

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ГОРОДСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ЗДАНИЙ: ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ

Alexander Koutamanis¹, Boukje van Reijn², Ellen van Bueren³

URBAN MINING⁴ AND BUILDINGS: A REVIEW POSSIBILITIES AND LIMITATIONS

Elsevier

Resources, Conservation and Recycling (2018)
Journal homepage: www.elsevier.com/locate/resconrec

В последние годы проявляется растущий интерес к утилизации отходов городского происхождения, преимущественно зданий с экологической и экономической точки зрения. Материалы, скрытые в зданиях, являются привлекательной альтернативой деятельности по добыче сырья и строительной деятельности, которая несет ответственность за большую долю городских отходов во многих странах. В статье приведен анализ возможностей для утилизации отходов городского происхождения в Амстердаме, которая вначале концентрируется на металлах в жилых зданиях. Как литература со всего мира, так и местный анализ дают основания полагать, что результаты деятельности по утилизации ресурсов из зданий уже настолько высоки, насколько это возможно. Однако оценка содержания материалов и уровней переработки отходов не настолько заслуживает доверия, достоверности и достаточной точности, чтобы обосновать такие утверждения или идентифицировать возможности дальнейшего улучшения, включая местоположение ресурсов в зданиях и связи со строительной деятельностью, в особенности реновацией.

1. Введение

В статье представлены данные исследования об осуществимости утилизации отходов городского происхождения (UM), и вначале основное внимание уделяется металлам в жилых зданиях в городе Амстердам. В статье рассматривается доступность ценных ресурсов в антропогенной среде, а также возможности их утилизации, включая нынешние результаты деятельности в переработке отходов строительства и сноса (C&DW). Концентрация внимания на металлах была мотивирована нынешними высокими ценами и спросом, что делает металлы привлекательными целями для всех сторон, участвующих деятельности сектора переработки C&DW. Поэтому UM

¹ Делфтский технический университет, факультет архитектуры и антропогенной среды, Делфт, Нидерланды.

² Нидерландский институт стандартизации.

³ Делфтский технический университет, факультет архитектуры и антропогенной среды, Делфт, Нидерланды.

⁴ Процесс утилизации соединений и элементов из продукции, зданий и отходов в городских условиях.

можно рассматривать как подходящую отправную точку для исследования потенциала, а также использования УМ, вообще.

Жилые здания могут иметь меньшие размеры, распределенное владение, меньший объем на единицу, более длительный срок эксплуатации, чем промышленные и офисные здания и большее разнообразие материалов [52], но с точки зрения общего строительного фонда на жилой сектор приходится самая значительная доля: в феврале 2018 г. в Нидерландах было 7746202 объектов жилой недвижимости по сравнению с 1128965 объектами нежилой собственности [9]. Кроме того, способ организации жилищного строительства и высокая повторяемость и стандартизация, которые характеризуют ее, особенно важны для УМ, так как они обеспечивают структурные, постоянные возможности.

Данные рассматриваются с точки зрения АЕСО (архитектуры, инженерного обеспечения, строительства и эксплуатации зданий): направления, которые используются в создании и управлении антропогенной средой, которые, поэтому, могут активно содействовать УМ. В условиях недавнего социального акцента на циркулярность УМ связана с процессами АЕСО и информацией, полученной и управляемой АЕСО, в частности на стадии эксплуатации (вплоть до сноса), т.е. по отношению к существующему строительному фонду.

Исследования состоят из трех основных частей:

1. Обзор исследовательской литературы по глобальному состоянию дел в отношении оценки содержания металлов в жилых зданиях, возможностей для их утилизации и оценке нынешних результатов деятельности в переработке С&DW. Особое внимание уделяется статьям, в которых включены реальные случаи как источники количественной информации, чтобы установить достоверную картину того, что доступно и как в настоящее время происходит переработка.

2. Анализ местной практики, опыта и результатов деятельности, основанных на официальных статистических данных и полуструктурированных интервью⁵ с голландскими экспертами в сносе зданий и обращении с отходами. Сравнение местных условий с литературным обзором предназначено для идентификации местных факторов, которые могут стимулировать или ограничивать УМ.

3. Оценка полезности и применимости результатов литературного обзора с конкретным контекстом Амстердама и Нидерландов:

- a) Оценка ресурсов, имеющихся в существующем строительном фонде;
- b) Идентификация возможностей для утилизации этих ресурсов;
- c) Что уже происходит в переработке С&DW; возможности для улучшения или дополнительная деятельность в УМ.

1.1. Утилизация отходов городского происхождения

В последние годы проявляется растущий интерес к утилизации отходов городского происхождения, преимущественно зданий с экологической и экономической точки зрения. Так как концентрация элементов в антропогенных запасах сопоставима или даже выше, чем в природных запасах [18],

⁵ Интервью, предполагающее использование не только закрытых вопросов, но и некоторое количество открытых вопросов. В таком интервью жестко стандартизируют только самые важные, с точки зрения целей и задач исследования, вопросы и веер вариантов ответов к ним.

утилизация ресурсов из антропосферы⁶ является привлекательной альтернативой для истощающихся природных ресурсов, когда приходится нести большие затраты на добычу и транспортирование из первичных источников или появляется зависимость от тех (стран или компаний), которые контролируют первичные источники сырьевых ресурсов. Перспектива представляется привлекательной, имеющей шансы на широкое использование, и это относится не только к бытовым отходам и изделиям с истекшим сроком эксплуатации, таким как транспортные средства и отходы электротехнических и электронных изделий (WEEE), но также и к антропогенной среде, поскольку строительство является как основным потребителем материалов, так и основным производителем отходов ([1], [37]).

Хотя УМ вначале концентрировалось на WEEE, она все чаще рассматривается как в целом, так и довольно неселективно применяемая ко всем видам отходов, образующихся в различных аспектах городского быта, несмотря на заметные различия между этими аспектами и появляющимися в итоге видами отходов и их переработки. Такие различия могут быть решающими для УМ, например, в отношении срока службы изделий и их насыщенности для человеческой деятельности при их использовании. Кроме того, УМ часто концентрируется на том, что случается после добычи из антропосферы. Учитываются также доступность и уровни сбора, но также в меньшей степени практические и технические вопросы в области предварительной переработки и физического разделения из окружающей среды [57]. Короче говоря, УМ как представляется меньше отклоняется от ресурсоэффективности [69] и больше от переработки типичных видов городских отходов, часто как стратегический компонент циркулярности или устойчивости ([4], [11]).

1.2. Здания как источники сырья

Здания непросто вписываются в рамки утилизации отходов городского происхождения. Это отражает различия между двумя основными видами ресурсов УМ, запасами и потоками ресурсов [18], кажущейся ориентации УМ на последние и конкретные характеристики строительного фонда. Срок службы компонентов зданий не только значительно дольше срока службы, например, электронного оборудования, но также и значительно варьируется в зависимости от материала, компонента системы (например, отопления, водопроводной системы, электрической системы или несущей способности, интенсивности использования и действия атмосферных условий). Некоторые анализы дают основания полагать, что всего лишь 3% материалов может поддаваться извлечению из зданий и к тому же только после продолжительного срока службы – в зданиях фактически продлевается срок службы многих материалов ([12], [36]). Это относится к ряду факторов, в особенности к зданиям, включая:

- Здания являются крайне необходимой и доминирующей частью нашей среды обитания. Мы нуждаемся в защите и комфорте, который они предлагают, и не хотим, чтобы они уменьшались: стоимость стального скрапа становится слишком высокой, чтобы заставить задуматься отказаться от труб централизованного отопления и радиаторов в своих домах или офисах без альтернативного отопления.

⁶ Антропосфера – та часть окружающей среды, которая создается или модифицируется людьми для использования в человеческой деятельности и среде обитания человека.

- Важность зданий выходит за пределы практических потребностей и расширяется до культурных аспектов общества, что подтверждается большим количеством перечисленных зданий во многих странах.

- Для зданий характерна тенденция становиться устаревшими, а не старыми, в том смысле, что они со временем приобретают небольшую ценность. Напротив, преимущество факторов типа расположения и общего сходства эксплуатационных качеств между новыми и старыми зданиями приводит к тому, что стоимость старых зданий часто растет вместе с ценой новых зданий ([13], [19], [56]). Это также стимулирует сохранение и обслуживание зданий за пределами их предполагаемого функционального или технического срока службы.

- Так как здания обслуживаются в течение длительных периодов времени, они часто переоборудуются: их исходная конструкция и состав могут существенно изменяться и включать новые материалы или системные компоненты, следуя изменениям в архитектурном подходе, технологии или требованиям потребителей, типа наличия централизованного отопления в средневековых зданиях ([27], [43], [55]). Часто бывает трудно знать, какие ресурсы можно найти в зданиях без обширных исследований – в отличие от бытовой техники, которая может мало измениться даже после многих ремонтов.

- Владение, оперативное и экономическое управление широко распространено и в значительной степени не скоординировано, в отличие от других фондов в урбанизированной среде, таких как дороги и системы инженерного обеспечения (инфраструктуры).

В заключение следует отметить, что в зданиях могут оказаться не первый взгляд сложные отходы, и это типично для утилизации отходов городского происхождения, но это просто картина, которая характерна для старомодных, неселективных методов сноса. Это картина, согласно которой урбанизированная среда превращается в развалины до того, как она станет предметом утилизации отходов городского происхождения и ограничивает УМ до того, как происходит после сбора, например, WEEE ([4], [15]). Эта картина не признает функцию местожительства в зданиях и не учитывает метод конструирования здания, с помощью которого материалы группируются в компоненты и элементы здания. Эта конструкция определяет простоту извлечения и доступность сбора, поскольку это строительные компоненты, которые обычно превращаются после использования в устаревшие продукты, как правило, в связи с изменениями в основных функциях, например, при переходе на другую систему отопления.

Эта структура определяет простоту извлечения и доступность коллекции, поскольку она создает компоненты, которые обычно превращаются из используемых в продукты с истекшим сроком эксплуатации, как правило, в связи с изменениями в основных функциях, например, переход на другую систему отопления.

1.3. Города как источники добычи сырья

Извлечение ресурсов из антропосферы в густонаселенном городе – сложная задача, тем не менее оправданная совместной настоятельной необходимостью сокращения количества не переработанных отходов и извлечения ценности из существующих запасов и потоков. Более того, города кажутся подходящим местом для этого: чем больше размер сообщества, тем выше активность в строительстве и сносе зданий [30]. Темпы образования отходов (WGR) для C & DW также выше в странах с более высокой плотно-

стью населения [6]. Основными причинами являются более высокая экономическая активность, мобильность населения, более высокий уровень жизни и более строгие экологические нормы - все это характерно для старых, но все еще динамичных городских центров, таких как Амстердам. Это не ускользнуло от внимания органов местного самоуправления: как и другие голландские города, Амстердам принял концепцию циркулярной экономики, разработал официальные документы, в которых изложены цели, связанные с национальной политикой, и создал платформы, на которых государственные и частные пионеры, а также научные учреждения встречаются для продвижения циркулярности [25].

2. Литературный обзор

2.1. Отходы строительства и сноса

Область строительства и сноса (C & D) широко признана как один из наиболее важных источников отходов. Количество C & DW в Нидерландах в 2010 г. (трудный год для строительной отрасли) составило 24 млн. т, в то время как в промышленности образовалось 15 млн. т, а в секторе потребления - 9 млн. т [51]. C & DW, как правило, делятся по источнику образования: новое строительство, реновация⁷ и снос. Снос дает вклад до 70% C & DW в некоторых случаях [68]. В других случаях на его долю приходится 55%, при этом на реновацию приходится 29%, а на новое строительство - 16%, тогда как на снос приходится - 8% от общей строительной деятельности, на реновацию - 40% и новое строительство - 52% [5]. Образование отходов на общую площадь здания (WGA) при сносе, как сообщается, в 20 [5] или даже в 50 раз больше, чем при новом строительстве [68]. Наконец, реновация в значениях WGA оценивается в 5 раз больше, чем новое строительство (Bergsdal [5]). Эти цифры иллюстрируют количественный потенциал C & DW и предполагают, что снос доминирует в их образовании, хотя реновация также заслуживает внимания.

2.2. Металлы из зданий

Учитывая высокие цены на металлы в недавнем прошлом, интерес к переработке металлов из отходов вряд ли удивителен. Уже 30% меди, потребляемой в Европе, и 50% железа в США поступает из вторичных источников [33], в то время как в Австралии подвергается рециклингу⁸ 65% стали, включая расширение масштабов рециклинга литейного чугуна [47]. Цели на будущее останутся высокими: к 2030 г. уровень замещения меди, железа, алю-

⁷ Реновация – процесс улучшения, реконструкция, реставрация без разрушения целостности структуры. В гражданском строительстве это инновационный процесс в сфере основного капитала, при котором изменяется функциональное состояние объектов.

⁸ В соответствии с Директивой 2008/98/ЕС Европейского парламента и Совета от 19 ноября 2008 г, согласно Ст. 3(17), “рециклинг” означает любую операцию восстановления, с помощью которой материалы отходов перерабатываются в продукты, материалы или вещества, используемые для первоначальной или других целей. Он включает в себя переработку органических материалов, но не включает утилизацию энергии и переработку в материалы, которые будут использоваться в качестве топлива или для операций засыпки.

миния и свинца (замена первичных металлических источников вторичными) с помощью УМ в Китае может составить до 50% ([63]; [64]). Рециклинг металлов также важен в самой отрасли по обращению с отходами, поскольку он значительно снижает нетто углеродный след [35].

Учитывая всемирную популярность железобетона в качестве строительного материала и растущее количество проводов и трубопроводов в зданиях, еще менее удивительно, что здания содержат 50% или, возможно, больше всех используемых металлов [59]. Это делает C & DW важным по сравнению с другими источниками. Для извлечения меди это один из наиболее перспективных источников, вместе с WEEE (явный лидер) и транспортными средствами с истекшим сроком эксплуатации; особенно с точки зрения массового расхода, он конкурирует с промышленными и муниципальными твердыми отходами [6]. Согласно большинству источников, металлы составляют 3% всей массы C & DW [6], хотя некоторые оценки достигают 13,5% [20] - что может объясняться не только региональными различиями и разнообразием типов строительства, но и оценкой образования отходов (более подробно обсуждается ниже). Различие между типами C & D также важно: при реновации может образовываться в 8 раз больше металлических отходов, чем при новом строительстве, а при сносе - в 80 раз больше, так как извлекаются металлы, находящиеся в здании [5]. Неудивительно, что эти цифры подтверждают потенциал C & DW и значимость сноса и реновации также и для утилизации металлов.

2.3. Показатели рециклинга

Сочетание высоких цен на металлы, теоретической 100% возможность проведения рециклинга металлов, их потенциально бесконечного жизненного цикла и высокой эффективности отделения от других отходов в сочетании с такими мерами, как высокие муниципальные тарифы или запрет на депонирование отходов, пригодных для вторичной переработки, повышает ожидания: 100% рециклинг отходов металлы - ключевая цель в мировой индустрии C & DW [35]. Ожидается, что из металлов, содержащихся в бетоне, 90% будет извлечено и подвергнуто рециклингу [63].

Такие ожидания не расходятся с показателями рециклинга отходов C & D: ежегодно 94% C & DW в Нидерландах успешно подвергается рециклингу [51], хотя со сниженным качеством, например, в качестве материалов для дорожного строительства [46]. Для сравнения, целевой показатель, установленный Европейской комиссией на 2020 г., составляет 70% рециклинга C & DW [21]. Рециклинг металлов является основным фактором этого успеха: он демонстрирует настолько хорошие результаты, что оценки обращения с C & DW показывают, что дальнейшее улучшение не повлияет на общие показатели ([10]; [20]).

2.4. Подходы к оценке

Впечатляющие цифры, найденные в литературе по УМ и C & DW, требуют более тщательного изучения того, как они рассчитываются. Существует два основных подхода к оценке количества и состава используемых металлов [22]:

1 *Административно-командный подход*: оценки по балансу между количеством металлов, поступающих в использование, и количеством металлов, выходящих из использования в продуктах с истекшим сроком службы или других отходах. Этот подход требует надежных данных в течение нескольких десятилетий. Административно-командные подходы популярны для потоков ресурсов [11].

Оценки содержания металлов в жилых зданиях

Место	Металл	Компонент системы	Оценка	Единица	Примечания	Источник
Нью-Хейвен, США	Медь	Кондиционирование воздуха и охлаждение	3,1	кг/см ²	США: в среднем 16	[22]
Австралия	Медь	Все	110/195	квартира	В жилом комплексе/одноквартирном доме)	[59]
Швейцария	Медь	Кроме крыши и электропроводки	24	кг/см ²		[65]
Нью-Хейвен, США	Медь	Водопроводная система	28	кг/см ²	США: в среднем 32	[22]
Кейптаун	Медь	Водопроводная система	1,3-2,7	кг/см ²		[65]
Швейцария	Медь	Крыша	32	кг/см ²		[65]
Швейцария	Медь	Электропроводка	24	кг/см ²		[65]
Кейптаун	Медь	Электропроводка	2,7-5,3	кг/см ²		[65]
Нью-Хейвен, США	Медь	Электропроводка	25	кг/см ²	США: в среднем 28	[22]
Нью-Хейвен, США	Сталь	Все	606	кг/см ²		[22]
Китай	Сталь	Все	14-75	кг/м ²	В зависимости от периода и типа строительства	[28]
Австралия	Цинк	Все	188/290	квартира	В жилом комплексе/одноквартирном доме)	[59]

Сравнение оценок металлов (WGA) (отходов на общую площадь здания)

Место	Металл	Вид деятельности	Оценка	Единица	Примечания	Источник
Флорида	Все	Строительство	0,3-1,5	кг/м ²	Деревянная рама/бетон	Cochran et al. ⁹
ЕС	Все	Строительство	0,9-3,9	кг/м ²		[41]
Флорида	Все	Снос	10/15	кг/м ²	Деревянная рама/бетон	См. сноску 9
ЕС	Все	Снос	9,8-28,4	кг/м ²		[41]
Флорида	Все	Реновация	0,75	кг/м ²	Деревянная рама/бетон	См. сноску 9
ЕС	Все	Реновация	0,4-6,8	кг/м ²		[41]
Флорида	Все	Замена крыши	6,8	кг/м ²		См. сноску 9
Китай	Сталь	Строительство	4	кг/м ²		[38]
Китай	Сталь	Строительство	5,1	кг/м ²	Согласно транспортным данным	[38]
Китай	Сталь	Строительство	6	кг/м ²	Другие источники	[38]
США	Сталь	Строительство	0,9	кг/м ²		[38]
Норвегия	Сталь	Строительство	0,48	кг/м ²		[38]
Корея	Сталь	Строительство	4,53	кг/м ²		[38]

⁹ Cochran, K., et al. Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition^ Case study for Florida, US. Waste Management 27(7):921-31, December 2007.

2 *Принцип анализа снизу-вверх*: оценки, основанные на инвентаризации всех используемых металлургических изделий и применении косвенных показателей для ликвидации пробелов и упрощения подсчета. Этот подход популярен для резерва ресурсов [11] из-за доступности данных по косвенным показателям, таким как здания или автомобили [59]. Основная проблема заключается в достоверности оценки состава металлов по таким показателям [49].

Оба подхода, похоже, испытывают трудности с поиском правильных данных. Подходы “снизу-вверх”, как правило, используют довольно абстрактные особенности, такие как период строительства или высота здания ([32]; [44]; [48]; [50]; [52]) или данные таких отраслей, как транспорт [40]. Что касается содержания металла в зданиях, то отношения с такими характеристиками определяются рядом дополнительных способов, включая общие правила в строительных учебниках, посещения объектов, анализ жизненного цикла, проверки зданий с истекшим сроком эксплуатации до сноса и сравнения с прецедентами ([66]; [67]).

Ключевой проблемой таких оценок является обобщение: то, что справедливо для одного здания, может не относиться к другому, в отличие, например, от автотранспортных средств, потому что здания редко производятся в промышленных масштабах [26]. Обычным решением является определение типов с высокими уровнями абстракции: литература по C & DW изобилует общими категориями, такими как жилые или нежилые, или маленькие и большие здания. Наиболее полезные категории включают основные характеристики, такие как тип несущей конструкции (стальная рама, железобетон, деревянная рама и т. д.), которые влияют на материальный состав здания. В результате в литературе представлен широкий спектр различных оценок содержания металлов в жилых зданиях (табл. 1).

Вероятно, лучшей иллюстрацией нечеткости в оценках является сравнение результатов исследования ряда немецких зданий с результатами предшествующего исследования, т. е. для довольно похожих выборок [31]:

- сталь: исследование 0,1-8,6 кг/м³ – прочие 2,08-37;
- алюминий: исследование 0,03-0,5 кг/м³ – прочие 0,013;
- медь: исследование 0,002-0,5 кг/м³ – прочие 0,05-0,24.

2.5. *Переработка*

Ряд исследований посвящен не только тому, что и сколько, но и тому, как можно перерабатывать C & DW [32]. Месторасположение переработки C & DW кажется критическим с точки зрения объема, доступности, транспорта и других факторов ([16]; [58]; [69]). Переработка по месту считается в целом трудной и дорогой [58], что позволяет предположить, что переработка C & DW начинается на установке [15]. Тем не менее, растет интерес к мобильным перерабатывающим установкам ([58]; [70]), которые связывают UM с предварительной переработкой и разделением на месте [57], а также с разборкой здания, которая в таких условиях выступает в качестве жизнеспособной альтернативы сносу ([14], [16]; [46]) и расширяет UM на формы циркулярной экономики, отличные от простого рециклинга, такие как повторное использование и модернизация ([2]; [23]). Они также предлагают возможность для связи с процессами АЕСО (архитектуры, инженерного обеспечения, строительства и эксплуатации зданий) в жизненном цикле зданий, например, используя свободные здания в качестве инициирующего фактора для UM [29]. Как обсуждается ниже, такая связь важна как для развития, так и для определения масштаба UM в зданиях.

3. Местные условия

По оценкам дочерних организаций компаний по сносу и переработке C & DW в Нидерландах, около 40% отходов в Нидерландах образуется в секторе C & D, что делает C & DW самой большой фракцией отходов в стране. 90% общего веса C & DW составляют бетон, кирпич или асфальт, а 10% - пластмассы, дерево и металлы [62]. Похоже, что в связи с простотой извлечения, ценностью, нормативными положениями и социальной включенностью, металлы находятся в замкнутой системе обращения с отходами [61]. В качестве ценного товара им уделяется особое внимание даже в жилых зданиях, где концентрация металлов ниже, чем в нежилых.

Для подтверждения результатов обзора литературы и вышеуказанных утверждений о C & DW от голландских зданий были опрошены шесть экспертов по сносу и C & DW (см. Приложение). Полуструктурированные интервью также позволили получить представление о процессах идентификации, извлечения и переработки металлических компонентов, а также о роли информации в этих процессах.

Оценки количеств металлов, на основании данных, полученных в интервью, варьировались от 5 м³ железа (в основном для систем отопления и конструкционной стали) и 1,5 м³ всех других металлов, со 150 кг черных металлов на односемейный дом. Следует отметить, что такие эмпирические оценки имеют тенденцию быть консервативными (чтобы принимать во внимание риски снижения производительности) и что они ограничены процессом извлечения: они определяют компоненты и материалы, которые могут быть извлечены непосредственно на месте.

Что касается эффективности, то результаты интервью показывают, что металлы практически всегда извлекаются в какой-то момент в цепи обработки и в основном подвергаются рециклингу. При сносе металлы, присутствующие в здании, предварительно идентифицируются визуальным осмотром, в основном на основе опыта и знаний. Строительная документация редко используется на месте. Предварительный анализ и планирование после посещения могут включать в себя рассмотрение строительных чертежей, в основном в качестве общей системы отчета, например, для расчета общих объемов здания или управления строительными работами. Эксперты по сносу зданий также являются экспертами в области выявления стоимости: они знают о потенциальной ценности материалов в целом и часто о конкретных материалах и компонентах для конкретных потенциальных покупателей (в таких случаях разбор здания является привлекательным вариантом). Фирмы по сносу хорошо связаны и способны даже предвидеть рыночный спрос на материалы из вторичных источников.

С точки зрения процесса, большинство легко удаляемых металлических компонентов должны быть быстро извлечены рабочими по сносу, прежде чем мелкие преступники могут вмешаться в процесс. Трубы, электропроводка, радиаторы и т. д. часто снимаются вручную со стен. В зависимости от сроков реализации проекта, опыта компании по сносу и текущего спроса, металлические компоненты, которые труднее достать, также могут быть извлечены по месту. Когда опыт и время ограничены или отстает спрос, смешанные отходы доставляются на объекты по переработке отходов, а металлы извлекаются за пределами площадки.

Эксперты по сносу и переработке отходов также осведомлены о рисках и опасностях, в частности о загрязняющих веществах, которые могут сделать рециклинг C & DW невозможным. В Нидерландах это, в первую очередь,

относится к асбесту, который может находиться в трубопроводах, листовых покрытиях (особенно вблизи отопительных котлов), элементах фасада и, что особенно тревожно при извлечении металла, пастах и герметиках. Наличие асбеста означает, что металлические компоненты в настоящее время будут исключены из дальнейшей переработки, по крайней мере, до очистки от загрязнений.

Разделение отходов в источнике образования, как того требуют голландские национальные строительные нормы и правила [45], в основном касается опасных веществ, но фирмы C & DW, похоже, готовы выйти за рамки своих юридических обязательств. В случае с металлами существует четкое финансовое стремление, но корпоративная ответственность, включая экологическую осведомленность, также становится фактором. Некоторые фирмы по сносу заключают далеко идущие соглашения с производителями о прямом повторном вводе конкретных C & DW в производственные процессы, чтобы уменьшить потребность в материалах из первичных источников.

Общая цепочка кажется очень изменчивой и зависит от времени, возможностей и личных предпочтений, но с точки зрения утилизации респонденты считали, что улучшение было незначительным. Промышленность, кажется, знает о возможностях, обладает высокой квалификацией и соответствующими знаниями. То, что кажется переменным и специальным, можно также рассматривать как приспособляемость к ситуациям и условиям. Однако, как и в случае с обзором литературы, оценки и утверждения могут быть сомнительными из-за отсутствия надежных данных, подтверждающих их, особенно из-за значительного дефицита времени на месте сноса и отсутствия ссылок на соответствующую строительную документацию.

4. Состояние дел: выводы и направления

4.1. Оценка

В литературе общепризнанной проблемой является то, что приблизительные оценки с использованием абстрактных символов, таких как “жилая единица”, “здание” или даже “сблокированный двухквартирный дом на одну семью”, не могут быть легко подтверждены из-за региональных, типологических и других вариаций [49]. Здания в Швейцарии и Швеции могут быть похожими, но в Кейптауне они имеют плоские крыши и не имеют отопления, что приводит к различному содержанию металла [66]. Не менее важным для экологических и типологических факторов является динамика строительства, что делает оценку довольно сложной, например, незарегистрированные или плохо документированные изменения, такие как детали, измененные подрядчиками во время строительства [46] или реновация, которые приводят к запасу металла в зимнее время, например, к старым трубопроводам [31].

Что касается C & DW, нам часто не хватает фактических данных и возможностей для проверки [67]. Хотя мы знаем, что металлы имеются, достоверность оценок, как правило, слабая, поэтому для компенсации низкой надежности применяются широкие диапазоны [41]. Кроме того, существуют различия в зависимости от типа деятельности C & D: о новых проектах строительства можно точно сообщить, а реновация и снос, как правило, недостаточно документированы [5]. В конце концов, остается неясная картина потенциала, а не информация, которая может поддержать политику,

планирование, проектирование или управление. Поэтому сомнительно, имеет ли смысл продолжать с такими ориентировочными оценками.

С методологической точки зрения, единицы измерения, применяемые для определения данных о C & DW, также вызывают озабоченность [42], с измерениями в диапазоне от т/м² до кг/см² ([44], [66]). Для отходов масса (кг) кажется безопасным выбором, безусловно, для металла, подлежащего рециклингу. Что касается источников отходов, остаются загадочные оценки, такие как на душу населения, слишком много внимания уделяется общей площади зданий (м²), которая кажется плохим показателем, поскольку она имеет неопределенное отношение к трехмерным стенам, полам, крышам и т.д., которые содержат материалы, которые интересуют УМ. Даже количество и размер радиаторов центрального отопления (основного источника железа в здании) связаны с объемом, а не с площадью пола обогреваемых помещений. Кажется, что методы оценки основаны на легкой доступности, а не на актуальности данных.

4.2. Доработки и улучшения

Литература изобилует попытками повысить надежность и специфичность оценок C & DW с помощью правил [57], вероятностей [52], точных показателей [50] или группировок продуктов [66]. Результатами, как правило, являются постепенные улучшения и уточнения, все еще ограниченные высокой абстракцией приближенных значений. Некоторые из наиболее интересных попыток касаются использования кадастровых данных и ГИС для проведения обзоров на городском или региональном уровне ([11]; [32]; [48]; [69]). В этих обзорах используется потенциал кадастров в качестве источников информации о зданиях и представлены широкие оценки возможностей УМ, которые могут поддержать принятие абстрактных решений, например, политики или бизнес-модели. Они могут даже позволить проводить локализацию на уровне города, например, какие здания могут содержать конкретные ресурсы. К сожалению, лежащие в основе данные остаются расплывчатыми и не связаны с конкретными деталями и историей зданий, из которых они происходят. Это делает обзоры довольно расплывчатыми и неопределенными, даже в отношении осуществимости политик и бизнес-моделей, поскольку в них не может быть указаний на то, сколько материалов может стать доступным, в каких условиях и когда, т.е. каков срок службы конкретных материалов.

Другие исследователи искали дополнительную информацию из других источников, которые стали широко доступны только недавно, например, аэрофотоснимки или уличные фотографии ([31]; [48]). Эти источники дополняют кадастровые данные, например, указания на облицовочные материалы и типы крыш, а также на изменения объема или внешнего вида здания, такие как переоборудование верхних этажей. К сожалению, они не дают никаких указаний на другие, более частые изменения внутри зданий, такие как ремонт кухонь или обновление ванных комнат, которые могут включать материалы с высокими ежегодными показателями замены [54].

Учитывая то, как такие попытки пытаются объединить данные из различных источников для повышения специфичности, довольно удивительно, что в исследованиях УМ мало используются первичные источники информации о зданиях, такие как чертежи и спецификации материалов, даже если такие источники могут иметься в наличии и быть доступны: 29,30% всего жилого фонда в Нидерландах принадлежит жилищным корпорациям

[8], которые должны иметь подробные и точные документы об их собственности и истории. Если добавить к этим перечисленным и недавним зданиям, которые, как правило, хорошо документированы, вполне вероятно, что еще половину жилого фонда в Амстердаме или даже больше можно будет изучить и проанализировать в значительной степени. Такие подробности поддерживают оценки количества и связывают эти оценки с компонентами здания, чтобы учитывать изменчивость состава и срока службы, а также отношения к их контексту (например, близость с загрязняющим веществам). Когда используется подробная информация, например, ведомости материалов в сочетании с типами конструкций становится возможным конкретизировать, какие материалы можно извлекать из определенных зданий и в каких количествах [54]. Это далеко от грандиозных, неизбирательных итоговых данных о твердых бытовых отходах для целых районов [11]. С точки зрения циркулярности, знание точного контекста строительного компонента и того, как он собирается и подвергается износу, имеет большое значение для определения не только простоты извлечения, но также и того, можно ли его повторно использовать, перепрофилировать, переработать или подвергнуть рециклингу.

Технические проблемы, связанные с получением соответствующей информации из различных документов АЕСО, не являются незначительными, но сопоставимы, например, с оценкой материала по уличным фотографиям или аэрофотоснимкам. Более того, их можно облегчить с помощью информационного моделирования зданий¹⁰ (BIM), которое в настоящее время является предпочтительным выбором для интеграции информации в АЕСО [24]. BIM обещает унифицированную модель в качестве основы для всех участников, действий и транзакций в процессе проектирования или строительства, а также динамическую среду для обработки информации на протяжении всего жизненного цикла здания, с существенными преимуществами для владельцев и операторов, и, следовательно, полезностью на этапе эксплуатации [7]. В исследованиях UM BIM была определена как подходящая структура для управления информацией: некоторые исследования расширили BIM обращением с отходами для улучшения проектирования зданий и прогнозирования отходов, или использовалась в качестве основы для точных расчетов ресурсов ([2]; [3], [10]). В таких расчетах используются промежуточные приблизительные значения (в основном строительные элементы, такие как железобетонные колонны и балки), которые более эффективны в качестве основы для принятия решений и политики [26]. Кроме того, BIM поддерживает интеграцию данных RFID (радиочастотной идентификации) и датчиков, которые облегчают работу, например, получается лучшая оценка механических напряжений в течение срока службы, разборки, возврата и повторного использования компонентов из конструкционной стали [47].

В заключение следует отметить, что BIM может интегрировать всю информацию из соответствующих документов, включая конструкторскую документацию и исследования на месте для извлечения материала, а также документацию процессов АЕСО, которые происходят в жизненном цикле

¹⁰ Информационное моделирование зданий – технология оптимизации процессов проектирования и строительства, в основе которой лежат использование единой модели здания и обмен информацией о любом объекте всеми участниками на протяжении всего жизненного цикла – от замысла владельца и первых набросков архитектора до технического обслуживания готового здания.

здания (например, разрешение на строительство для переоборудования верхнего этажа). Конечным результатом является комплексная, согласованная и непротиворечивая информационная система, которая использует потенциал компьютеризации для UM [67] не только для точных оценок, но и для уточнения отношений между компонентами, содержащими ценные ресурсы, и различными контекстными факторами (включая воздействие атмосферных условий и взаимодействие с другими компонентами), которые часто образуют ключевые определяющие факторы технической осуществимости или экономической жизнеспособности при утилизации.

4.3. Подтверждение, проверка и локализация

Переход от абстрактных косвенных показателей к подробной информации создает возможности для подтверждения и проверки. Это относится к прогнозам количества материала, состава и потоков, а также показателям переработки C & DW. Точное знание того, что имеется в здании, проясняет потенциал UM, в том числе путем сравнения с тем, что фактически извлекается из него в любой момент его истории.

Точные и надежные оценки ресурсов в зданиях также включают локализацию: определение точных элементов здания и компонентов, которые содержат эти ресурсы. Локализация прокладывает путь к интеграции UM в обычные процессы АЕСО, а не просто к сносу. Техническое обслуживание, незначительные улучшения и капитальный ремонт на этапе использования жизненного цикла здания могут привести к извлечению компонентов здания с истекшим сроком эксплуатации, которые могут использоваться в других условиях или содержать полезные ресурсы, причем с некоторой регулярностью и в объемах, которые заслуживают внимания.

4.4. Реновация и реконструкция

Связь с процессами АЕСО важна для поддержания и, возможно, усиления UM в зданиях. Текущий интерес к извлечению металлов явно связан со спросом и высокими ценами, которые он вызывает. Однако даже после пика спроса накопленные объемы городских вторичных ресурсов остаются серьезной экологической и экономической проблемой [28]. Сокращение новой строительной деятельности в сочетании с тенденцией сохранения в архитектуре [30] делает реновацию все более важной в АЕСО. Во многих случаях реновация уже перевешивает стоимость новых строительных работ [10], даже для жилых зданий [63], где у некоторых типов реновации WGR приближается к таковому при сносе (см. сноску 9). Следовательно, было бы неправильно рассматривать здания как статичные, неизменные запасы ресурсов [18]; на самом деле, многие материалы могут рассматриваться как ресурсы потока, которые регулярно и изменчиво выходят из антропогенной среды [54]. Поэтому сочетание UM с процессами АЕСО, которые с ними связано, становится весьма важным.

4.5. Область действия для утилизации отходов городского происхождения

Существует также вопрос области действия UM: если и литература, и местный анализ подтверждает то, что извлечение металлов из C & DW настолько значительно, насколько это возможно, что UM в Амстердаме может добавить с точки зрения эффективности или производительности?

Есть ли возможности для УМ вместе с тем, что уже происходит в цепочке переработки C & DW? История может быть полезна в этом отношении, так как энтузиазм по поводу УМ не нов; это повторяющаяся тема во времена крайней необходимости, такой как война. Анализ УМ военного времени показывает, что существуют внутренние ограничения, которые нельзя игнорировать: во время 1-й мировой войны в Австрии до 80% меди для производства боеприпасов приходилось на вторичные источники, но, возможно, всего лишь 10% от общего количества меди в процессе эксплуатации его можно было добывать по таким причинам, как высокая стоимость или значимость для других важных видов применения [33]. Более того, первоначальный стимул и результативность, по-видимому, снизились после первого года, предположительно потому, что легко доступные вещи уже были сделаны. Поэтому можно было бы предположить, что УМ может стать аналогичной недолаговечной победой, если только она не будет структурно встроена в процессы АЕСО, где его экономический вклад, пусть и небольшой, не может быть незначительным. В противном случае, следует отнести здания к долгосрочным проектам утилизации отходов городского происхождения, в отличие от краткосрочных, таких как WEEE [4], ограничить УМ запасами в зимнее время, которые по некоторым причинам не являются частью традиционных процессов переработки C & DW [34], или даже продлить срок службы зданий в качестве альтернативы УМ для повышения устойчивости и сокращения количества отходов [11].

5. Обсуждение

Цель этого исследования состояла в том, чтобы понять современное состояние УМ и сравнить его с местными практическими приемами и условиями. В литературе имеется мало определенности в отношении потенциала УМ для металлов в жилых зданиях в Амстердаме. В существующих исследованиях используются приблизительные показатели высокого уровня, при которых получаются значительные отклонения в оценках, которые кажутся менее надежными, полными или точными, чем требуется для подтверждения и проверки, не говоря уже о разработке долгосрочного политического курса, правил или бизнес-планов. Больше уверенности необходимо для преодоления блокировок существующих институтов, структурирующих принятие решений ([23]; [39]).

Существующей переработкой C & DW, возможно, удастся утилизировать ресурсы до степени, которую будет трудно повысить. В частности, металлы, по-видимому, находятся в почти замкнутом контуре, что допускает неограниченную переработку без ухудшения показателей. Однако это относится, прежде всего, к сносу, который лучше регулируется и организован, чем другие виды деятельности АЕСО. Кроме того, это трудно проверить из-за довольно расплывчатых и неполных оценок ресурсов в зданиях.

В обеих проблемах, вероятно, не хватает связи с АЕСО. Документация АЕСО содержит подробные, точные и точные данные для надежной и прозрачной оценки количества, качества и расположения ресурсов в здании. Это важно для оценки как потенциала УМ, так и эффективности современных методов практики C & DW. Возможно, еще более важными являются связи с процессами АЕСО. Основная причина этого заключается в том, что с их помощью можно реально определить, когда и как компоненты, а не материалы, могут быть извлечены из антропогенной среды. Это создает реальные возможности для утилизации даже в жилых зданиях с их часто

небольшими, но повторяющимися изменениями. Если реновация и реконструкция зданий регулярно приводит к значительному росту количеству C & DW, как предполагается в литературе, жилые здания могут стать значительными вторичными источниками различных материалов (не обязательно металлов) во время их использования без каких-либо негативных последствий для их обитателей. Связи с АЕСО также создают основу для достижения более высоких форм циркуляции, т.е., может ли компонент повторно использоваться непосредственно или путем перепрофилирования, или модернизации, а не просто подвергать рециклингу для утилизации материалов.

Специалисты АЕСО, которые проектируют, планируют и выполняют соответствующие действия, а также владельцы зданий, должны осознавать ценность того, что удаляется во время этих действий, и как это можно перерабатывать в последующих циклах материалов. Анализ таких процессов на основе адекватной и надежной информации мог бы определить, охвачена ли УМ уже существующей обработкой C & DW, имеются ли возможности для улучшения текущей практики АЕСО (что в целом представляется вероятным, учитывая фрагментарный институциональный характер АЕСО и его функционирование на нескольких рынках и в распределенных проектных группах [60] или для дополнительных мероприятий УМ вне АЕСО, и какие политические направления, нормативные акты, финансовые и социальные мотивы могут сочетаться для достижения более широких целей циркулярности в городах [23].

С компьютерной точки зрения, использование ГИС для всестороннего и последовательного обзора является положительным шагом для представления общего потенциала УМ. Однако критический анализ этого потенциала не должен ограничиваться обзорами или доступными открытыми данными (например, кадастровыми); они должны распространяться на конкретные характеристики конкретных целей, таких как металлы, жилые здания и такие места, как Амстердам, со своими собственными правовыми, архитектурными и практическими ограничениями. Из этого следует, что при проведении исследования УМ, а также АЕСО необходимо вкладывать больше средств в ВМ и использовать возможности, которые она предоставляет для определения элементов и компонентов здания с истекшим сроком эксплуатации в жизненном цикле встроенной среды.

Наконец, концентрация внимания на конкретных ресурсах, таких как металлы, позволяет углубленно исследовать возможности и ограничения, включая более четкие связи с контекстом этих ресурсов (особенно с продолжительностью жизни компонентов, которые их содержат, и соответствующими процессами АЕСО), а также с конкретностью в информации, необходимой для выявления и количественной оценки их. Обобщение путем агрегирования потенциала конкретных материалов обеспечивает более высокую достоверность, чем абстрактные, основанные на приблизительных показателях, исходные оценки общей массы в зданиях, городах или регионах.

Приложение А: дополнительные данные

Дополнительные материалы, относящиеся к этой статье, можно найти в интернет-версии doi (цифровой индикатор объекта): <https://doi.org/10.1016/j.recnonrec.2018.06/024>.

Библиография

- [1] Agamuthu, P., 2008. Challenges in sustainable management of construction and demolition waste. *Waste Manage. Res.* 26 (6), 491–492.
- [2] Akanbi, L.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Ajayi, A.O., Davila Delgado, M., Bilal, M., Bello, S.A., 2018. Salvaging building materials in a circular economy: a BIM-based whole-life performance estimator. *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 175–186.
- [3] Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Munir, K., Bilal, M., Ajayi, S.O., Owolabi, H.A., Alaka, H.A., Bello, S.A., 2016. Evaluation criteria for construction waste management tools: towards a holistic BIM framework. *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* 1–19.
- [4] Arora, R., Paterok, K., Banerjee, A., Saluja, M.S., 2017. Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. *IIMB Manage. Rev.* 29 (3), 210–224.
- [5] Bergsdal, H., Bohne, R.A., Brattebø, H., 2007. Projection of construction and demolition waste in Norway. *J. Ind. Ecol.* 11 (3), 27–39.
- [6] Bertram, M., Graedel, T.E., Rechberger, H., Spataro, S., 2002. The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecol. Econ.* 42 (1–2), 43–57.
- [7] Bosch, A., Volker, L., Koutamanis, A., 2015. BIM in the operations stage: bottlenecks and implications for owners. *Built Environ. Project Asset Manage.* 5 (3), 331–343.
- [8] CBS, 2017. Voorraad Woningen; Eigendom, Type Verhuurder, Bewoning, Regio. (Accessed 06 December 2017). <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82900NED/table?ts=1512576592111>.
- [9] CBS, 2018. Voorraad Woningen En Niet-Woningen. (Accessed 16 February 2018). <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/81955NED/table?ts=1521362408832>.
- [10] Cheng, J.C.P., Ma, L.Y.H., 2013. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. *Waste Manage. (Oxford)* 33 (6), 1539–1551.
- [11] Cheng, K.-L., Hsu, S.-C., Li, W.-M., Ma, H.-W., 2018. Quantifying potential anthropogenic resources of buildings through hot spot analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 133, 10–20.
- [12] Ciacci, L., Vassura, I., Passarini, F., 2017. Urban mines of copper: size and potential for recycling in the EU. *Resources* 6 (1), 6.
- [13] Clapp, J.M., Salavei, K., 2010. Hedonic pricing with redevelopment options: a new approach to estimating depreciation effects. *J. Urban Econ.* 67 (3), 362–377. Cochran, K., Townsend, T., Reinhart, D., Heck, H., 2007. Estimation of regional building related C&D debris generation and composition: case study for Florida, US. *Waste Manage. (Oxford)* 27 (7), 921–931.
- [14] Coelho, A., de Brito, J., 2011. Economic analysis of conventional versus selective demolition—a case study. *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (3), 382–392.
- [15] Coelho, A., de Brito, J., 2013b. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. *J. Clean. Prod.* 39, 338–352.
- [16] Coelho, A., De Brito, J., 2013a. Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodshed Publishing, pp. 141–185.

- [18] Cossu, R., Williams, I.D., 2015. Urban mining: concepts, terminology, challenges. *Waste Manage.* (Oxford) 45, 1–3.
- [19] Coulson, N.E., McMillen, D.P., 2008. Estimating time, age and vintage effects in housing prices. *J. Hous. Econ.* 17 (2), 138–151.
- [20] Dahlbo, H., Bachér, J., Lähinen, K., Jouttijärvi, T., Suoheimo, P., Mattila, T., Sironen, S., Myllymaa, T., Saramäki, K., 2015. Construction and demolition waste management – a holistic evaluation of environmental performance. *J. Clean. Prod.* 107, 333–341.
- [21] Directive, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2009 on Waste and Repealing Certain Directives. European Union.
- [22] Drakonakis, K., Rostkowski, K., Rauch, J., Graedel, T.E., Gordon, R.B., 2007. Metal capital sustaining a North American city: iron and copper in New Haven, CT. *Resour. Conserv. Recycl.* 49 (4), 406–420.
- [23] Eames, M., Dixon, T., May, T., Hunt, M., 2013. City futures: exploring urban retrofit and sustainable transitions. *Build. Res. Inform.* 41 (5), 504–516.
- [24] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., 2011. *BIM Handbook*, 2nd ed. Wiley, Hoboken NJ.
- [25] Gemeente Amsterdam, 2014. *Amsterdam Circulaire Metropool, 2014–2018*.
- [26] Gerst, M.D., Graedel, T.E., 2008. In-use stocks of metals: Status and implications. *Environ. Sci. Technol.* 42 (19), 7038–7045.
- [27] Grussing, M.N., 2014. Life cycle asset management methodologies for buildings. *J. Infrastruct. Syst.* 20 (1), 04013007.
- [28] Huang, T., Shi, F., Tanikawa, H., Fei, J., Han, J., 2013. Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 72, 91–101.
- [29] Huuhka, S., 2016. Vacant residential buildings as potential reserves: a geographical and statistical study. *Build. Res. Inform.* 44 (8), 816–839.
- [30] Huuhka, S., Lahdensivu, J., 2016. Statistical and geographical study on demolished buildings. *Build. Res. Inform.* 44 (1), 73–96.
- [31] Kleemann, F., Lederer, J., Aschenbrenner, P., Rechberger, H., Fellner, J., 2016. A method for determining buildings’ material composition prior to demolition. *Build. Res. Inform.* 44 (1), 51–62.
- [32] Kleemann, F., Lederer, J., Rechberger, H., Fellner, J., 2017. GIS-based analysis of Vienna’s material stock in buildings. *J. Ind. Ecol.* 21 (2), 368–380.
- [33] Klinglmair, M., Fellner, J., 2010. Urban mining in times of raw material shortage. *J. Ind. Ecol.* 14 (4), 666–679.
- [34] Krook, J., Baas, L., 2013. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *J. Clean. Prod.* 55, 1–9.
- [35] Kucukvar, M., Egilmez, G., Tatari, O., 2016. Life cycle assessment and optimization-based decision analysis of construction waste recycling for a LEED-certified university building. *Sustainability* 8 (1), 89.
- [36] Lederer, J., Kleemann, F., Ossberger, M., Rechberger, H., Fellner, J., 2016. Prospecting and exploring anthropogenic Resource deposits: the case study of Vienna’s subway network. *J. Ind. Ecol.* 20 (6), 1320–1333.
- [37] Li, J., 2015. Wastes could be resources and cities could be mines. *Waste Manage. Res.* 33 (4), 301–302.
- [38] Li, J., Ding, Z., Mi, X., Wang, J., 2013. A model for estimating construction waste generation index for building project in China. *Resour. Conserv. Recycl.* 74, 20–26.

- [39] Loorbach, D., 2010. Transition management for sustainable development: a prescriptive, complexity-based governance framework. *Governance* 23 (1), 161–183.
- [40] Mah, C.M., Fujiwara, T., Ho, C.S., 2016. Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. *Waste Manage. Res.* 34 (12), 1224–1230.
- [41] Mália, M., de Brito, J., Pinheiro, M.D., Bravo, M., 2013. Construction and demolition waste indicators. *Waste Manage. Res.* 31 (3), 241–255.
- [42] Martínez Lage, I., Martínez Abella, F., Herrero, C.V., Ordóñez, J.L.P., 2010. Estimation of the annual production and composition of C&D debris in Galicia (Spain). *Waste Manage.* 30 (4), 636–645.
- [43] Méquignon, M., Ait Haddou, H., 2014. *The Construction Industry and Lifespan, Lifetime Environmental Impact of Buildings*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–23.
- [44] Mercader-Moyano, P., Ramírez-de-Arellano-Agudo, A., 2013. Selective classification and quantification model of C&D waste from material resources consumed in residential building construction. *Waste Manage. Res.* 31 (5), 458–474.
- [45] Ministerie_van_Binnenlandse_Zaken_en_Koninkrijksrelaties, 2012. *Regeling bouwbesluit. Hoofdstuk 4: Scheiden bouw- en sloopafval*.
- [46] Mulder, E., de Jong, T.P.R., Feenstra, L., 2007. Closed cycle construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Manage. (Oxford)* 27 (10), 1408–1415.
- [47] Ness, D., Swift, J., Ranasinghe, D.C., Xing, K., Soebarto, V., 2015. Smart steel: new paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modeling. *J. Clean. Prod.* 98, 292–303.
- [48] Oezdemir, O., Krause, K., Hafner, A., 2017. Creating a Resource cadaster— a case study of a district in the Rhine-Ruhr metropolitan area. *Buildings* 7 (2), 45.
- [49] Ortlepp, R., Gruhler, K., Schiller, G., 2015. Material stocks in Germany's non-domestic buildings: a new quantification method. *Build. Res. Inform.* 1–24.
- [50] Ortlepp, R., Gruhler, K., Schiller, G., 2016. Materials in Germany's domestic building stock: calculation model and uncertainties. *Build. Res. Inform.* 1–15.
- [51] Rijkswaterstaat_Leefomgeving, 2013. *Nederlands afval in cijfers: gegevens 2006-2010*. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Utrecht.
- [52] Schebek, L., Schnitzer, B., Blesinger, D., Köhn, A., Miekley, B., Linke, H.J., Lohmann, A., Motzko, C., Seemann, A., 2017. Material stocks of the non-residential building sector: the case of the Rhine-Main area. *Resour. Conserv. Recycl.* 123, 24–36.
- [53] Stephan, A., Athanassiadis, A., 2017. Quantifying and mapping embodied environmental requirements of urban building stocks. *Build. Environ.* 114, 187–202.
- [54] Stephan, A., Athanassiadis, A., 2018. Towards a more circular construction sector: estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 248–262.
- [55] Struhala, K., Stranska, Z., 2016. Impact of Building's Lifespan on the Life Cycle Assessment, CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future. pp. 1489–1496.
- [56] Syed, I.A., De Haan, J., 2017. Age, time, vintage, and price indexes: measuring the depreciation pattern of houses. *Econ. Inq.* 55 (1), 580–600.
- [57] Tesfaye, F., Lindberg, D., Hamuyuni, J., Taskinen, P., Hupa, L., 2017. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. *Miner. Eng.* 111, 209–221.

- [58] Ulubeyli, S., Kazaz, A., Arslan, V., 2017. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. *Procedia Eng.* 172, 1190–1197.
- [59] van Beers, D., Graedel, T.E., 2007. Spatial characterisation of multi-level in-use copper and zinc stocks in Australia. *J. Clean. Prod.* 15 (8–9), 849–861.
- [60] Van Bueren, E., De Jong, J., 2007. Establishing sustainability: policy successes and failures. *Build. Res. Inform.* 35 (5), 543–556.
- [61] Vereniging_Afvalbedrijven, 2013. *Afvalforum: Sluiten van de kringloop van bouw- en sloopafval.*
- [62] Vereniging_Afvalbedrijven, 2015. *Afval in cijfers.*
- [63] Wang, T., Tian, X., Hashimoto, S., Tanikawa, H., 2015. Concrete transformation of buildings in China and implications for the steel cycle. *Resour. Conserv. Recycl.* 103, 205–215.
- [64] Wen, Z., Zhang, C., Ji, X., Xue, Y., 2015. Urban mining's potential to relieve China's coming Resource crisis. *J. Ind. Ecol.* 19 (6), 1091–1102.
- [65] Wittmer, D., Lichtensteiger, T., 2007. Development of anthropogenic raw material stocks: a retrospective approach for prospective scenarios. *Miner. Energy - Raw Mate. Rep.* 22 (1-2), 62–71.
- [66] Wittmer, D., Lichtensteiger, T., Wittmer, D., 2007. Exploration of urban deposits: longterm prospects for resource and waste management. *Waste Manage. Res.* 25 (3), 220–226.
- [67] Wu, Z., Yu, A.T.W., Shen, L., Liu, G., 2014. Quantifying construction and demolition waste: an analytical review. *Waste Manage. (Oxford)* 34 (9), 1683–1692.
- [68] Wu, H., Duan, H., Zheng, L., Wang, J., Niu, Y., Zhang, G., 2016. Demolition waste generation and recycling potentials in a rapidly developing flagship megacity of South China: prospective scenarios and implications. *Constr. Build. Mater.* 113, 1007–1016.
- [69] Xue, Y., Wen, Z., Ji, X., Bressers, H.T.A., Zhang, C., 2017. Location optimization of Urban mining facilities with maximal covering model in GIS: a case of China. *J. Ind. Ecol.* 21 (4), 913–923.
- [70] Zhao, W., Loeffink, R.B., Rotter, V.S., 2010. Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in china—the case of Chongqing. *Resources, Conserv. Recycl.* 54 (6), 377–389.