona-and-ccs

3.2.4.4 碳基础设施

水泥厂的二氧化碳运输通常有四种备选方案：卡车、火车、（内河）船舶和管线。这些方案的成本和特性（运输的连续性、运力的可扩展性、运输路线的可变性、干旱/洪水等运营风险、所需的二氧化碳纯度等）各不相同，具体成本取决于多种因素（如距离、运输量、地形等）。

表 5 列明了从不同规模的水泥厂运输二氧化碳所需的工具（假定碳捕集率为 90%）。针对水泥厂大规模碳捕集的二氧化碳数量，我们从成本、相关交通和其他环境影响因素出发，排除了卡车运输方案。中小型水泥厂可以选择火车和内河船舶运输，但德国只有少数水泥厂直通可供大型船舶通行的内河航道。因此，水泥厂实际上很少选择内河运输的方式。

表 5： 所需的二氧化碳运输能力

	待运输的二氧化碳数量	所需卡车数量 (20 吨)	所需列车数量 (2 千吨)	所需内河船舶数量 (4 千吨)	输送管道内径
小型水泥厂	120 千吨/年	6,000 辆卡车/年	60 列火车/年	30 艘轮船/年	4 英寸
中型水泥厂	500 千吨/年	25,000 辆卡车/年	250 列火车/年	125 艘轮船/年	6 英寸
大型水泥厂	1000 千吨/年	50,000 辆卡车/年	500 列火车/年	250 艘轮船/年	8 英寸

资料来源：伍珀塔尔研究所自行计算。

还须注意的是，如果使用多式联运⁶⁰，在更换运输工具时通常需要改变二氧化碳的性状（压力和温度，必要时还有纯度），这可能会增加中间储存环节，造成额外的能源消耗和成本。因此，我们的目标是尽量减少运输路线上运输工具的更换次数。

从技术和经济角度看，二氧化碳输送管道是大多数地区长期规模化捕集运输二氧化碳的首选方案。

3.2.5 各个技术领域之间的相互作用

前文描述的技术领域“热能制备”、“新型水泥和混凝土建筑技术”以及“二氧化碳捕获和利用或封存”之间有相互作用，如图 16 所示：通过“新型水泥和混凝土建筑技术”领域的方法减少熟料需求，一方面决定了热能需求，另一方面决定了因工艺产生的二氧化碳量。能源供热的类型也决定了燃料相关的二氧化碳排放量。因此，两个技术领域的相互作用决定了需要捕集、运输和利用或封存的二氧化碳数量。在新型水泥和混凝土建筑技术领域，各种减排杠杆的落实程度决定了通过矿化永久固定二氧化碳（“混凝土建筑中的碳捕集与利用”）技术的潜力。“热能制备”和碳捕集领域存在多种潜在的协同效应。例如，余热可用于胺洗涤。由于火焰温度较高，纯氧燃烧工艺的氧气环境在使用低热值燃料时更具优势。

⁶⁰ 多式联运是指使用不同的运输工具，例如先是火车，然后是管道，最后是远洋轮船等。

图 16: 各个技术领域之间的相互作用



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

3.3 驱动因素和障碍

下文所列的驱动因素和障碍均来源于访谈和利益相关方研讨会的反馈意见（见章节 2.3 和 2.4）。

3.3.1 驱动因素

3.3.1.1 二氧化碳价格

水泥市场的首要特征是价格竞争。在绝大多数应用中，产品性能的特殊性是次要的。因此，在价格竞争激烈的行业，能否推广相关的碳减排方案，关键在于低碳或碳中和的水泥生产方式是否比传统生产更具经济效益。

可见，欧盟排放交易中的二氧化碳价格预计将不断飙升，从而使得碳排放量低的生产方式比传统生产方式更具经济效益。这是水泥生产脱碳的主要驱动因素，这个驱动因素也将对上文提及的各类减排方案产生影响。

须注意的一点是，许多减排方案的实施须满足一定的前提条件（例如可再生能源或碳基础设施的可用性），碳价上涨才能产生效果。我们首先要在热力制备的创新工艺、新型水泥、粘合剂和混凝土建筑技术方面累积经验，才能将其推广到大众市场。碳捕集利用与封存的产业链也需累积经验，制定规章制度，为后期的市场推广做好准备。因此，除了二氧化碳价格这个因素之外，我们应当以需求为导向，做好市场推广的前期准备工作，还须采取适当措施应对碳泄漏的风险。

3.3.1.2 其他驱动因素

除上述一般的因素外，本项目确定的其他影响因素将对某些特定的减排方案产生更具体的影响。

数字化可促进水泥熟料的高效利用，例如使用建筑信息模型（BIM）或借助人工智能改进水泥生产的流程控制。

建筑行业对循环经济重要性的认识也在不断提高，大大促进了混凝土拆除物和混凝土构件的回收再利用。

在碳捕集利用与封存领域，德国化工和动力燃料产业潜在的碳需求推动了相关工艺的开发。在其他欧洲国家境内开发和建设的二氧化碳封存地点和运输基础设施，也促使德国水泥厂开始筹划在其他欧洲国家封存二氧化碳。

鉴于塑料产量在不断增加，废塑料资源的供给量由此提高，这一发展趋势驱动了废弃物衍生燃料产业的发展。随着燃煤发电厂的关停，这类电厂的塑料废弃物用量预计将减少。但（额外的）塑料废弃物是否可用于水泥行业，以及在多大范围内可用于水泥行业，这一点取决于替代回收方法的发展情况（见下文）。

3.3.2 障碍

3.3.2.1 能源可用量有限且成本高昂

章节 3.2.2 概述了熟料生产中可用的零碳或低碳能源，工业规模的直接电气化技术是否可行，氢能能源供应中的最大占比尚待研究。

目前看来，（可再生）电力和氢（至少在过渡时期）与化石能源相比价格仍旧偏高，这是中期使用零碳或低碳能源的主要障碍。价格偏高意味着这些能源的可用量有限，必须与其他产业部门竞争。可持续生物质的数量也一样有限，预计也将（继续）面临与其他潜在用户竞争的情况。

基于二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料也需消耗大量氢能和电力，问题在于利用哪些能源才能（以具有成本效益的方式）提供所需的能源量。若要在德国国内大规模生产以二氧化碳和氢为基础的化学初级产品和动力燃料，就须保证足够的电解电力。但这点似乎还无法实现。因此，在德国广泛使用碳捕集与利用技术生产化学初级产品和动力燃料的可行性依赖于绿氢的大量进口。我们尚不清楚何时才能建立相应的进口体系。

使用电力和氢能的另一个障碍是缺乏基础设施。倘若要将很大一部分热能制备直接电气化，或要运行大量电解槽，这意味着，需购电量将远超水泥厂常规的购电量。为此需扩建所在地的电力基础设施，还要考察上游配电网是否符合要求，是否需要改造。如果水泥厂要在当地购氢，我们不确定氢能基础设施能否延伸至远离工业集群的水泥厂。

长远来看，使用废弃物衍生燃料的可用废弃物数量会不断减少，质量也会不断降低。这是因为许多垃圾成分将得到替代回收，从而导致总量逐渐减少。目前技术上无法回收利用的塑料废弃物将来可能会借助化学手段（热解、气化）回收和利用。因此，可用于生产废弃物衍生燃料的不可回收塑料类废物的数量也会减少。⁶¹此外，我们正在努力改进生物垃圾的分类收集，以减少城市生活垃圾中的生物源垃圾量。就剩余垃圾而言，回收商未来也将围绕废弃物利用展开竞争。例如（其他欧洲国家的）垃圾焚烧厂和正在建设的具有磷回收功能的污水污泥单体焚烧厂之间就存在着竞争关系。

3.3.2.2 合适的原材料可用量有限

预计高炉矿渣和粉煤灰的数量将减少乃至完全归零，目前产量较为稳定的熟料高效水泥（波特兰矿渣水泥、波特兰粉煤灰水泥和高炉水泥）产量随之中期内也会下降。这些熟料替代品的消失限制了某些新型水泥的生产，尤其将限制含有高炉矿渣和粉煤灰的波特兰复合水泥以及复合水泥的最大产量。

⁶¹ 化学回收的残余物可用于生产废弃物衍生燃料，这方面可能会产生协同效应。但是可以预见的是，如果大规模地对塑料废弃物进行化学回收，那么可用于废弃物衍生燃料的废弃物总量将会减少。

含煅烧粘土的波特兰复合水泥的生产需要足够数量的合适粘土，这点至少在中短期内面临巨大挑战。我们还需要积累必要的应用经验。德国拥有合适的粘土，可以相应利用或开发粘土矿⁶²，也可以进口粘土。⁶³

一些行动主体指出，由于合适的原材料数量有限，推广再生混凝土⁶⁴面临着重重的障碍。尽管有大量的混凝土拆除物，但这些废弃物主要用作道路建设的降级利用材料。

各种二氧化碳矿化方法都需要含有适量活性成分（氧化钙、氧化镁）的合适原料（美国国家科学、工程和医学院，2019），包括粉煤灰或高炉矿渣等。这些原料现已被广泛用于水泥和混凝土行业，但总量有限，而且未来还会减少。混凝土拆除废弃物和工业废渣（如钢厂矿渣）可以提供大量的合适原料。目前，人们仍在探索哪些材料适合于哪些用途，以及相应的制备方法。活性成分在原料中的质量占比越低，我们就要越发审慎地考虑是否值得运输这类原料（例如从混凝土拆除物中回收的骨料）。

3.3.2.3 缺乏经济效益

章节 3.2 讨论的许多碳减排方法都会增加生产成本，例如，用可再生能源代替化石燃料、碳捕集利用与封存的成本，新型水泥、粘合剂和混凝土建筑技术领域的方法等。此外，目前对使用低碳工艺的物质激励也非常有限。在价格竞争激烈的市场中，与传统生产方式、建筑方式及从其他（非欧洲）国家进口的方案相比，减排方案缺乏成本效益，这是采用低碳的粘合剂、水泥、混凝土和建筑技术的主要障碍。由于二氧化碳价格上涨、能源价格变化和学习效应，低碳的粘合剂、水泥、混凝土和混凝土建筑技术的成本效益会随着时间的推移而发生变化。

3.3.2.4 融入建筑实践的过程面临挑战

由于新型水泥和粘合剂的建筑工程学特性与普通水泥不同，在建筑实践中应用新型水泥、粘合剂和高效利用熟料的混凝土建筑技术面临重重障碍。针对结构设计师和建筑师的培训项目和服务内容⁶⁵往往不含建筑领域降碳的相关内容，故规划师和建筑师大多缺乏相关的信息，缺乏所需的知识。此外，规划师通常弄不清楚建筑物的碳足迹。因为建筑碳足迹不属于必须统计的内容，也无需列示在建筑物数据中，规划者不会将它纳入规划考虑的范畴。

使用新型水泥和粘合剂时，应根据不同的应用目的，使用不同的水泥和粘合剂（见章节 3.2.3.5）。我们为此必须确保相应的粘合剂和混凝土（仅）用于特定的建筑构件。在这方面，产业链上仍存在组织和物流方面的挑战。

水泥和混凝土标准对建筑物的稳定性和耐久性至关重要。这些标准由相关行动主体协商一致后制定并通过，标准的修订通常需要数年时间。这些标准目前采用的是描述性的方法，即规定了水泥和混凝土的组分（如最大水灰比、最小水泥含量等），并对比了不同的应用领域。这种描述性方法和标准修订周期长，导致尚未被标准涵盖的创新型粘合剂和混凝土只能通过更为复杂的审批程序（具体案例中与项目有关的审批、一般建筑主管部门审批）才能用于建筑项目，由此减缓了新型产品市场推广的步伐。

鉴于上述新型水泥和粘合剂的应用障碍，非标建筑粘合剂不太受市场的青睐。

3.3.2.5 缺少二氧化碳运输方式

熟料的生产大多位于石灰石矿附近，通常远离工业中心和海港，必须通过运输才能将二氧化碳封存在其他欧洲国家。若要在现有的精炼厂和化工厂利用二氧化碳生产化学初级产品和动

⁶² 笔者不清楚从现有粘土矿中开采合适粘土的可能性，也不确定开发新矿有否必要。

⁶³ 根据（Scrivener 等，2018）的说法，中国和印度有合适的粘土，是开采其他材料时的废料。

⁶⁴ 含再生骨料的混凝土。

⁶⁵ 参见《建筑师与工程师服务费法定标准》（HOAI）。www.hoai.de

力燃料，就需要增建碳基础设施（见章节 3.2.4.4）。离开了有效的二氧化碳运输，不但企业建造工业规模的碳捕集设备时面临（过）高经济风险，也无法（在德国）积累碳捕集利用与封存产业链经验，故而无法制定相应的标准和法规。在当前的法律和社会框架内，我们可能无法及时建设二氧化碳管道基础设施（见下文），而且考虑到未来的二氧化碳点源和消费者之间的空间关系目前尚不明确，这也增加了建设难度。⁶⁶ 火车和轮船等其他运输工具将在推广阶段发挥关键的作用。

3.3.2.6 法律和社会框架条件

在投资碳捕集设备、预燃烧室和预气化设备等使用某些废弃物衍生燃料的特殊设备（Zeschmar-Lahl 等，2020）之前，水泥行业希望出台稳定的框架条件，看到清晰的发展前景，如此才能制定长期规划并避免投资错误。项目参与方认为，目前的法律框架条件不够明确，缺乏政策调控，某些措施缺乏社会接受度。

当前的法律框架对碳捕集利用与封存尤其不利。第 6 章将对此做详细阐述。输电网扩建等其他基建项目的经验表明，二氧化碳管道的建设（最初）很难得到某些地方利益相关方的接受。除非采取适当的措施获得认可，否则在建设管道基础设施时，很可能会出现旷日持久的（法律）纠纷。

项目还指出了法律框架对废弃物衍生燃料应用造成的障碍。例如，废弃物衍生燃料的生物源不符合欧盟排放交易体系标准。根据其适用标准，无法提供这些生物质燃料的可持续性证明。此外，一些利益相关者批评使用（某些）废旧材料，官僚主义障碍重重。

与传统生产方式相比，建筑领域降碳总体成本高，尤其是在建立市场和推广低碳和零碳建筑的过渡阶段。对水泥行业而言，如果有政策支持降碳产生的额外成本，将有助于气候投融资决策。

3.4 行动领域

在确定水泥行业脱碳的行动领域时，我们从上文谈及的障碍出发，旨在克服这一系列的障碍。

3.4.1 监管框架条件

为了推动碳捕集利用与封存项目，为市场推广奠定基础，必须调整法律框架并消除法律壁垒（见第 6 章）。

如果未来废弃物数量发生变化，若要尽可能大规模地利用不可回收的废弃物，生产废弃物衍生燃料，就必须不断完善现有的法律框架条件。

3.4.2 打造并维护公平竞争环境

目前，许多低碳的粘合剂、水泥、混凝土和混凝土建筑技术缺乏经济效益，所以必须打造并维护公平竞争环境提高其经济效益，使其能在与传统生产和非欧盟国家进口产品的竞争中立于不败之地。若在不采取额外措施的情况下，竞争框架（特别是二氧化碳价格水平）无法产生经济效益，那么我们需要采取措施来缓解投资成本（CAPEX）和运营成本（OPEX）的压力。

⁶⁶ 管道的建设路线和最大输送量施工完成后无法改变，所以需要从长远的角度来考虑二氧化碳源和消费者的情况。然而，现在看来，德国的化工和动力燃料产业是否能够并愿意利用水泥行业产生的二氧化碳以及愿意利用的数量尚不明确。另外一个问题是，在追求高效利用熟料以及由此导致熟料需求下降的情况下，目前的熟料生产基地是否全部能够长期运营。

3.4.3 跨产业部门的综合能源战略

为确保水泥行业能够获得紧缺的碳中性能源并朝着正确的方向发展，必须制定国家综合能源战略，为最紧缺的可再生能源的分配设立指导性框架。相关参与方可以基于能源系统的发展场景，制定和完善指导框架。该框架须规定应用方式和今后使用可持续生物质的标准。

另一个行动领域聚焦水泥行业，以及利用水泥行业产生的二氧化碳并需用氢的行业，在行动主体的参与下规划电力和氢能基础设施。

3.4.4 激励并建立低碳节能的建筑市场

本项目确定了熟料和资源高效型混凝土建筑的核心行动领域，包括建立市场和推广低碳的建筑方式。为了打造公平竞争环境（见上文），必要时须缓解运用此类方法的成本压力。还应让业主意识到“灰色排放”的问题⁶⁷，因为他们在决定建筑设计时，通常不会考虑这方面的问题。作为业主的公共部门应发挥榜样作用。本项目认为，若要催生对气候资源友好型粘合剂、混凝土和建筑方式的市场需求，可持续的公共采购是重要的手段，即国家和国有企业应自愿承诺在建筑项目中使用气候友好型材料。

3.4.5 将新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入建筑实践

将新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入建筑实践也是一个核心的行动领域。在这方面，我们应不断调整规范和标准，以适应技术和产品组合的发展。现行的规章制度尚未涵盖到一些创新方法，为了确保这类创新无需等待相关规章制度（漫长的）修订完毕便可顺利进入市场，今后可考虑采用性能证明的方式来规制，用以取代当前的描述性规定。

项目认为，建筑物碳足迹的计算和证明是建筑规划和对不同建筑方式做环保评估的重要工具。参与项目的行动主体也对此达成了广泛共识（参见第 6 章）。

为了提高结构设计师、建筑师、建筑业主和其他行动主体在熟料高效和资源高效型建筑方面的知识水平，确保这一领域的信息持续流动，应做好宣传工作，推广资格认证项目。

3.4.6 建筑业的循环经济

目前大部分的混凝土拆除物被用作为降级回收材料，用于道路建设等其他部门。一小部分用于挖掘回填和填埋场，还有很小一部分被倾倒。混凝土拆除物的各种破碎料原则上可用于生产再生混凝土，也可用于某些矿化（如再碳化混凝土细料）利用二氧化碳的工艺（见上文）。因此，加强混凝土建筑中的循环经济，有助于充分利用宝贵的资源。但在此过程中必须考虑到各产业部门资源利用的相互影响，以及能源成本和温室气体排放的相互关系（特别是在必要的物流中）。

3.4.7 规划和建设二氧化碳运输基础设施

规划和建设二氧化碳运输基础设施，是为水泥行业行动主体提供规划确定性和促进碳捕集设备投资的关键。必须确定技术和非技术性准入条件，并规划连接地点、路线和二氧化碳运输量（参见第 6 章）。

3.4.8 有关碳基础设施的社会对话

社会讨论和公众参与对于提高碳捕集利用与封存以及相关碳基础设施的社会接受度至关重要。必须就相关各方的目标和决策权进行明确的沟通（参见第 6 章）。

⁶⁷ 建筑材料生产过程中的排放。

3.4.9 研究与开发

产业界可以在直接电气化和使用氢供热等领域自主开展（进一步的）研究。要将碳捕集利用与封存投放市场并扩大规模，必须首先开展工厂内二氧化碳捕集设备的能源集成等研发。同时，为了提高混凝土建筑的熟料利用效率，须进一步研发新型粘合剂、水泥、混凝土和建筑技术。

开发可永久固定二氧化碳的新方案并确保这类技术的成熟发展也至关重要，这需要公共部门加大对基础研究的扶持。

4 水泥行业脱碳路线图的重点

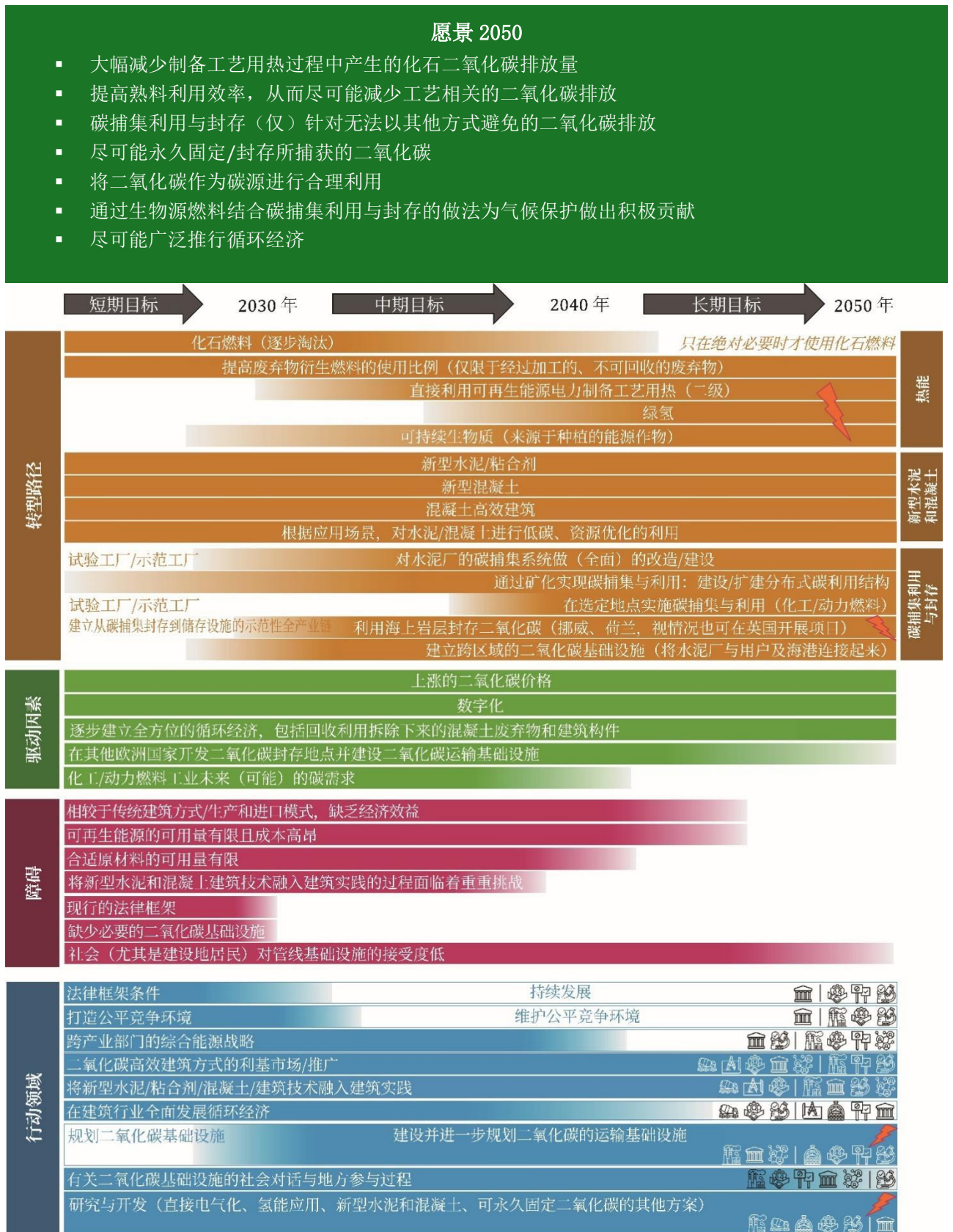
根据第 3 章中描述的愿景要素、技术、驱动、障碍、行动领域，项目制定了按时间排序的路线图。我们首先按照章节 3.2 区分了不同的技术领域，制定了三个“详细路线图”，分别为“热能制备”、“新型水泥和混凝土建筑技术”（含新型粘合剂）及“碳捕集与利用或存储”，并在第四个“总路线图”中进行汇总。

项目认为，四个路线图综合了利益相关方的讨论结果以及项目团队的分析结论，并在项目接近尾声时召开的第二次利益相关方对话中进行展示（初稿）。但是，路线图无法反映所有与会者或受访专家的具体看法。图中标注了与研讨会存在明显差异的观点（见“闪电”标志），并在下文针对各项议题进行论述。

下文介绍了图 17 所示的总路线图，阐述具体情况细节图超出了总路线图的范畴，将在第 5 章中详细介绍。详细阐述请参阅第 3 章。

路线图为每个行动领域的措施列明了九个不同的利益相关方。项目团队认为，这些行动主体对各项措施的实施负主要责任（=主要行动主体），或至少在磋商过程中参与了专业或政策交流（=次要行动主体）。主要和次要行动主体之间以竖线“|”隔开。表 6 对上述行动主体的图标做了说明。行动主体只有主次之分。我们未对其相关性做进一步的区分。此处的列示顺序与解释表格中顺序一致。

图 17: 水泥行业脱碳愿景和路线图



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

对以下行动领域中“其他行动主体”图标的解释：

跨产业部门的综合能源战略：其他工业领域（钢铁、化工）

低碳建筑方式的市场高度专门化与推广：建筑业主

在建筑实践中采用新型水泥/粘合剂/混凝土/施工技术：建筑业主、建筑监理单位

碳基础设施的规划与建设：燃气网运营商

有关碳基础设施的社会对话与地方参与过程：燃气网运营商

表 6： 路线图中的利益相关方图标（主要行动主体|次要行动主体）

图标	利益相关方群体	说明
	水泥制造商	既生产熟料又生产水泥的水泥企业
	混凝土制造商	加工水泥以生产混凝土的企业
	规划师/建筑师	设计、规划建筑施工和土木工程（包括所用材料）并监督施工过程的行动主体
	机械装备制造	机械装备制造企业
	行业协会/专业机构	企业的联合组织，旨在对内促进某一经济行业的合作（例如英国国家建筑工程师学会），对外统一代表其专业目标和经济政策目标
	有组织的市民社会	公民以具有理念目标或社会政治目标的社团形式、围绕某一主题组成社团（例如环境协会）
	政府机关/主管部门	国家（或国家任命的）人员和机构，因社会（例如选民）赋予的权力负责做出政治决策，将这些决策具体化并推行实践
	学术界	独立于企业的外部专家，所涉专业领域包括：水泥和混凝土的制造以及下游的混凝土应用、水泥生产的脱碳、水泥行业作为能源系统组成部分的系统分析、社会接受度研究和环境研究、其他相关专业领域。
	其他行动主体	其他行动主体，例如来自水泥、混凝土、建筑行业以外的工业领域（例如化工、钢铁），工艺气体制造商/加工商、建筑业主等

4.1 愿景

大幅降低熟料生产过程产生的碳排放，（最迟）到 2050 年须实现水泥行业脱碳愿景。首先，替换能量源可减少工艺用热制备过程中所产生的（化石基）碳排放量。其次，整条产业链应尽量高效使用熟料，在建设工作量保持不变的情况下，所需的熟料量应进一步下降，应尽量减少工艺流程相关的排放。碳捕集利用与封存可以（在很大程度上⁶⁸）防止剩余的、不可避免的碳排放。应尽可能永久地固定或封存捕集到的二氧化碳，不增加地球碳循环的化石碳素。特定情况下，可考虑将水泥行业产生的二氧化碳用作其他产业部门的碳源，即使这种做法无法确保永久固碳。⁶⁹对于因二氧化碳捕集不完全等原因造成的无法避免的残余排放，可采用生物燃料（包括生物源废弃物衍生燃料）的负排放技术，并结合二氧化碳捕集和永久固定或封存来进行补偿或超额补偿，最终确保水泥行业能为气候保护做出积极的贡献。依据此愿景，水泥和

⁶⁸ 目前的碳捕集方法通常无法实现 100% 碳捕集。目前来看，前景广阔的工艺可以达到 90% 或更高的捕集率（Voldsund et al., 2019）。低排放强度石灰和水泥（LEILAC）工艺（LEILAC 项目，2021）属于例外，虽然它只处理工艺相关的排放，但反应器在煅烧过程中可以捕集几乎纯净的二氧化碳。

⁶⁹ 需根据具体情况来决定。

混凝土工业应尽力广泛推行循环经济，提高资源效率。在这方面，熟料煅烧过程中废弃物的热利用和材料利用是关键。此外，（混凝土）建筑业应全面建立循环经济。

4.2 转型路径

4.2.1 热能制备

根据路线图的规划，基于化石燃料的热力供给占比将不断减少，中长期将被完全摒弃。长期来看，只有当替代能源不充足时，才会使用化石燃料（这种情况不大可能发生，也不希望发生）。

应提高废弃物衍生燃料的使用比例，以此替代化石燃料。未来，废弃物衍生燃料的生产原料仅限于那些无法回收的废弃物。废弃物组成未来将不断改变，预计水泥行业所用废弃物的热值和环保性能会不断降低，因此废弃物处理将变得愈发重要。

作为补充方案，我们应尽可能采用可再生能源来制备工艺用热，并围绕着（可再生能源）电力的直接应用场景做更深入的技术研发。电气化的 LEILAC 工艺前景广阔，可为煅烧炉⁷⁰提供工艺用热，从技术上来看，我们至少在中期可实现电力的直接应用，在二价运行中直接利用可再生电力将产生经济效益。在熟料煅烧工艺中运用（绿）氢也具备技术上的可行性。由于氢气的燃烧特性与碳基燃料不同，因此在供热应用中的占比有限，这也是亟待解决的研发课题。氢能供给在中短期仍存在缺口，因此路线图对熟料煅烧工艺中的氢能应用做了长线规划，并且只适用于当地有可用氢能的情况。这取决于未来氢气管网的空间布局以及当地是否具备足够的（可再生）电力。从技术角度来看，基于能源作物的（可持续）生物质⁷¹能够完全满足工艺用热的需求。根据路线图，水泥行业在应用生物质时，必须确保其可持续性。中期看来，如果其他能源部门（如电力系统、家庭部门）具备合适的替代能源，则可减少生物能源用量，从而释放（水泥）工业使用生物能源的潜力。⁷²

在中长期范围内，所有可再生能源皆是有限资源。因此，在利用可再生能源方面，不同应用场景之间存在竞争关系。目前还无法确定未来能源系统中可再生能源的分配情况。其可用量和成本效益因水泥行业的分布不同而有所差异，这也是研究需关注的事项。项目未能就未来熟料煅烧工艺应（主要）利用哪些可再生能源达成共识（见闪电标志）。为了实现愿景，我们要推动水泥行业为气候保护做出积极的贡献，为此必须提高废弃物衍生燃料中生物废弃物的使用比例，或在一定范围内使用生物质。

4.2.2 新型水泥和混凝土建筑技术

若要通过新型水泥、粘合剂和混凝土施工技术提高熟料利用效率，整条混凝土建筑产业链上的措施必须相互配合。目前，一部分新型水泥和粘合剂⁷³已在高度专门化的市场（利基市场）上获得运用。根据路线图，中短期应进一步扩大上述产品的应用范围。中长期应减少或避免钢铁生产过程中高炉矿渣和燃煤发电所产生的粉煤灰。这意味着，部分新型水泥虽在中短期内有助于提高熟料效率，但长期势必会停止这类产品的生产。因此，我们必须围绕煅烧粘土、混凝土碎砂、再活化钢厂的矿渣等其他原料的应用，（继续）开展研究工作，确保上述原料的足量供给，以便在中长期将它们用作水泥的主要成分，大大提高熟料的利用效率。

⁷⁰ 煅烧工艺占工艺用热需求的约 60%（Agora 能源转型，2019）

⁷¹ 例如短期轮作种植园

⁷² 参见例如（Prognos et al., 2021）

⁷³ “新型水泥”指主要成分含波特兰水泥熟料的粘合剂。目前（在 DIN EN 197-5 标准发布前），这种形式的水泥尚未上市，或只在获得许可或经一般建设监管机构批准后才能上市。这里所说的“新型粘合剂”指不含传统波特兰水泥熟料的粘合剂。

在新型混凝土领域，路线图计划持续增加含再生骨料的混凝土（再生混凝土）的应用比例。这一措施有助于提高资源效率。⁷⁴ 按照路线图中长期的规划，我们须进一步开发并在市场上投放水泥含量比当前更低的新型混凝土产品，以提高熟料利用效率。这需要业内对混凝土成分做精确分类和微调。在产品的市场导入过程中，也需相应调整市场规则，积累全面的专业知识和实践经验。

未来，混凝土高效的建筑方式应至少能够达到当前的建筑性能。为此，路线图认为有必要进一步扩大现有混凝土技术的应用范围（如插入式空心体、预应力天花板），用耐腐蚀性材料（如碳、玄武岩）制成的替代加固材料取代目前常用的结构钢。这项措施可减少建筑构件的厚度，从而提高混凝土效率。⁷⁵ 从建筑工程学的角度看，不存在任何制约上述方案大规模推广的因素，但我们仍需加大研究和市场推广力度。根据路线图的建议，应尽快在合适的细分市场上推广一部分替代材料（如玄武岩），其他替代材料（如碳）将在中长期发挥作用。梯度混凝土、超高强度混凝土和 3D 打印工艺等混凝土高效建筑方式已被应用于一些小型或试点项目中。路线图计划最迟在中期扩大这类建筑方式的应用规模，进一步提高其市场份额。

目前大宗交易的水泥原则上适用于混凝土建筑的各个应用领域，混凝土制造商通常根据价格来选择水泥产品。熟料效率高的新型水泥和粘合剂并不适用于所有混凝土建筑的应用场景。室内应用场景和简单的外部建筑构件对混凝土产品的耐久性要求不高，在这里，熟料效率高的水泥发展潜力巨大。若要提高新型粘合剂的市场占有率，我们首先要开发差异化的应用场景，根据不同的使用目的，相应提供解决方案。在混凝土建筑领域，混凝土标准须加入水泥含量测定的要求。在实际应用时，还可以针对熟料效率优化测定要求。开发差异化的粘合剂和混凝土应用场景是充分挖掘上述减排潜力的先决条件，也是一项非常重要的跨领域任务。

4.2.3 碳捕集利用与封存（CCUS）

为了捕集无法完全通过其他方式避免的剩余二氧化碳⁷⁶，熟料窑必须安装碳捕集设备。按照路线图，德国将在短期内建立一批试点和示范设施，测试并进一步开发不同的碳捕集工艺。⁷⁷ 中长期内（最晚从 2030 年左右开始），德国将陆续安装工业规模的碳捕集设施，如有必要，还将对窑炉进行改造或重建。

根据路线图，部分捕获的二氧化碳将通过矿化被永久固定。在混凝土建筑（例如在新拌混凝土中注入二氧化碳、在二氧化碳中硬化预制混凝土建筑构件）或回收再利用（对混凝土拆除废弃物进行再碳化）的各道工序中均可采用此类工艺。混凝土的生产和回收利用在空间布局上高度分散。因此，基础设施的网络也应更加分散，确保可以将二氧化碳和混凝土或拆除废弃物集中到合适的地点，而不是将二氧化碳用于化学原料和动力燃料的应用场景或碳封存场景。

当二氧化碳用于生产化学初级产品和动力燃料时，其利用率高于矿化工艺。但是，必须考虑到，二氧化碳的捕集只能在制成品的生命周期内进行，而且在生产过程中需要大量的氢气。根据路线图，在无法保证永久固定二氧化碳的情况下，倘若能以有利于系统⁷⁸的方式提供充足的绿氢，并且当碳制备相较于其他方案（如直接空气捕集）更具优势的话，我们可将捕获的一部分二氧化碳用于化学原料和动力燃料的生产。路线图假定，中短期内的可再生电力和绿氢供给依旧有限。因此，上述应用场景属于长期规划。尽管如此，我们在中短期内必须建成试点和示范设施，以便进一步开发碳捕集与碳利用的工艺。

⁷⁴ 再生混凝土的减碳效率取决于具体细节，但减排效果总体有限，因为再生骨料的应用并不能改变或至少不会显著改变熟料需求。

⁷⁵ 使用结构钢时，建筑构件厚度的测定必须考虑到防腐问题，因此建筑构件的设计厚度往往超出静力学的要求厚度。

⁷⁶ 其中包括无法以其他方式回收进行热利用的废弃物所产生的化石基二氧化碳排放。虽说水泥行业原则上可以运用碳中和的能量来避免此类二氧化碳排放，但依然会在其他地方（废弃物部门）产生排放。

⁷⁷ 路线图中没有指明应优先采用哪种碳捕集工艺。

⁷⁸ 这表示氢或制氢所需的电力在用于其他领域（如热泵、电动汽车）时不会更具气候保护效应。

针对捕集到的无用二氧化碳，路线图建议进行地质封存。在目前及在可预见的未来，地质封存在德国不太可行，法律上不允许，社会和政策也不支持。当前可以考虑的封存地点包括了一部分欧洲国家（挪威、荷兰、英国、丹麦，视情况也可考虑冰岛）境内枯竭的天然气田和油田，以及北海海底的含盐蓄水层。这些地方正在开发用作碳封存的地质储存设施。挪威计划到2024年建成示范工程，覆盖从水泥厂到碳封存设施的整条碳捕集与封存产业链。按照路线图的规划，德国在建设大规模碳捕集设施前，境内的水泥厂和碳基础设施亦将落地一批示范项目。二氧化碳的地质封存是否长期可行？我们是否只能将其视为一种临时手段，尽量缩短地质封存技术的应用时间，直至可永久固碳的工艺成熟上市？对此，参与项目的行动主体意见不一。

路线图假定，绝大多数情况下的二氧化碳利用（或封存）不会直接发生在水泥厂里。因此，我们应尽早规划和建设连接水泥厂、二氧化碳用户和海港的碳基础设施，这是碳捕集形成一定产业规模的先决条件。然而，有待运输的二氧化碳总量和水泥厂的具体地理位置（只有少数水泥厂毗邻大的航运通道）不明，火车和轮船在碳基础设施系统中扮演着重要角色，尤其将在加速发展期发挥举足轻重的作用。在增长阶段，二氧化碳供给方与接收方的关系尚不明确。根据路线图，中长期的二氧化碳运输将主要依靠管网。我们必须尽快行动起来，才能确保在中期内建成此类网络。

4.3 驱动因素

二氧化碳价格将不断上涨，这是水泥行业脱碳的一大关键驱动因素。转型路径包含的各种二氧化碳减排方案对应着不同的减排成本⁷⁹。如今，二氧化碳价格已在推动水泥行业努力减排（如提高废弃物衍生燃料的使用比例）。随着未来二氧化碳价格的不断上升，越来越多的碳减排方案将比传统工艺更具经济竞争力。然而，单单依靠二氧化碳价格并不能保证水泥行业的转型成功（见章节 3.3.1 的驱动因素和章节 3.3.2 的障碍）。

其他推动因素也有助于各类减排方案的成功落地，例如改善信息管理和质量控制体系、运用人工智能等手段进一步优化生产流程等，这类数字化举措可大大促进混凝土建筑产业链上水泥熟料的高效利用。越来越多的人认识到资源的有限性，也积极投身循环经济的建设，深化混凝土建筑领域的回收再利用工艺，并借助矿化手段利用好二氧化碳资源。

一部分欧洲国家提供二氧化碳封存点，并配套了二氧化碳运输的基础设施，这为妥善处理德国水泥厂的碳排放带来了希望，也促使企业筹建相应的二氧化碳捕集设备。化工产业和动力燃料产业未来有着相当高的碳需求，德国国内产生的二氧化碳有望作为（部分）潜在的碳源，对其加以利用。这一设想进一步推动了相关碳捕集与利用工艺的开发和测试工作。

4.4 障碍

路线图并没有从时间角度入手，深入探讨障碍因素。在笔者看来，图 17 中障碍因素的演变过程大体说明了在哪些时间段（短期、中期、长期）可以或必须消除哪些障碍，以便实施上文所描绘的转型路径。

相比传统产品、工艺或进口水泥，目前的新材料、新技术的经济效益较低，这是阻碍大规模应用低碳粘合剂、混凝土和建筑技术的主要因素。碳中和⁸⁰能源（电力、氢能和生物质）当前供应不足，这类能源在水泥行业的应用（尚）不具备经济效益。预计这类碳中性能源未来（至少在中期，也有可能长期）依然属于稀缺资源，价格也将保持在高位。这种稀缺性将限制可再生能源的利用，阻碍可再生能源制备热能、生产绿氢或运用绿电生产基于二氧化碳的化学

⁷⁹ 项目并未对各种减排方法的二氧化碳规避成本进行分析，因此无法对减排方法做“优劣排序”。

⁸⁰ 按直接排放量计。

原料和动力燃料。特定情况下，使用新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术的成本远比传统建筑工艺的成本要高。但供应商做宣传时会刻意强调新工艺比传统建筑方法更具成本优势。项目未对不同方案做经济效益分析，因此，我们很难确定各种方案的市场竞争力未来将有怎样的变化。碳捕集利用与封存工艺的资本和运行成本至少在中短期内将明显高于传统方式。

随着二氧化碳的价格不断提高，与欧盟碳排放权交易体系内的传统替代方式相比，碳高效产品和工艺的中长期的经济效益将逐步提高（见上文）。然而，若要进行大规模的市场推广，还须尽早积累经验，不能单单依靠市场激励。除了缺乏经济性和实践经验外，碳高效产品和工艺在扩大减排方面还存在其他的障碍。

合适的原料供应量有限，这势必将在多方面阻碍熟料高效与资源高效的混凝土建筑技术的推广与应用：中短期内，高炉矿渣和粉煤灰的供应量减少，市场现有的熟料高效型水泥、波特兰复合水泥和复合水泥的使用率也将随之下降。当前，德国煅烧粘土的供应量十分有限，这将在短期内阻碍波特兰复合水泥的大规模应用。因缺乏合适的再生骨料，再生混凝土的推广也会面临重重的挑战。

如何在建筑实践中运用新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术，这仍是目前的一大挑战（参见章节 3.3.2.4）。监管和组织架构方面也存在诸多阻碍因素：一成不变的技术标准、规划未考虑二氧化碳效率、因使用不同的水泥和混凝土产品而造成额外的成本（没有相应的补偿）。这些因素（目前）阻碍了熟料高效方案在市场上的快速推广。总的来说，新产品和新型建筑技术将不断涌入市场，如何整合这些产品和技术将是一项长期的考验。路线图要求在短期内消除当下存在的主要障碍（例如规划未考虑二氧化碳效率的问题）。

本项目将现行的碳捕集利用与封存法律视为发展的最大障碍。欧盟碳排放权交易体系不接受碳捕集与利用的抵消⁸¹，相关法律也不允许碳捕集与封存。此外，还有其他一系列的法律壁垒有待破除。这些法律壁垒制约了碳捕集与利用设施以及二氧化碳运输设备的设立（参见第 6 章）。路线图计划在短期内消除这方面的障碍，推动碳捕集利用与封存工艺的普及。

人们很难从熟料产地运走二氧化碳，这是目前碳捕集利用与封存解决方案的主要障碍。除了法律问题（见上文）外，碳基础设施的规划和建设还面临着另一重障碍：目前我们尚不清楚未来二氧化碳运输的起止点和运输量。这增加了管线规划的难度，因为管线在设计时就需设定今后二氧化碳的管道输送量，一旦管线建成，就无法再改变管网容量。路线图要求尽快澄清关于碳基础设施的重要未决问题，迅速完成规划，以便在转型路径规定的期限内建成所需的基础设施。

（预计）较低的社会接受度也将是阻碍二氧化碳管线建设的不利因素。根据此前基础设施建设项目的经验，地方层面可能会出现民众抵制活动或旷日持久的法律纠纷。计划建设碳基础设施的每个地点都很可能遭遇来自地方上的阻力。在整个建设期间，我们必须逐步逐地地扫清障碍。

4.5 行动领域

根据路线图计划，近期需要创建以目标为导向的法律框架，尤其要尽快消除当前碳捕集利用与封存解决方案的监管障碍，具体措施包括对《德国二氧化碳封存法》（KSpG）的修订，以及批准对《伦敦议定书》第 6 条的补充。⁸² 从中长期来看，应当持续制定和调整法律规则，从而配合和支持上述方案的实施。

路线图将在短期内确保低碳型的粘合剂、水泥、混凝土和建筑技术逐步具备经济效益，并创造公平的竞争环境。欧洲排放交易和欧洲层面正在谈判的碳边境调节机制（Carbon Border

⁸¹ 例外情况：根据欧洲法院的一项判决（“谢菲尔考克碳酸钙（Schaefer Kalk）判决”），允许使用二氧化碳生产沉淀碳酸钙。

⁸² 采取行动的必要性详见第 6 章。

Adjustment Mechanism，缩写为 **CBAM**）是实现上述目标的重要工具。如果中短期内，在不采取额外措施的情况下，现有竞争机制无法产生经济效益，则需要找到适当方式（例如借助气候保护合约）来缓解资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）的压力。

在中短期邀请各界参与制定跨行业的综合能源战略也在路线图中指出。最迟在中期内，在可再生能源大规模应用于熟料煅烧工艺之前，该战略须确保有充足的投资资本流向正确的方向，中长期也将涌现一系列的能源基础设施扩建项目。

为了积累知识和实践经验，以便为节能低碳建筑方式的市场推广做好准备，路线图中还建议在短期内建立高度专门化的市场（利基市场），这类市场对相应产品及建筑方式产生特定需求，并且随着时间的推移，规模将逐步扩大。上述举措主要针对新型粘合剂、混凝土和建筑技术，因为这类产品与技术所需的作业步骤不同于当前常见的方法步骤。公共部门采购需要保证可持续性，构建相关的细分市场。

根据路线图，我们必须将新型水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入建筑实践，相关法规须不断吸纳新的发展要求，行动主体也必须与时俱进地不断更新自身的知识储备。其中一项核心措施是将碳足迹纳入建筑领域，并在短期内实现。

建筑业全面发展循环经济是一项中长期的挑战，需在混凝土拆除物的破碎料分离方面取得技术进步。必须立刻着手实施一系列的举措，包括加强再生混凝土中可再生骨料的应用。

此外，依据路线图当务之急是尽快澄清有关未来的碳基础设施的相关问题（如技术和非技术性准入条件），以及（初步）规划管网路线和运输量。在此基础上，中短期有望开启基础设施建设，以确保最迟到 2030 年可以从首批地点运输二氧化碳。此外，按照转型路径的规划，从即日起应具备能力大规模运用碳捕集技术，随后扩建碳基础设施的网络，涵盖到越来越多的水泥厂。规划也将根据实际情况不断做出调整。关于管网接入点的问题，到底应该保证所有地点的“无差别”接入，还是根据运输距离和地理条件，依照效率标准⁸³来甄选接入点，项目参与方对此持有不同的意见。

一场围绕碳基础设施的必要性、范围和具体设计的社会对话很快将启动，由此为基础设施的规划和建设奠定基础。鉴于时间紧迫且（水泥行业的）目标减排量大，我们无法保证整个过程符合“先社会对话，再规划，最后建设基础设施”的常规流程。对话、规划和初步制定二氧化碳运输方案等环节很可能存在时间上的交叠，（必须）同时进行。这就要求我们在开展社会对话时一定要认真审慎，沟通清楚相关各方的目标和决策权。

为了持续改进现有方案并在必要时寻找和开发创新的解决方案，必须在路线图涵盖的整个时间范围内坚持不懈地开展研发工作。

表 7 简明列示了行动领域的核心措施（也可参见第 6 章，以及实施措施的主要行动主体）。路线图建议应吸纳其他行动主体积极参与，出谋划策（参见图 17 以及第 4 章开头表 6 的利益相关方群体说明）。

表 7： 路线图行动领域核心措施的实施主体

行动领域	措施	行动主体
法律框架条件	修订《德国二氧化碳封存法》（KSpG）（扩大二氧化碳的使用范围，目前限制于封存）	德国联邦政府，德国联邦经济和气候保护部
	扩大《联邦污染防治法》（BImSchG）的适用范围，覆盖碳捕	德国联邦政府

⁸³ 允许/应该投入多少成本（如管线长度等）来运输多少二氧化碳量。

行动领域	措施	行动主体
	集与利用的二氧化碳捕集设备（目前只允许碳捕集与封存）	
	批准对《伦敦议定书》第6条的补充（支持用以封存的跨境二氧化碳运输）	由德国联邦政府批准 与二氧化碳封存地所在国家签订双边协议（或在欧盟层面制定超国家法规），并与二氧化碳供方企业谈判
打造公平竞争环境	碳边境调节机制（CBAM）	欧盟委员会、理事会和议会
	碳差价合约（CCfD）	企业与联邦政府签约，解决气候友好型生产方式的额外成本（德国联邦经济和气候保护部开发的碳差价合约试点方案）
跨产业部门的综合能源战略	系统开发战略 ⁸⁴	德国联邦经济和气候保护部，学术界参与
低碳建筑的市场高度专门化与推广	可持续的公共采购	公共部门作为建筑开发商（联邦政府、联邦州、城镇、公共企业）
	宣传活动和信息服务（特别针对规划师及业主）	混凝土生产企业、规划师、建筑业主和行业协会
将新型水泥/粘合剂/混凝土/建筑技术融入建筑实践	修订建筑和产品标准	建筑业主、建筑监理机构、建材行业、建筑行业 德国钢筋混凝土委员会（DAfStb）的科研人员 和顾问工程师/测试工程师
	为了支持在建筑实践中引入新型水泥和混凝土建筑技术，（尤其要为建筑师和规划师）提供信息、培训和进修机会	施工监理、行业协会、德国钢筋混凝土委员会（DAfStb） 高校和科研机构（比方说可以纳入教学内容）；行业协会和机构，如“混凝土信息中心”（负责提供信息和培训）、德国钢筋混凝土委员会（DAfStb）（提供规划协助）
	引入建筑物的碳足迹（强制标示，必要时分类，必要时限制）	联邦政府和各部委（德国联邦经济和气候保护部；联邦住宅、城市发展和建设部）是引入碳足迹强制义务的行动主体 搭建建筑物排放数据库，关注建筑材料，可考虑委托德国可持续建筑协会（DGNB eV）负责这项任务。
在建筑行业全面发展循环经济	有关再生混凝土、混凝土拆除物分离、模块化建筑的研究、试点项目和示范项目	科研人员、混凝土制造商、水泥/混凝土的综合类企业、设备制造商、规划师/建筑师

⁸⁴ www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html

行动领域	措施	行动主体
碳基础设施的规划与建设	澄清未决问题，如技术和非技术性的准入条件、（初步）规划路线和运输量	燃气网运营商、联邦州（执行/审批）、联邦政府/监管机构（监管和碳管理战略）、碳源所有者企业
有关碳基础设施的社会对话与地方参与过程	发起、组织和实施社会参与活动及对话	联邦政府/州政府、有学者和企业参与的市民社会组织、燃气网运营商、专业的对话/沟通管理机构
研究与开发	研究直接电气化、氢能应用、新型水泥和混凝土、实现二氧化碳永久固定的创新工艺	企业、高校和研究机构（包括行业协会），视情况也包括公共资助机构

5 深入研究特定领域的详细路线图

下文将阐述“热能制备”、“新型水泥和混凝土建筑技术”（包括新型粘合剂）和“二氧化碳捕集利用或封存”三个技术领域的详细路线图。详细路线深入探讨了总路线图（参见第 4 章）描述的发展趋势，并从微观层面呈现上述技术领域的措施，详情请参阅第 3 章。

5.1 热能的详细路线图

图 18: 热能的愿景和详细路线图



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

说明：关于措施实施的利益相关方群体的定义（即路线图中行动领域右侧的图标），请参见第 4 章开头的解释和表 6。

在行动领域“尽可能大规模利用不可回收垃圾”中，“其他行动主体”主要指废弃物治理部门的行动主体。

5.1.1 愿景

图 18 显示了热能详细路线图。愿景的核心要素是改变熟料生产过程的热能制备，从而大幅减少化石碳排放。使用生物燃料或废弃物衍生燃料中的生物燃料成分（结合碳捕集利用与封存）⁸⁵可以对气候做出积极贡献，（至少部分）抵消水泥行业剩余的排放，尤其是工艺相关的排放。使用废弃物衍生燃料有助于促进热能和材料的废物利用，大规模推动循环经济。

5.1.2 转型路径

在技术转型路径层面，我们将减少并在中长期内尽力淘汰化石燃料，以占比逐步提升的废弃物衍生燃料和可再生能源作为替代能源。根据德国《循环经济法》第 6 条规定的废弃物等级制度，只有无法以其他方式循环利用并以适当方式处理过的废弃物才能（继续）加以利用。因此，提高废弃物衍生燃料的比例是明智之举。⁸⁶

关于哪些可再生能源可以并应该发挥主要作用，行动主体未能达成共识（见“闪电”标志）。他们对技术用途（如回转炉中的氢燃烧器或等离子燃烧器、煅烧炉中的直接电加热）、各种能源的预期可用性和经济性的评估并不相同。如果不能提供足够数量的可再生能源，个别行动主体认为可能需要长期使用化石燃料。我们必须进一步优化余热的内部（例如将来用于二氧化碳捕集）和外部利用（输入供热网络）。⁸⁷

5.1.3 驱动因素

要使废弃物衍生燃料和可再生能源比化石燃料具有更高的经济效益，（上涨的）二氧化碳价格是关键驱动因素。在某些情况下，废弃物衍生燃料已经实现经济性，并得到广泛使用。二氧化碳价格上涨可使更多的废物破碎料产生经济效益。至于各种可再生能源是否以及何时能超过化石燃料的成本效益，这一点不仅取决于二氧化碳的价格，还取决于能源价格的走向。

在废弃物衍生燃料领域，由于塑料已在市场上大量流通，预计中短期塑料废弃物总量将不断增加。但塑料的机械回收能力有限⁸⁸，化学回收估计只能在中长期发挥重要作用，因此笔者认为，塑料废弃物衍生燃料的可用量会暂时增加。

5.1.4 障碍

废物破碎料和整个废弃物处理系统的发展趋势表明，最迟在中长期内，可用于废弃物衍生燃料的剩余废弃物（绝对）数量将减少，质量将降低。虽然通过提高熟料效率能够减少热能需求⁸⁹，但这并不意味无法进一步提高废弃物衍生燃料在能源组合中的占比。然而，行动主体认为，当前的法律框架构成了废弃物衍生燃料占比上升的一重阻碍。

碳中性⁹⁰能源（电力、氢和生物质）的供应量尚不足，这类能源在水泥行业中的应用（尚）不具经济效益。我们认为，可再生电力和绿氢的可用量将逐步增加，工业部门的生物质量也将上升。但这类碳中性能源未来（至少在中期，有可能长期保持不变）依然会出现供应不足的情况，价格也将保持在高位。因此，改变熟料生产的能量供给来源这条路径并不一定会取得成功。基础设施不足可能会影响电力和氢能的利用。如果大量使用绿电和绿氢，可能会在中长期产生

⁸⁵ 为了对气候做出积极贡献，需要对二氧化碳进行永久固定，见章节 5.3 中的碳捕集利用与封存路线图。

⁸⁶ 未来能否获得足够数量的合适废料依然是一个充满不确定性的问题（见章节 3.3 中关于挑战的内容，以及章节 3.2.1 中关于废弃物衍生燃料的信息框）。

⁸⁷ 本项目并未深入探讨余热利用及其潜力这个主题。

⁸⁸ 从技术角度看，混合塑料废物存在局限性，从市场角度看，对再生塑料初级产品的需求也存在局限性。

⁸⁹ 见章节 5.2 中的新型水泥和混凝土建筑技术路线图。

⁹⁰ 按直接排放量计。

阻碍作用。短期内，由于直接电气化方法和氢能的技术可行性尚不明确，预计只会在试点和示范项目中加以使用。

5.1.5 行动领域

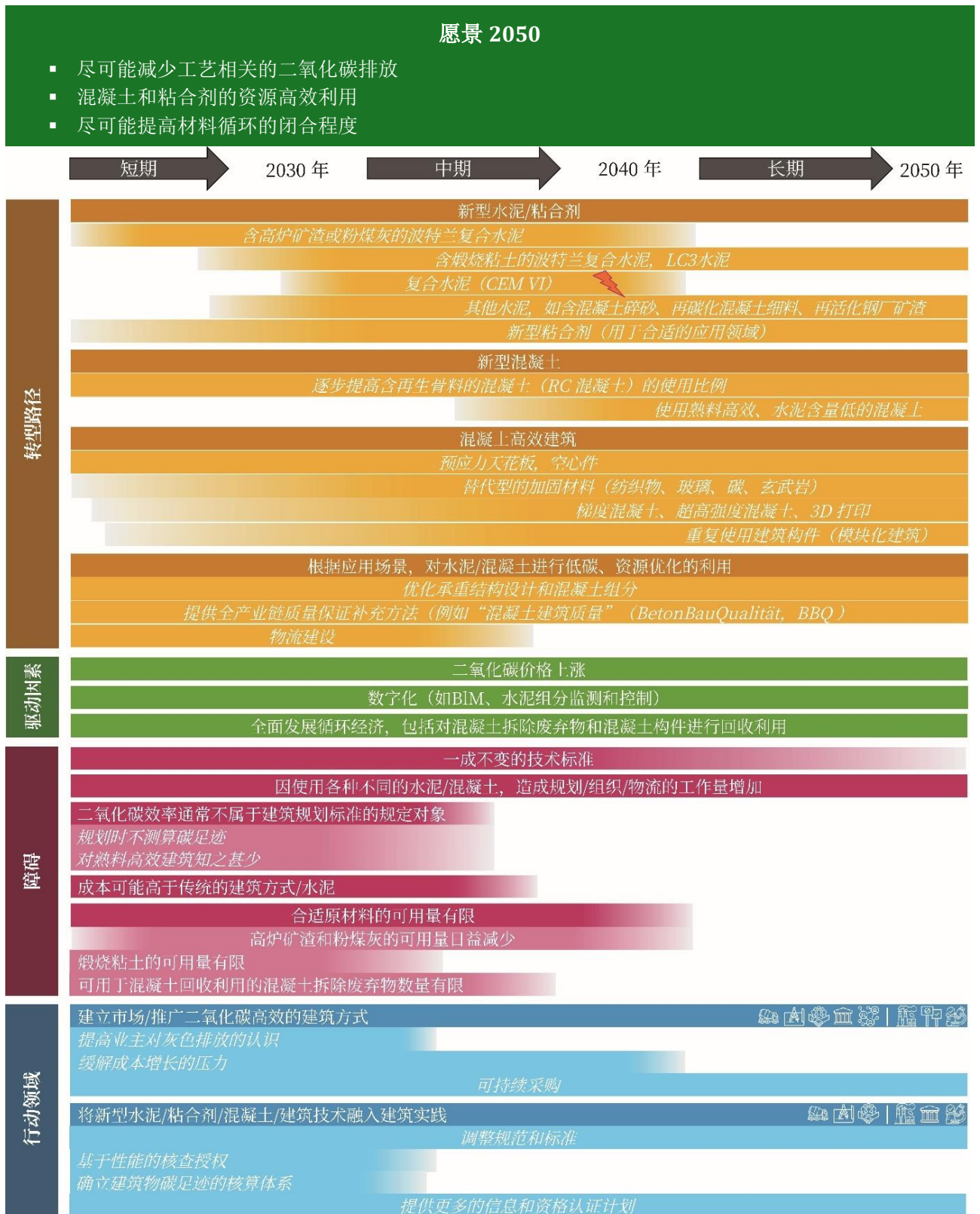
由此可见，在中短期内，产业界可以（进一步）研究和开发直接电气化和氢能的应用领域。

跨产业部门的综合能源战略保证了（伴随着可再生能源加速扩大的）中期发展方向，并有助于确保水泥行业所需生物质的可持续供应。从跨产业部门的角度看，倘若可再生能源有助于实现气候目标，我们就需要缓解运营成本压力的工具，用这一工具相应刺激并扩大可再生能源在水泥行业中的应用规模。为了在这个过程中尽可能避免出现基础设施瓶颈，水泥行业应参与氢能和电力的基础设施规划。

我们将在短期内着手解决目前法律框架中的薄弱环节，尽量大规模利用废弃物衍生燃料中的不可回收废物。随着法律框架的逐步完善，水泥行业也可以利用其他废物破碎料。此外，虽然可用废弃物的平均质量在不断下降（热值降低、污染负荷增加），但如果能确保废弃物衍生燃料的质量，也将提高其在总体应用中的占比。

5.2 新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）详细路线图

图 19: 新型水泥和混凝土建筑技术的愿景和详细路线图



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

说明：关于措施实施的利益相关方群体的定义（即路线图中行动领域右侧的图标），请参见第 4 章开头的解释和表 6。

在行动领域“建立市场/推广低碳的建筑方式”中，“其他行动主体”主要指建筑业主、不动产行业的公共和私营行动主体。

5.2.1 愿景

图 19 显示了“新型水泥和混凝土建筑技术”的详细路线图。愿景的核心要素是通过减少熟料需求量，尽可能减少工艺相关的碳排放。此外，应提高材料利用率和二次原料使用，从而在使用混凝土和粘合剂过程中尽可能节约资源。混凝土建筑如要实现上述目标，应尽可能提高材料循环的闭合程度。

5.2.2 转型路径

转型路径对应章节 3.2.3 阐述的减排杠杆：使用低熟料水泥和粘合剂、新型混凝土、混凝土高效建筑，根据应用目的跨领域地使用各种不同的粘合剂和混凝土。

使用含高炉矿渣或粉煤灰的波特兰复合水泥通常可在短期内降低碳排放。如何迅速扩大市场份额是一大难点。中长期估计无法获取其所需原料。最迟在中期内，煅烧粘土可发挥巨大作用，成为波特兰复合水泥或 LC³ 水泥⁹¹ 的新原料来源。挑战在于如何建设（煅烧）粘土的供应体系，以及积累使用此类水泥的经验。使用高炉矿渣的复合水泥原则上可为中期减排做出重大贡献。然而，一方面，无法保证所需的高炉矿渣长期供应，这类复合水泥的产量在水泥转型过程中将持续减少，预计转型中期竞争将愈演愈烈。另一方面，由于尚未针对这种复合水泥制定标准，也没有在混凝土建筑中应用复合水泥的经验。因此，这类复合水泥制品的使用时间窗口较短，能否成功进入市场尚未可知。不过，各方对此评估意见不一（见闪电标志）。目前正在研究和开发含有新型主要成分（如混凝土碎砂；再碳化、再生水泥石；再活化钢厂矿渣）的其他水泥。如果取得成功，将有助于在中长期内减少排放。有鉴于此，必须将含有新型成分的其他水泥产品也纳入相关法规，并积累使用经验。新型粘合剂目前已用于高度专门化的市场（利基市场）⁹²，可考虑在特定应用领域扩大规模，帮助实现减排目标。

原则上，短期内可以扩大混凝土生产中再生骨料的使用，从而减少建筑垃圾的填埋量，降低初级材料的采购需求，这对提升混凝土建筑的资源效率尤其意义重大。但所需的熟料量不会因使用再生骨料而发生（显著）变化，所以该方案对二氧化碳决算的直接影响须根据具体情况⁹³来评判，原则上影响较小。不过，再生骨料的再碳化可能促进碳捕集与利用（见章节 5.3）。从中长期来看，提高磨细非活性成分（如石英砂、未煅烧的石灰石）的比例，并精确匹配混凝土组分，可降低水泥在混凝土中的占比。此类方法仍处于实验室阶段，需调整产业链、积累经验，并修改法规（如混凝土标准）。

在混凝土高效建筑方面（减少混凝土用量的同时保持混凝土构件的原有性能），德国市场上已推出了预应力楼板和空心件，我们可以进一步扩大该应用领域的规模。如果能成功消除对替代加固材料碳排放的担忧，并且在市场推广取得成功（玄武岩⁹⁴），或即使成本高于结构钢，但依然有相应市场需求（玻璃、不锈钢），那么最迟在中期内可使用无腐蚀加固材料代替传统结构钢，为提高混凝土利用效率做出重大的贡献。梯度混凝土、3D 打印和（超）高强度混凝土已在试点和特定项目中得到展示和应用。一旦这些技术的市场推广取得成功，就能在中期内

⁹¹ LC³ 代表石灰石煅烧粘土水泥（Limestone Calcined Clay Cement）。参见：www.lc3.ch

⁹² 例如 Solidia®：www.solidiatech.com

⁹³ 例如，运输距离和混凝土对水泥需求的变化。

⁹⁴ 用玄武岩生产混凝土加固材料的案例：

www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/betonbewehrung-aus-basalt-deutsche-basalt-faser-gmbh-fasalt

大幅提高混凝土的利用效率。重复使用建筑构件也有助于提高混凝土的利用效率。本项目对此不做深入讨论。

由于上述减量方法只能用于特定的建筑作业，必须根据应用目的使用不同的水泥和混凝土，并加强质量保证，以便在市场上推广相应的新技术。在某些地方，还须针对混凝土回收利用和煅烧粘土等多样化产业链额外建立物流体系。若能改进承重结构设计并根据应用采用不同的混凝土组分，即便使用市场上现有的成熟水泥和混凝土建筑技术，也能显著降低熟料需求。因此，不论现在，还是未来，首先应加强实践中的运用。

5.2.3 驱动因素

如果二氧化碳价格进一步上涨，与其他水泥和混凝土成分相比，水泥熟料的价格也将水涨船高，低熟料粘合剂的竞争力将随之提高，进而推动熟料利用效率的提升。一般来说，水泥熟料相关的额外成本会沿着产业链转嫁给建筑业主，但也会与其他多种价格信号和影响因素相互作用。因此，我们无法明确评估二氧化碳价格上涨对建筑规划和建筑技术选择的影响。⁹⁵

随着人们对建筑业数字化和循环经济重要性的认识不断提高，这些驱动因素已经在发挥作用，并且将在中长期继续产生影响。

5.2.4 障碍

章节和图 19 阐述的详细路线图罗列了一系列阻碍熟料混凝土高效建筑的因素，其中大部分归于法规标准和组织实施上的欠缺：例如，没有更新的技术标准、规划中未考虑二氧化碳效率、因使用各种水泥和混凝土而导致的额外成本（目前通常没有相应的补偿）等。

有时，高于传统建筑方式的成本是阻碍减排措施实施的因素；有时，供应商会宣传新型工艺更具成本优势。本项目未对不同的建筑方式展开经济性分析，因此无法比较其竞争力。

由于资源有限，阻碍了熟料高效与资源高效的混凝土建筑的发展：中短期内，高炉矿渣和粉煤灰的可用量减少，导致现有熟料高效型水泥、波特兰复合水泥和复合水泥的市场份额可能变小。然而，由于高炉矿渣和粉煤灰产自二氧化碳密集型工艺，在能源产业和钢铁工业实现气候中和的转型中，这些二氧化碳密集型工艺不占主导。因此，我们不应聚焦如何解决高炉矿渣和粉煤灰不足的“障碍”，而应转向提高熟料利用效率的其他战略。目前，德国的煅烧粘土可用量十分有限，波特兰复合水泥的生产需要煅烧粘土，这样，短期内波特兰复合水泥难以市场推广。倘若缺乏合适的再生骨料，再生混凝土的应用推广也会遭遇阻碍。

5.2.5 行动领域

“新型水泥和混凝土建筑技术”的核心行动领域是建立市场和推广低碳的建筑方式，将新型的水泥、粘合剂、混凝土、建筑技术融入到建筑实践中（见第 6 章）。根据路线图，为开拓市场和推广低碳的建筑方式，必须在短期内提高建筑业主和结构设计师对灰色排放的认识，开拓或扩大高度专门化的市场（利基市场）。低碳的粘合剂、水泥和混凝土的成本飙升现象将在中短期内得到减缓。路线图认为，即使没有专项资助，因低碳工艺的进一步发展和二氧化碳价格的上涨，低碳建筑也能在中长期实现经济效益。公共部门的可持续采购是在短期内创建高度专门化的市场（利基市场）的重要手段。同时，我们应在中长期内制定标准，不断提高目标要求。

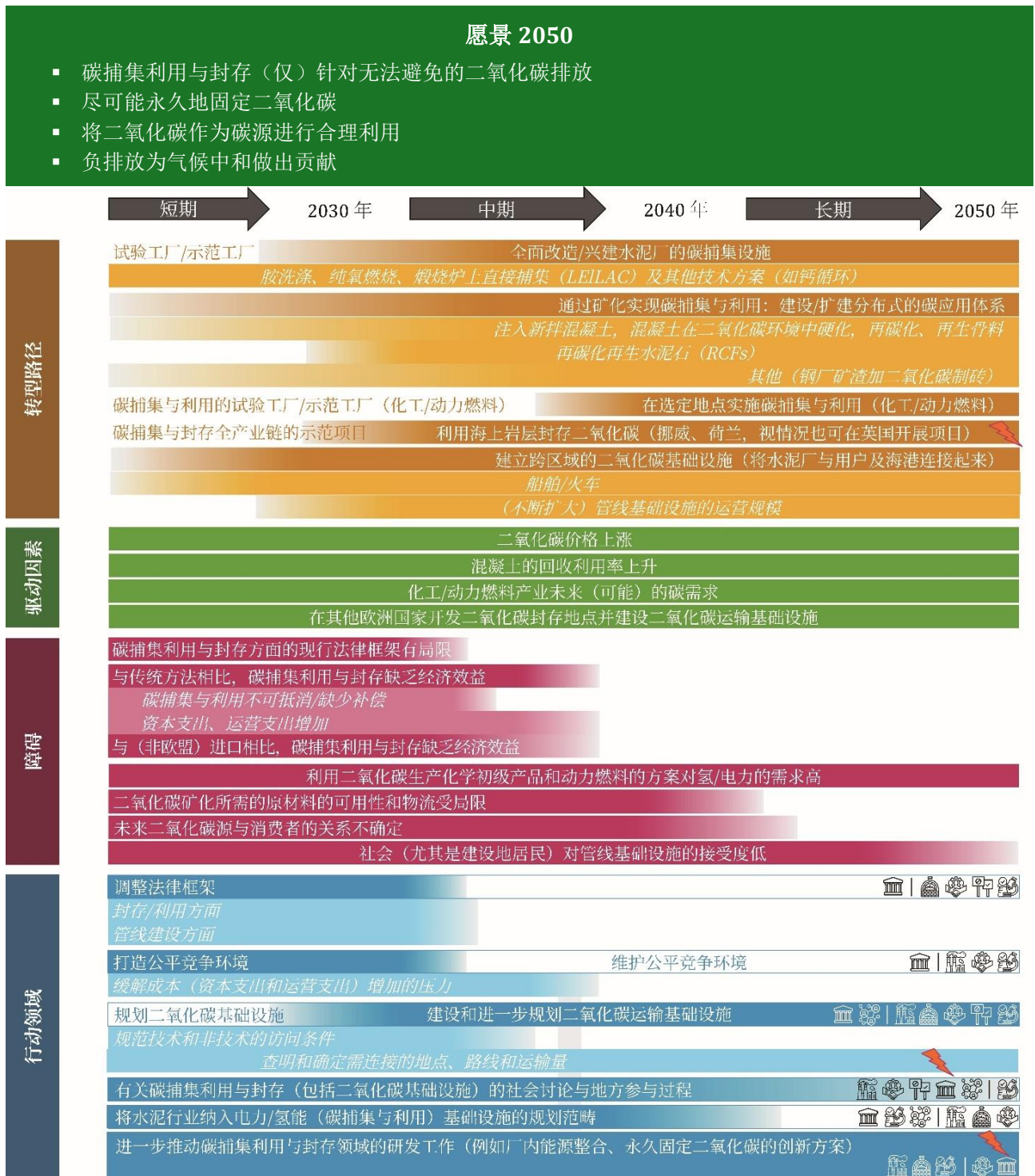
要将新型的水泥、粘合剂、混凝土和建筑技术融入建筑实践，就必须将不断发展的产品和施工技术相结合，不断调整规范和标准。路线图中还指出，在短期内用性能证明来表明新产品的符合性，说明其建筑工程学特性，并在中长期内推动新产品和建筑技术进入市场。根据路线图，建筑物碳足迹将成为衡量不同建筑方式的重要工具。因此，须立即落实建筑领域碳足迹的

⁹⁵ 本项目没有深入分析熟料成本上涨的影响。

核算工作。扩大信息提供和资格认证的范围，有助于在中短期内填补结构设计师、建筑师和建筑业主当前在熟知高效、节能建筑方面的知识缺口，并将长期确保这一领域的动态信息流动。

5.3 碳捕集利用与封存（CCUS）详细路线图

图 20: 碳捕集利用与封存的愿景和详细路线图



资料来源: 自行绘制, 伍珀塔尔研究所

说明: 关于措施实施的利益相关方群体的定义 (即路线图中行动领域右侧的图标), 请参见第 4 章开头的解释和表 6。

在行动领域“规划和发展碳基础设施”和“有关碳捕集利用与封存（包括碳基础设施）的社会讨论与地方参与过程”中，“其他行动主体”主要指燃气网运营商。在行动领域“水泥行业参与电力/氢能基础设施规划（用于碳捕集与利用）”中，除了燃气网运营商，“其他行动主体”还包括其他工业部门（钢铁，化工）、电网运营商和德国联邦网络管理局。

5.3.1 愿景

图 20 显示了碳捕集利用与封存的详细路线图。根据气候中和水泥行业愿景，碳捕集利用与封存（仅限）用于“不可避免”的碳排放，也就是说，其消除对象是在成功实施“热能”（图 18）和“新型水泥和混凝土建筑技术”（资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所）详细路线图后剩余的二氧化碳。捕获的“不可避免”的二氧化碳排放主要源于石灰石的煅烧。应尽力永久固定这类二氧化碳，以避免中长期的排放。但在个别情况下，即便只起到临时固碳作用，将水泥熟料生产过程中产生的二氧化碳用作碳源的做法对整个系统而言仍具有意义。因此，愿景也将这种可能性纳入考虑范畴。碳捕集利用与封存可实现二氧化碳的永久固定，将这项技术与生物燃料相结合后，可实现负排放。负排放用以抵消残余排放（如未完全捕获的二氧化碳），对实现气候中和具有重要作用。

5.3.2 转型路径

转型路径包括二氧化碳捕集、运输和去向等细分领域。试验和示范工厂正在测试或开发多种碳捕集的方法。不同的方法各有利弊，须根据项目情况进行权衡。因此，路线图未着重介绍特定的碳捕集方法。根据路线图，德国水泥厂将从 2030 年开始大规模安装碳捕集设备。⁹⁶

路线图也展示了通过矿化对部分捕获的二氧化碳加以利用的方案。该领域当前正在开发多种方法，或进行早期的市场推广（见章节 3.2.4.1 的信息框）。一些方法可在中短期内扩大规模。二氧化碳固定的（长期）潜力尚不清楚。必须建设分布式的物流结构，用以运输二氧化碳或工艺所需的其他原材料（如混凝土拆除物）。

鉴于这种技术路径的能源需求大，而且二氧化碳固定多为临时性的固定，所以根据路线图，化工和动力燃料产业在中长期只会在选定地点进行工业化规模的二氧化碳利用⁹⁷（参见章节 3.2.4.2）。目前已在化工和动力燃料产业规划建设碳捕集与利用试验和示范工厂。依照路线图的规划，可用较长时间进一步开发工艺和技术，建立从捕集到利用的整个链条。

其他欧洲国家的二氧化碳地质封存设施即将投入商业运营，这也为处理德国水泥厂产生的二氧化碳指明了中长期的方向。各种矿化工艺预计只能固定水泥生产过程中产生的部分二氧化碳，而化学初级产品和动力燃料进行碳捕集与利用的作用有限。因此，路线图设定，如果没有其他二氧化碳利用的方案，可对二氧化碳进行地质封存。该方案是否长期可行，或只是在找到更好的固碳方法前的“权宜之计”，各方行动主体对此的看法不一。

为了将水泥厂与海港（将二氧化碳运输到地质封存地点）或精炼厂或化工厂（碳捕集与利用）连接起来，需要建设跨区域的碳基础设施。在 2030 年前的初始阶段，从试验和示范工厂运出的二氧化碳数量相对较少，况且长期碳源和消费者的空间分布结构正在形成过程中，关系尚不明确，故而船舶和火车在此阶段将发挥核心作用。第一条二氧化碳输送管道计划从 2030 年左右开始运营，并将不断扩大管线网络。考虑到许多大型水泥厂无法用船舶运输所捕集的二氧化碳，在大规模捕集的情况下，二氧化碳输送管道可能比其他方案更具经济效益和物流上的可行性。我们必须两者兼顾，一方面扩大捕集规模，一方面建设碳基础设施，并在时间上密切协调。

⁹⁶ 在其他欧洲国家将会更早进行。例如，海德堡水泥公司计划从 2024 年起在挪威布雷维克水泥厂（Brevik）进行工业化规模的碳捕集。

www.heidelbergcement.com/de/pi-15-12-2020

⁹⁷ 本项目没有确定任何具体地点。

5.3.3 驱动因素

与传统的水泥熟料生产相比，二氧化碳捕集、运输和封存会产生额外成本，因此，二氧化碳价格上涨是碳捕集利用与封存的主要驱动因素。如果因购买排放配额而避免的成本高于碳捕集利用与封存的额外成本，并且当有足够的保护措施防止碳泄漏时，那么（足够高的）二氧化碳价格有助于实现碳捕集利用与封存的经济运行。

其他欧洲国家境内开发的二氧化碳封存点和建设的配套运输基础设施为处理德国水泥厂的碳排放带来了希望，促使水泥生产商考虑并计划建设碳捕集设备。此外，规划已将一些港口确定为德国境内碳基础设施的目标港口。

化工和动力燃料产业未来存在大量的碳需求，也有设想计划将德国国内产生的二氧化碳作为（部分）潜在碳源，这两点考虑推动了社会对碳捕集与利用工艺的进一步开发和测试。

逐步提高混凝土的回收利用率（最初出于资源利用效率的原因），深入开发混凝土拆除物中不同破碎料的分离工艺，两者借助回收骨料或水泥石的再碳化，为二氧化碳矿化工艺的发展奠定了基础。

5.3.4 障碍

当前适用的法律框架被视为碳捕集利用与封存项目发展的最大障碍。碳捕集与利用的补偿问题尚未解决（见下文），相关法律不允许碳捕集与封存，此外还有一系列其他法律壁垒制约了相关设施及二氧化碳运输设施的建造（参见第6章）。

与传统生产相比，碳捕集利用与封存技术当前的主要发展障碍是缺乏经济效益。一方面，碳捕集利用与封存相关的资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）增加。另一方面，欧盟碳排放权交易体系的监管框架（在撰写本报告时）不允许对所利用的二氧化碳进行抵扣，也就是说，目前不能通过碳捕集与利用来降低购买二氧化碳配额的成本。⁹⁸地质封存虽然可以减少欧盟碳排放权交易体系承认的排放量，但目前在德国和国外都无法合法落地。在与欧洲以外的国家竞争时，碳捕集利用与封存的经济效益也一样关系重大。倘若缺少适当的保护措施（如边际成本均衡），就须增加从非欧盟国家的进口，这将引发碳泄漏的风险。

受制于氢能和电力的供应，利用二氧化碳生产化学初级产品和动力燃料的方案面临着一定的阻碍。德国可再生能源的基本可用量有限（可能在当地提供），成本因素（运营支出，见上文）不利于发展。路线图假定，（德国）可再生能源电力和绿氢将长期供应不足，这种绿电绿氢的高需求将是长期（潜在的）障碍。

至于通过矿化进行碳捕集与利用的途径，我们仍需加强研发以确定工艺方法，使其 1）能使用广泛可用的原料；2）产生足够的二氧化碳吸收潜力，从经济和碳平衡的角度激励原料或二氧化碳的运输；3）生产出适销对路的产品。此外，还须为上述原料和待利用的二氧化碳配备适当的物流设施。

从熟料产地运走二氧化碳存在困难，这是目前碳捕集利用与封存方案的主要障碍之一。除法律问题（见上文）外，碳基础设施的规划和建设也面对重重的困难：目前仍不清楚未来的二氧化碳运输起止点和运输量。这尤其增加了管线规划的难度，因为在管线设计时便须设定二氧化碳输送量，一旦管线建成，管网容量将无法改变。

（预计）较低的社会接受度也将是阻碍二氧化碳管线基础设施建设的重要因素。根据之前其他基础设施建设项目的经验，在地方层面很可能会出现民众抵制活动或旷日持久的法律纠纷。

⁹⁸ 例外情况：根据欧洲法院的一项判决（“谢菲尔考克碳酸钙（Schaefer Kalk）判决”），允许使用二氧化碳生产沉淀碳酸钙。

5.3.5 行动领域

为了实现碳捕集利用与封存，并为市场推广奠定基础，必须调整法律框架条件和消除法律壁垒，包括封存和利用的相关法律以及二氧化碳输送管道建设涉及的法律问题（参见第 6 章）。

由于碳捕集利用与封存目前尚不具经济效益，我们必须打造并维护公平的竞争环境，促使水泥熟料的生产商能够采用碳捕集利用与封存技术实现经济效益，具备与传统生产方式和非欧盟国家进口产品竞争的實力。倘若在不采取额外措施的情况下，竞争机制（特别是二氧化碳价格水平）无法产生经济效益，则应出台政策缓解资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）的压力，由此创建公平的竞争环境。

根据路线图，应尽早同步开展二氧化碳运输基础设施建设和大规模的碳捕集应用，最迟在 2030 年从首批地点运出二氧化碳。为了实现这一目标，相关部门已迅速做了相应（初步）规划，并将在基础设施扩建过程中根据需要进行调整。我们还需在短期内讨论和规范碳基础设施的技术和非技术性接入条件。关于输送网络接入点，到底应该保证所有地点“无差别”接入，还是基于运输距离和地理条件，依照效率标准⁹⁹来进行甄选，项目参与方对此的意见不一。

为提高碳捕集利用与封存和相关的碳基础设施的社会接受度，近期将启动社会参与活动。尤其在直接受到此类设施影响的地区，应尽早吸纳当地民众参与，确保就相关各方的目标和决策权做好明确的沟通。

水泥行业和其他潜在二氧化碳用户将以适当方式参与相关基础设施的规划，保证所在地能为碳捕集与利用提供（服务于系统的）可用电力和氢能。

在投放和推广碳捕集利用与封存技术的同时，还需研发工厂内碳捕集设备的能源集成等技术。此外，需探索永久固定二氧化碳的替代方案，并适时将其推向市场。在 2050 年前，这些替代方案在永久固碳方面究竟能发挥怎样的作用，核心小组对此有不同的评估结论。

⁹⁹ 该问题中的效率是指允许/应该投入多少成本（如管线长度等）来运输多少二氧化碳量。

6 新型水泥和混凝土建筑技术、碳捕集利用与封存两大领域的政策工具与措施

水泥行业的脱碳发生在一个多级治理体系中，地方与地区、国家层面、欧洲层面，甚至全球范围内的行动主体和机构都参与其中。行动主体既包括部委和监管机构等公共行动主体，也包括私营行动主体（水泥生产加工企业、环保协会、市民社会）。水泥行业在实施脱碳措施时，国家行动主体的监管规定发挥着十分重要的作用。除此之外，我们还需要财政和宣传推广的措施，也少不了企业、政府和社会三方的磋商与谈判。

为了具体落实《欧洲绿色新政》（European Green Deal），“减碳 55”（Fit for 55）一揽子计划框架内的谈判形成了一系列重要的决议。欧盟碳排放权交易体系（EU ETS）和欧盟碳边境调节机制（CBAM）的（进一步）发展完善也对水泥等原料工业的转型产生巨大的影响。例如，捕集到的二氧化碳能否纳入欧盟碳排放权交易体系一直是个悬而未决的问题。

国家层面的一项重要工具是所谓的碳差价合约（CCfD），即企业与联邦政府就如何解决气候友好型生产方式的额外成本达成协议。该领域已经开展了各种项目和政治活动。德国联邦经济和气候保护部（BMWK）正在开发一个国家碳差价合约的试点项目。

这类欧盟和联邦层面的政策工具是水泥行业和其他原料工业脱碳政策机制的重要组成部分。由于水泥行业的多级治理体系十分复杂，并且此次项目重点聚焦国家层面。因此，DekarbInd 项目主要瞄准德国公共和私营行动主体可采取的中短期措施，包括国家监管（狭义的政策工具）以及其他类型的利益相关方活动，如公私合作和市民社会的参与。项目在确定优先事项时，注重探讨还未深入研究的领域，补充正在进行的有关欧盟“减碳 55”一揽子计划工具的讨论，以及气候保护协议的进程。

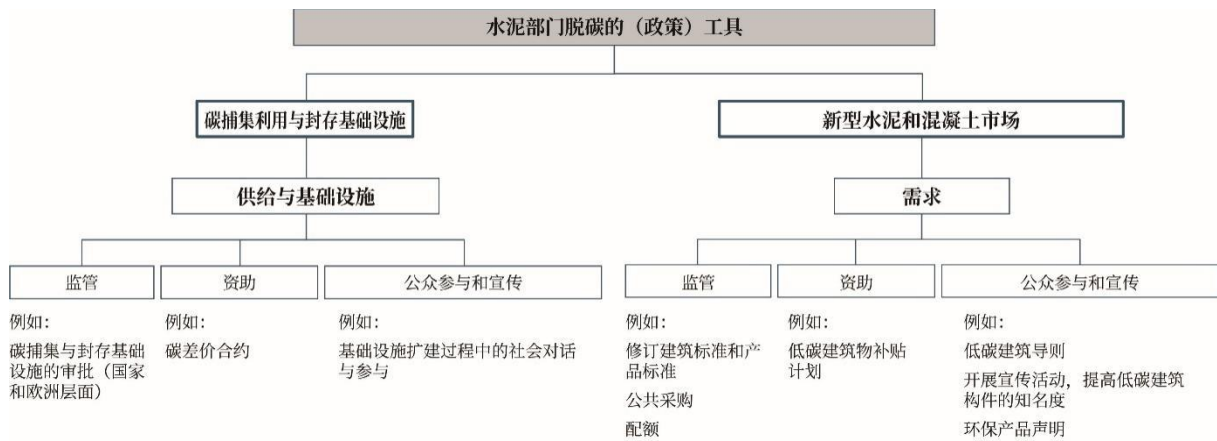
下文列示了适用于德国国内水泥行业行动主体在中短期的脱碳政策工具，这些政策工具是 DekarbInd 项目通过各类活动和以利益相关方为导向的研究得出的结论，包括项目团队的文献检索研究、初步考虑和分析、三次时长 90 分钟的半结构化专家访谈（参见章节 2.4），以及 2022 年 4 月 7 日举办的半天线上研讨会。会议邀请到了来自水泥生产加工领域、化工行业、行业协会、非政府组织、咨询公司、学术界、主管部门和政界的专家参与（见章节 2.4.4）。在综合了文献检索研究、访谈和讨论的结果后，项目撰写了一份纲要文件，下文概括介绍了其主要结论。文章概述了水泥和混凝土工业脱碳的主要政策工具和利益相关方活动，着重谈到了两个领域：

1. 新型水泥和混凝土建筑技术；
2. 碳捕集利用与封存基础设施。

并非所有论点都反映了全体研讨会参会者或受访专家的观点。

图 21 展现了其中一个政策工具的案例，按照领域分为监管、促进推广、公共参与和宣传。

图 21: 项目重点政策工具的基本分类



资料来源：自行绘制，伍珀塔尔研究所

6.1 新型水泥和混凝土建筑技术（NZB）方面的可用工具

在提高新型水泥和混凝土建筑技术的需求方面，重点行动领域有：将新型水泥与建筑技术融入建筑施工实践、构建市场、促进低碳的建筑方式（参见章节 3.4）。

应强制规定建筑项目中低碳水泥的最少用量比例（应写入联邦法律），将其作为监管工具。但采用上述工具存在一个问题：各地区低碳水泥的可用量存在或将出现很大差异。德国国内市场无法确保所有产品或原料（如煅烧粘土）的全域供给。因此，在对这一监管工具做整体评估时，需考虑空间分布的情况与运输需求。

可持续的公共采购有助于建立新型水泥和混凝土建筑技术的销售市场，也就是说，国家和国有企业应自愿承诺在建筑项目中使用气候友好型材料。在要求私营建筑开发商接受低碳水泥或采用创新型混凝土建筑技术之前，公共部门作为重要的建筑开发商，须带头在上述领域发挥先锋模范作用。此外还须研究新型水泥和混凝土建筑技术的不同用途（地上建筑/地下工程和不同的暴露等级）。

伴随着新型水泥和混凝土建筑技术进入市场，我们必须能够显示与计算建筑物的碳足迹。建筑工程的委托方、规划师及建筑实践的其他行动主体须关注此类数据。这方面的碳足迹计算已具备技术上的可操作性。有多位利益相关方主张，应当分析建筑物整个生命周期内的二氧化碳排放量，包括建筑材料的能耗、至回收利用阶段的隔热保温效果和热储存情况。在计算排放时，较适用的核算单位是每年每平方米可用面积的二氧化碳排放千克数（kg CO₂/(m² a)）。《建筑能源法》及其能源证书规定了使用阶段必须遵守的能源限值（从而也间接规定了二氧化碳的限值）。

建筑物二氧化碳足迹（灰色能源）的信息控制手段包括：引入建筑物护照，或将特定的二氧化碳数据纳入现有的建筑物能源证书（针对新建建筑）。下一步应采取的措施包括：施行建筑分类（参见能效标签），视情况出台德国复兴信贷银行（KfW）优惠贷款项目，明确监管要求（例如，立法者可以强制性规定每年每平方米使用面积允许排放的二氧化碳最大量）。政府（德国联邦经济和气候保护部；德国联邦住宅、城市发展和建设部¹⁰⁰）负责引入强制性碳足迹报告机制。要用好这一工具，首先必须考察各类建筑材料，搭建牢靠的建筑物排放数据库。这方面的工作可交由德国可持续建筑协会（DGNB e.V.）负责。

¹⁰⁰ BMWK：德国联邦经济和气候保护部；BMWSB：德国联邦住宅、城市发展和建设部

德国混凝土可持续发展委员会（CSC）出台的二氧化碳等级划分¹⁰¹已成为国际混凝土二氧化碳效率认证体系的一部分。所划分的等级表明，与性能相同的（地区）参考混凝土相比，经委员会认证的混凝土产品在二氧化碳效率上提升了多少比例。

除了制定新的水泥标准 DIN EN 197-5 之外，还需修订现有的建筑标准和产品标准，这样才能将新型水泥和建筑技术切实融入到建筑实践中去。技术规范是推广新型水泥和混凝土建筑技术的核心工具，须进一步落实和加以推进，从而建立熟料高效的建筑体系。修订标准体系势在必行，有助于帮助我们了解建筑材料的环境影响，简化它们在建筑中的实际应用。新版混凝土标准 DIN 1045-2:2021 的草案已做公示，正在听取各方意见（版本时间：2022 年 4 月）。新版的混凝土标准主要规定了波特兰复合水泥（CEM II/C-M）的应用规则。含煅烧粘土的波特兰复合水泥尚未被纳入当前建筑技术行政法规的适用范围，但即将被写入 CEM II/C 混凝土标准。此外，德国钢筋混凝土委员会（DAfStb）也在制定各类准则，旨在推广材料节约型和低碳型建筑（例如关于超高强度混凝土和预制空心板的准则，要求结合抗暴露等级系统和性能测试做耐久性测试）。

鉴于人们在新型水泥和混凝土建筑技术方面缺乏经验和知识，当前的市场需求依旧低迷。为此有必要策划宣传活动，制定培训进修计划，尽力在建筑实践中推广这类低碳技术，并将规划师和建筑师为代表的建筑实践者作为重点宣传对象¹⁰²。现有的信息宣传渠道和培训平台是“混凝土信息中心”（Informationszentrum Beton）¹⁰³。德国钢筋混凝土委员会提供了规划辅助工具“可持续混凝土建筑”¹⁰⁴。此外，低碳水泥与混凝土建筑技术、低碳建筑主题应进入高校课堂，成为专业教学的组成部分。

6.2 针对碳捕集利用与封存（CCUS）基础设施的工具

在建设跨地区碳基础设施方面，关键行动领域包括设立适合的法律框架条件和相应的规划开发流程。目前，德国还未完全确立二氧化碳运输、储存和利用的法律及规划框架，而它们是招引大量投资的先决条件。除经济、技术和监管问题外，这里还涉及社会讨论和公众参与。为此，须为非专业人士提供全面的信息，帮助他们有理有据地做决策。这样做也有助于提高社会对基础设施的接受度。

德国二氧化碳捕集设施的建设属于《联邦污染防治法》（BImSchG）的监管范围。这个领域依然存在监管空白。迄今为止，污染防治法规定的审批程序仅适用于二氧化碳捕集与封存（CCS）设施，不适用碳捕集与利用（CCU）设施，尽管这两种设施并无技术上的差异。我们有必要相应调整法律框架。对于短期内将实施的碳捕集利用与封存项目（例如“西海岸 100”（Westküste 100）¹⁰⁵），可考虑设置暂时的豁免条款，作为《联邦污染防治法》修订前的过渡。

对于二氧化碳封存与运输而言，最重要的法律依据是 2012 年决议通过的《德国二氧化碳封存法》（KSpG）。该法案负责规制“在地下岩层中永久封存二氧化碳的技术研究、测试和示范”（《德国二氧化碳封存法》第一条）。由于相关技术在法案颁布时还未发展成熟，因此法案未将二氧化碳的利用纳入规制范围。为此，有必要扩展现有法律框架，在《德国二氧化碳封存法》的修订案中加入二氧化碳的利用。德国联邦政府和联邦经济与气候保护部正在讨论相

¹⁰¹ 混凝土可持续发展委员会的认证体系将二氧化碳优化后的混凝土分为四个等级，等级划分依据的是与地区参考值相较之下的温室气体减排量（单位：每立方米混凝土相应的二氧化碳当量千克数），减排比例分别为 30%、40%、50% 或 60%（www.csc-zertifizierung.de）。

混凝土可持续发展委员会：www.concretesustainabilitycouncil.com

¹⁰² 规划师与建筑师在二氧化碳决算方面所做的工作至今不属于有偿工作，为此，有必要修订《建筑师与工程师服务费率法定标准》。

¹⁰³ 见下文：www.beton.org

¹⁰⁴ www.dafstb.de/application/2021-10-29_DAfStb-Planungshilfe_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf

¹⁰⁵ www.westkueste100.de

关的调整。在对《德国二氧化碳封存法》做全面修订之前，可首先考虑对法律进行微调（“微创”），以提高项目开发和审批的速度。

我们须为二氧化碳的国内运输起草相应的法律（可仿照《高压气体管路条例》）。原则上，二氧化碳的运输可以借助各类交通工具，包括卡车、火车和轮船。但从经济角度来看，大规模二氧化碳的运输还是应该通过管网来实现，这好比氢能的运输可以借助（现有的）天然气管道一样。然而，与氢能运输不同的是，液态二氧化碳或超临界二氧化碳的运输必须使用新建的管道。

未来，德国可能需要跨境运输二氧化碳，将二氧化碳离岸封存在海床基层之下。为此，德国必须批准《伦敦议定书》（旨在保护海洋环境的全球公约）第六条的补充规定。下一步，德国应与二氧化碳运输的目的地国家（尤其是挪威等北海沿岸国家）签订双边协议。责任归属也是核心问题之一（谁负责二氧化碳的封存，谁来确保封存的二氧化碳不会再次被释放出来？）上述责任的归属问题须借助政治谈判来界定。欧盟层面可考虑建立超国家的监管机制，用其替代双边协议。除了国家间签订的双边协议之外，国家层面也应与二氧化碳“供应”企业展开谈判。此外，还须明确哪些国家允许或应该出口二氧化碳。欧盟以外的第三方国家原则上也可以作为二氧化碳的出口目的地。《伦敦议定书》负责监管二氧化碳的运输（后期用以离岸封存）。与此同时，他国境内也允许陆上封存二氧化碳，这类方案同样也是可行的。为此，我们必须考察《伦敦议定书》的现行法律框架能否支撑这类方案，是否需要建立新的/补充性的法律框架。

完善法律框架是一个方面，碳基础设施的规划开发过程也须解决一系列的相关问题，主要涉及规划责任的归属、技术和非技术性的准入条件¹⁰⁶、第三方接入、管网路线和接入地点、运输量等。鉴于二氧化碳不是能源，也没有终端消费市场，因此碳基础设施的规划尚未被纳入德国联邦网络管理局（BNetzA）等机构的监管范围。非国家行动主体也能在二氧化碳管道网络的规划和发展中发挥主导作用。

在碳基础设施的规划开发方面，有两种互补的战略方法。一是自下而上的解决方案，这类方案将地区集群视为大规模碳基础设施的“胚细胞”。该领域涌现了一批倡议项目，例如“西海岸 100”项目和德国天然气运输公司 OGE 规划的二氧化碳网络¹⁰⁷。我们应当充分利用企业的专业知识，比如在源汇关系披露和技术准入问题的解决方案上，可以听取企业的意见。另一方面，国家（联邦或州）自上而下出台的方案旨在鼓励企业组建集群，并为此提供必要的支持（如资助计划），并制定战略方针（如德国联邦政府正在制定的碳管理战略）¹⁰⁸。碳基础设施的规划开发需要燃气网运营商、各联邦州（执行/审批）、联邦政府（监管）与碳源所有者的相互配合与精诚合作。

要迅速搭建碳基础设施，就须加快规划与审批流程。除了程序问题外，监管机构应配备有合格的且经授权可做出决定的专家，考虑是否存在较严重的目标冲突（例如基础设施扩建与环境保护之间的目标冲突）。

在大规模兴建碳基础设施的过程中，如何解决社会对碳基础设施接受度低的问题，也是一项不小的挑战（尤其是在地方一级）。此前，各种能源基建项目也曾遭遇类似的困扰，其中就包括碳捕集与封存设施。组织社会讨论和公众参与是必不可少的环节，旨在让公众理解各项措施的实施目的，解决他们所关切的问题。在处置得当的理想情况下，我们可以借此提高碳基础设施在次国家层面的社会接受度。《德国二氧化碳封存法》第四条规定了组织地方公众参与的义务。在公众活动以及与公众的对话中，应明确传达目标和总体要求（例如气候中和、运输二氧化碳的必要性），确保有关各方的决策权得以保障。鉴于当前实现气候目标的时间紧迫，有关碳基础设施的规划和公众参与应并驾齐驱，同步进行。

¹⁰⁶ 技术性的准入条件对馈入管道的二氧化碳纯度和允许的杂质比例等方面做出了规定。比方说，非技术性的准入条件规定了哪类设施可获准将二氧化碳馈入管道。

¹⁰⁷ www.co2-netz.de

¹⁰⁸ 参见北威州的碳管理战略：www.wirtschaft.nrw/carbon-management-strategie-nrw

7 参考文献目录

- Agora Energiewende (Hrsg.).(2019).*Klimaneutrale Industrie (Hauptstudie) Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*.
- CarbonCure.(2020).*CarbonCure's 500 Megatonne CO2 Reduction Technical Roadmap*.
<https://www.carboncure.com/>
- Cembureau.(2020).*Cementing the European Green Deal – Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050*.The European Cement Association.
- CSI / ECRA.(2017).*Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing:Trying to Look Ahead*.(A-2016/2305; Technology Papers).Cement Sustainability Initiative, European Cement Research Academy. www.ecra-online.org
- Favier, A., de Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G.(2018).*A sustainable future for the european cement and concrete industry—Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*.ETH Zürich; EPFL.
- GCCA.(2021).*Concrete Future—The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*.Global Cement and Concrete Association.
- Hills, T., Leeson, D., Florin, N., & Fennell, P.(2016).Carbon capture in the cement industry:Technologies, progress, and retrofitting.*Environmental science & technology*, 50(1), 368–377.
- IEA.(2021).*Energy Technology Perspectives 2020*.International Energy Agency.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- IEA/CSI.(2018).*Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry*.International Energy Agency (IEA), Cement Sustainability Initiative (CSI).
- ieaghg.(2013).*Deployment of CCS in the cement industry* (Nr. 2013/19).
- Jäckel, H.-G., Hamann, D., Krampitz, T., & Lieberwirth, H.(2022).CF-bewehrter Beton—Idealer Baustoff und eine Recycling-Herausforderung. *recovery - Recycling Technology Worldwide*, 02/2022. www.recovery-worldwide.com/de/artikel/idealer-baustoff-und-eine-recycling-herausforderung_3743970.html
- Lechtenböhmer, S., Nanning, S., Hillebrand, B., & Buttermann, H.-G.(2006).*Einsatz von Sekundärbrennstoffen* (Texte 07/06).Umweltbundesamt.
- Material Economics.(2019).*Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*.
- Mineral Products Association, Cinar Ltd, & VDZ.(2019).*Options for switching UK cement production sites to near zero CO2 emission fuel:Technical and financial feasibility – Summary Report* [Feasibility Study for the Department for Business Energy and Industrial Strategy].
- Möhrle, M. G., & Isenmann, R.(2008).*Technologie-Roadmapping—Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (3.Aufl.).Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74755-0>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.(2019).*Gaseous Carbon Waste Streams Utilization:Status and Research Needs*.The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25232>
- Nolting, U., Dehn, F., Haist, M., & Link, J.(2018).*Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen* [14.Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung].Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal Institut.(2021).*Klimaneutrales Deutschland 2045*.Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- Project LEILAC.(2021).*LEILAC Technology Roadmap to 2050 – A cost-effective path to carbon neutral industrial production*.Web: www.project-leilac.eu

- Ruppert, J., Wagener, C., Palm, S., Scheuer, W., & Hoenig, V.(2020).*Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie:Abschlussbericht* (Bericht im Auftrag des im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0) 48 / 2020; UBA Texte).VDZ.
- Schneider, M.(2019).The cement industry on the way to a low-carbon future.*Cement and Concrete Research*, 124.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M.(2018).Eco-efficient cements:Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.*Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., & Oelkers, E. H.(2020).Carbon dioxide storage through mineral carbonation.*Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 90–102.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármannsson, H., Einarsson, G. M., & Gislason, S. R.(2014).CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges.*Energy Procedia*, 63, 4585–4600.
- UBA.(2009).*CCS - Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik* (S. 22).
www.umweltbundesamt.de/publikationen/ccs-rahmenbedingungen-des-umweltschutzes-fuer-eine
- UBA.(2022).*Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*.Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- VDZ.(2020a).*Dekarbonisierung von Zement und Beton—Minderungspfade und Handlungsstrategien.Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie*.Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- VDZ.(2020b).*Umweltdaten der deutschen Zementindustrie – 2019*.Verein Deutscher Zementwerke.
- VDZ.(2022).*Umweltdaten der deutschen Zementindustrie – 2021*.Verein Deutscher Zementwerke.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V.(Hrsg.).(2002).*Zement Taschenbuch 2002* (50.Ausgabe).Bau+Technik.
- Voldsund, M., Gardarsdottir, S. O., De Lena, E., Pérez-Calvo, J.-F., Jamali, A., Berstad, D., Fu, C., Romano, M., Roussanaly, S., Anantharaman, R., Hoppe, H., Sutter, D., Mazzotti, M., Gazzani, M., Cinti, G., & Jordal, K.(2019).Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production—Part 1:Technical Evaluation.*Energies*, 12(3), 559. <https://doi.org/10.3390/en12030559>
- Zeschmar-Lahl, B., Schönberger, H., & Waltisber, J.(2020).*Abfallmitverbrennung in Zementwerken – Sachverständigengutachten* (TEXTE 202/2020).Umweltbundesamt.