

ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННОГО ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОД ТРЕБУЕТСЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ БАЛАНСИРОВАНИЯ РИСКОВ И ВЫГОД. ОБЗОР

Milou M.L. Dingemans¹, Patrick W. M. H. Smeets², Gertjan Medema^{2, 2}, Jos Frijns²,
Klaasjan J. Raaij², Annemarie P. van Wezel³, Ruud P. Bartbolomeus^{2, 4}
(29 апреля 2020 г.)

RESPONSIBLE WATER REUSE NEEDS AN INTERDISCIPLINARY APPROACH TO BALANCE RISKS AND BENEFITS. REVIEW

Water MDPI⁵

Резюме

Пресная вода является ценным ресурсом, и ее дефицит может привести к недовлестатку воды, с воздействием на сельское хозяйство, промышленность и другие сектора. Повторное использование сточных вод все чаще рассматривается как возможность удовлетворения потребности в пресной воде. Разрабатываются законодательные рамки для поддержки ответственного повторного использования сточных вод, при балансировании рисков и выгод. При оценке предлагаемого европейского регламента для повторного использования вод авторы работы пришли к выводу, что предложенный регламент практически неосуществим, поскольку только водоснабжающая организация несет ответственность за оценку риска и управление даже, если это находится за пределами ее контроля. Необходимы обширные знания и ресурсы. Поэтому без четкого руководства по реализации регламент будет препятствовать выполнению программ повторного использования. Следовательно, нынешняя практика бесконтрольного, непреднамеренного и побочного повторного использования продолжается, включая соответствующие риски и неэффективность. Поэтому авторы представили схему междисциплинарного подхода, необходимого для разработки и обеспечения безопасного и ответственного повторного использования вод. Для ответственного повторного использования вод требуются знания о потребности воды и ее наличии, качестве и гигиенических нормах, технологии и управлениии для различных типов применения. С помощью этой статьи авторы хотят выйти на исходный рубеж для междисциплинарной повестки дня по сбору и генерированию знаний (баз данных), подходов, руководящих принципов, примеров из практики, норм практики и законодательства, чтобы помочь внедрить ответственное повторное использование вод на практике.

¹ Независимый научно-исследовательский институт водных ресурсов, охватывающий весь водооборот, основанный в 2008 г. в г. Ньювегейн, Нидерланды.

² Кафедра управления водными ресурсами, факультет жилищно-гражданского строительства и наук о земле, Делфтский технический университет, Нидерланды.

³ Институт биоразнообразия и динамики экосистем, университет Амстердама.

⁴ Группа физики почвы и землепользования, Вагенингенский университет.

⁵ Междисциплинарный институт цифровых публикаций – издатель научных журналов с открытым доступом, основанный в 1996 г., со штаб-квартирой в Базеле, Швейцария.

1. Введение

Пресная вода является ценным ресурсом, и ее дефицит может привести к недостатку воды, с воздействием на сельское хозяйство, промышленность и другие сектора [1]. Для ее пополнения очищенные городские (бытовые) или промышленные сточные воды все чаще рассматриваются как ресурс пресной воды. Путем повторного использования сточных вод можно снизить давление на водные ресурсы, что находится в соответствии с целями циркулярной экономики [2]. Однако вода должна не только использоваться ответственным, устойчивым образом, т.е. чтобы не появлялись неприемлемые дополнительные риски для здоровья человека и окружающей среды, помимо существующих источников воды. Основным вызовом для достижения такого ответственного повторного использования воды является то, что существуют значительные различия в (потенциальных) рисках и опасностях, связанных с различиями в источниках воды, применении и типах методов очистки воды, и, следовательно, в качестве воды, а также в использовании, практике или методе применения [3-10].

Применения повторного использования сточных вод в Европе включают повторное использование городских сточных вод в качестве питьевой воды [11], в качестве охлаждающей воды в промышленности [12] и для сельскохозяйственной ирригации [13-15], а сточные воды пищевой промышленности используются для ирригации в сельском хозяйстве [16] и садоводстве [17].

Замысел ЕС состоит в защите водных ресурсов Европе, подчеркивании при этом необходимости использования очищенных сточных вод в качестве водных ресурсов для ирригации [3, 18]. Рамочная директива по воде и Директива об очистке городских сточных вод⁶ предъявляют соответствующие требования к очистке сточных вод. Для эффективного повторного использования, однако, в замысле ЕС идентифицируется отсутствие общих стандартов, что приводит к системе управления рисками Совместного исследования европейского центра для установления минимальных требований качества для повторного использования воды в сельском хозяйстве [19].

В настоящее время нет четких распорядительных документов ЕС в отношении воды для ирригации. Однако предлагаемый регламент ЕС для непосредственного использования бытовых сточных вод для ирригации [20] был недавно одобрен Советом ЕС, и ожидается его принятие Европейским Парламентом [21]. Он включает согласованные минимальные требования качества и практику управления риском, а также конкретные процессы, связанные с разрешениями и обязательствами по обмену информацией о повторном использовании. Предлагаемый регламент ЕС для непосредственного повторного использования бытовых сточных вод для ирригации требует подробного понимания выгод и рисков повторного использования для сельскохозяйственной практики для каждой программы повторного использования. В этом предложенном регламенте утверждается, что план управления риском повторного использования воды (WRRMP) требуется для улучшения качества среды, для управления микробными и химическими рисками с опережением. Минимальные требования качества предложены для различных типов повторного использования в сельском хозяйстве, в зависимости от категории сельскохозяйственных культур и типа ирригации.

⁶ Директива Совета ЕС 91/271/ЕЭС от 21 мая 1991 г. об очистке городских сточных вод.

Дополнительные требования к качеству воды, которые являются важными для конкретной программы повторного использования, должны быть добавлены на основе WRRMP.

Более ранние оценки независимыми экспертами [22] позволили прийти к выводу, что, хотя многие важные элементы включены в предложенные требования к качеству воды, некоторые ключевые аспекты не были должным образом рассмотрены – в частности, загрязняющие вещества, вызывающие растущую озабоченность, распространение устойчивости к антибиотикам, побочные продукты дезинфекции и потенциал биоаналитических инструментов, основанных на эффектах – и что выбор минимальных требований к качеству неясен. В этой статье рассмотрены различные аспекты, которые должны быть учтены в каждом случае повторного использования воды, т.е. потребность и наличие воды, качество воды (гигиенические качества и безопасность), технология очистки и управление (политика и нормативы, экономика, участие заинтересованных сторон и общественная приемлемость) (рис. 1). Предложенные руководства ЕС для повторного использования бытовых сточных вод для ирригации и WRRMP были критически рассмотрены в отношении практической осуществимости конкретного случая повторного использования воды в Нидерландах [23]. Это приводит к определению требований к знаниям в отношении ответственного повторного использования воды. В статье дается представление о том, как предлагаемые нормативные требования могут быть усовершенствованы для содействия инновациям с технической точки зрения достижения, управления, мониторинга и регулирования ответственного повторного использования воды.

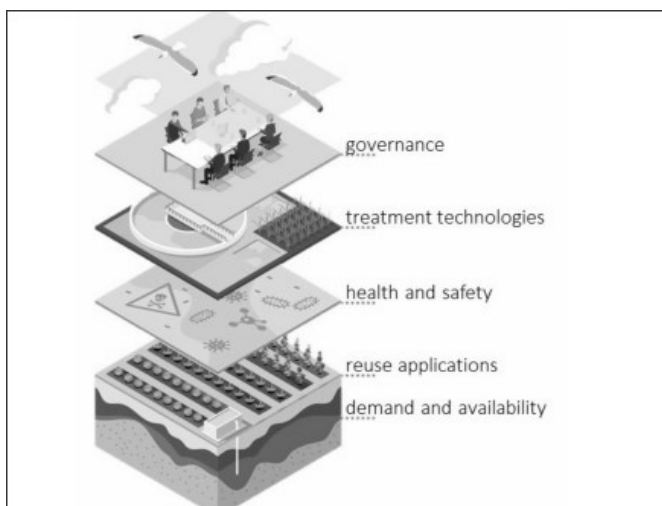


Рисунок 1. Различные дисциплины, необходимые для практики ответственного повторного использования вод

Пояснения к рисунку 1:

governance - управление, treatment technologies – технологии очистки, health and safety – гигиенические требования и безопасность, reuse application – пример повторного использования, demand and availability – потребность и наличие.

2. Потребность и доступность воды и применения с повторным использованием

Самыми распространенными источниками пресной воды являются подземные и поверхностные воды, часто воспринимаемые как природные воды [24, 25]. Однако сточные воды косвенно (фактически) уже часто используются в сельском хозяйстве для ирригации с поверхностными водами, в которые сбрасываются бытовые сточные воды, разбавляя их [26]. Для нескольких регионов в Европе с сельскохозяйственной ирригацией было оценено воздействие сточных вод на качество воды для ирригации, и оно было значительным [24]. На глобальном уровне, по имеющейся оценке, порядка 65% орошаемых пахотных угодий ниже по течению от городских территорий были расположены в водосборах, подверженных воздействию городских сточных вод [27]. Основными движущими силами преднамеренного использования стоков являются уменьшение уровней подземных вод и продолжительные засухи [28]. Периоды засухи в Европе, даже в регионах с избытком годовых осадков привели к целенаправленному использованию очищенных сточных вод для ирригации без адекватной оценки риска. Питание водоносного горизонта или запасы подземных вод для предотвращения или снижения засоления почвы также создает потребность в (регенерированной) пресной воде [29].

В количественном отношении повторное использование бытовых сточных вод для ирригации обладает высоким потенциалом для того, чтобы играть важную роль в управлении водными ресурсами. Для непосредственно повторного использования сточные воды должны быть очищены до такой степени, чтобы они были пригодны для ирригации. Такое преднамеренное использование предполагает лучшие возможности контроля и управления, чем нынешняя фактическая практика повторного использования. Имеется недостаточное количество знаний о требуемом качестве воды для безопасного использования в сельском хозяйстве, в особенности в отношении новых соединений. Необходимо применять инновационные методы очистки для надежного и устойчивого достижения этого качества, по доступной цене. Так как обычно самый высокий спрос бывает тогда, когда имеется наименьшее количество воды, необходимо разработать концепции для временного скопления подземных вод. Для этого, в свою очередь, требуется достаточное качество воды, но можно также улучшить качество воды [30, 31]. Разумное сочетание различных применений повторного использования с различными потребностями приведет к возрастанию гибкости системы, но требуются инновационные бизнес-модели для управления общими водными ресурсами. Предложенный регламент ЕС для повторного использования ограничен непосредственным повторным использованием очищенных бытовых сточных вод для ирригации⁷. Поэтому он применяется только к выбору потенциальных применений для повторного использования вод, и в нем отсутствует комплексный подход. Регламент требует детального понимания выгод и рисков повторного использования для сельскохозяйственной практики. Если водоснабжающая организация не обладает специальными

⁷ Предложение для Регламента Европейского Парламента и Совета о минимальных требованиях к повторному использованию вод. COM (2018) 337 28.5.2018. 2018/0169 (COD). Регламент должен вступить в силу с 26 июня 2023 г.

знаниями и понимает, что требуемый мониторинг должен быть дорогостоящим, предложенный регламент может отбить желание для преднамеренного повторного использования, и, таким образом, непреднамеренно будет стимулировать рост косвенного фактического повторного использования.

3. Здоровье и безопасность, включая очистку воды

Нынешние системы канализации сточных вод были спроектированы для эффективного удаления сточных вод из домов со сбросом в окружающую среду для предотвращения контакта с людьми. Опасность, связанная с повторным использованием сточных вод, состоит в том, что вместе с ними загрязняющие вещества могут возвратиться в среду обитания человека. При ирригации с очищенными сточными водами в почву и растения могут попасть патогенные организмы и химические вещества, некоторые из которых могут воздействовать на здоровье человека при переносе через пищевую цепь или с загрязняющими веществами из воздуха, поверхностных или подземных вод. Риски для здоровья человека вследствие наличия патогенных организмов или химических веществ могут значительно различаться между различными случаями повторного использования воды для ирригации, в зависимости от типа сточных вод, вида землепользования, типа почвы, ирригации, сценариев воздействия и гидрологических условий на участке ирригации [32]. Традиционные процессы очистки сточных вод не предназначены для удаления патогенных организмов и появляющихся загрязняющих веществ [33]. Дополнительные и инновационные технологии очистки воды на основе сорбции, окисления и принципе гель-фильтрации, таким образом, необходимы для повышения эффективности использования воды [34]. Недавняя деятельность по сбору всей информации об удалении широкого спектра патогенных организмов и (новых) загрязняющих веществ с помощью обычных и перспективных технологий очистки, таких как активированный уголь, использование озона и ультрафиолетового излучения с H_2O_2 (пероксида водорода) или без него, нанофильтрации и обратного осмоса, действительно показала, что информация имеется, но она рассеяна, и непрерывно возрастает и расширяется до новых загрязняющих веществ [34, 35]. Кроме того, различные маршруты воздействия и их соответствующая обоснованность различаются в зависимости от ситуации и типа ирригации, сельскохозяйственных культур и судьбы в окружающей среде химических веществ в регенерированной воде в почве. В каждом случае повторного использования воды необходимо ответить на следующие вопросы о качестве воды: какие риски, связанные с наличием патогенных организмов или химических веществ, важны в этом конкретном случае, и какие технологии очистки воды являются эффективными?

Патогенные организмы в бытовых сточных водах включают бактерии, вирусы, одноклеточные животные организмы и гельминты. Это в основном это кишечные патогенные организмы, вызывающие желудочно-кишечные заболевания, которые попадают в сточные воды с выделениями инфицированных людей. Патогенные организмы в настоящее время не подвергаются мониторингу в сточных водах; так что все, что известно о наличии распространенных и редких патогенных микроорганизмов в различных типах сточных вод, исходит из исследований, но данные рассеяны [36]. Количе-

ственные анализе в реальном масштабе времени полимеразной цепной реакции⁸ (PCR) могут служить в качестве относительно простого и дешевого инструмента анализа на предмет наличия патогенных организмов в сточных водах [37], хотя необходимо учитывать, что эти методы не могут выявить различия между ДНК из живых или мертвых патогенных организмов, и, таким образом, результаты могут ложно-положительными. Вирусы, бактерии и паразиты удаляются или инактивируются только в ограниченной степени в традиционных (активный ил и седиментация) процессах очистки сточных вод [36]. Поэтому для многих применений повторного использования в сельском хозяйстве технические условия микробиологической безопасности должны потребовать дополнительной очистки или других действий по управлению риском. В предложенном регламенте ЕС для повторного использования бытовых сточных вод для ирригации минимальные требования установлены только для микробиологических параметров *Escherichia coli*⁹ (*E. Coli*), *Legionella spp*¹⁰ и яиц глистов, а также некоторые технические минимальные требования также связаны с микробиологической безопасности. Выбор *E. Coli* в качестве общего индикатора для оценки того, способна ли система повторного использования получать воду, которая будет безопасной для различных целей ирригации, может привести к ложному ощущению безопасности, так как *E. Coli* очень чувствительна к процессам дезинфекции, по сравнению с другими микробиологическими опасностями [38]. В повторно используемых сточных водах обычно содержится больше органических веществ, которые стимулируют микробиологический рост, включая возможность для таких патогенных организмов, как *Legionella*. Требования к *Legionella spp* распространяются только на теплицы, где существует риск появления аэрозолей. Это потенциально высокий риск для *Legionella pneumophila*¹¹, с учетом температуры воды в этих системах ирригации. Однако несколько систем городских сточных вод были связаны со вспышками *Legionella pneumophila* [39-42], в особенности со сточными водами с высоким содержанием органических веществ и с высокой температурой, такого типа как пивоваренные заводы или целлюлозно-бумажные комбинаты, так что включение систем повторного использования на основе таких сточных вод обосновано. Помимо этого, предложенный мониторинг *Legionella spp* включает много не патогенных видов *Legionella*, которых может быть очень много в водных системах, в то время как значительное большинство тяжелых инфекций связано с *Legionella pneumophila*. Управление такого типа еще больше повышает риск, так как виды *Legionella* конкурируют в биопленках. Разрушение биопленки путем дезинфекции *Legionella spp* может действительно позволить *Legionella pneumophila* размножаться в новой ситуации [43]. Поэтому

⁸ Полимеразная цепная реакция – метод молекулярной биологии, позволяющий добиться значительного увеличения малых концентраций определенных фрагментов нуклеиновой кислоты (ДНК) в биологическом материале (пробе).

⁹ Кишечная палочка- вид грамотрицательных палочковидных бактерий, широко распространенных в нижней части кишечника теплокровных животных.

¹⁰ Род патогенных грамотрицательных бактерий, которые встречаются во многих средах, включая почву и водные объекты.

¹¹ Грамотрицательная, подвижная палочковидная бактерия рода легионелл, возбудитель легионеллеза – остро инфекционного заболевания с выраженной лихорадкой, интоксикацией, поражением легких, центральной нервной системы, органов пищеварения.

установление требований специально для *Legionella pneumophila* должно стать лучшим индикатором риска.

Продолжается дискуссия о важности водного маршрута для воздействия на человека бактерий, стойких к антибиотикам, но известно, что многие типы бактерий и генов, устойчивых к антибиотикам, находятся в сточных водах [44]. ВОЗ указывает, что сброс и воздействие через бытовые сточные воды должны поддерживаться на как можно меньшем достижимом уровне [45, 46]. Для демонстрации этого было бы полезно подготовить руководство и выбрать ссылку в отношении устойчивости к антибиотикам, такого типа как бета-лактамаза расширенного спектра (ESBL) *E. Coli*, с учетом ее широкого распространения и одной из устойчивых бактерий, вызывающих озабоченность и присутствующих с высокими концентрациями, и тем, что имеется хороший метод их подсчета в сточных водах.

Риски химических веществ для здоровья человека или окружающей среды зависят от опасных свойств соответствующих химических веществ и разницы между безопасным уровнем воздействия и реальным воздействием, имеющим место [47]. Уровни воздействия можно контролировать, но в схеме управления риском уровни воздействия можно также предсказать в определенной степени на основе (ожидаемых) уровней в сточных водах, эффективности очистки, распределения и разложения в воде, почве и воздухе и поглощения растениями [32, 48]. В сточных водах содержится постоянно изменяющийся состав химических веществ в сложных смесях, в зависимости от деятельности человека. Таким образом, люди могут подвергаться воздействию химических веществ в регенерированной воде по различным маршрутам воздействия, частично в зависимости от (профессиональной) деятельности подвергаемых воздействию лиц. Для стойких химических веществ концентрации в почвах, орошаемых сточными водами, могут даже медленно возрастать с каждым последующим применением сточных вод [32, 49].

В предложенном регламенте не включены минимальные требования для химических веществ, но должны быть определены конкретные химические вещества в конкретных условиях на основе результатов WRRMP. Этот план относится к существующему законодательству ЕС по химическим веществам в продуктах питания¹² и окружающей среде. Перечень соответствующих химических веществ, которые следует учитывать при подтверждении соответствия и мониторинге работы очистных сооружений, может быть основан на их известном или ожидаемом наличии в сточных водах, законодательных критериях для (подземных) вод и требованиях безопасности пищевых продуктов для сельскохозяйственных культур, таких как максимальные уровни остатков. Минимальные требования для этих химических веществ в месте подтверждения соответствия, таком как выход очистных сооружений, можно определить на основе соответствующих маршрутов воздействия и реального наихудшего случая и процессов переноса химических веществ от места сброса после стандартной очистки сточных вод до воздействия на человека и окружающую среду. В сточных водах содержатся также биогенные (питательные) вещества, которые могут быть полезными для растениевод-

¹² Регламент (ЕС) № 1831/2003 Европейского Парламента и Совета от 22 сентября 2003 г. о материалах и изделиях, предназначенных для контактирования с продуктами питания.

ства, такие как азот, фосфор, калий и органическое вещество [50]. Требуемые концентрации питательных веществ варьируются на различных стадиях растениеводства, и имеются некоторые со здоровьем опасности (например, нитраты). Регенерированная вода для ирригации может также негативно воздействовать на сельскохозяйственную продуктивность, особенно за счет содержания соли [51]. Предельные концентрации химических веществ в повторно используемых сточных водах основаны либо на потребностях сельскохозяйственных культур, либо на проблемах для здоровья человека или окружающей среды. Соответствующие данные о химических веществах могут быть получены путем объединения информации о их происхождении в сточных водах и их рисках, включая законодательные требования к безопасности пищевых продуктов. Следуя предложенному регламенту, системы контроля состояния окружающей среды должны включать в себя весь путь воды, т.е. очистки сооружения, место использования и далее в окружающей среде. Это обычно превышает сферу контроля отдельных водоснабжающих организаций или руководителей водных хозяйств.

Косвенное повторное использование путем производства питьевой из бытовых и промышленных сточных вод, подвергшихся воздействию поверхностных вод, основано на опыте нескольких десятилетий мониторинга и управления рисками для качества воды. Вследствие роста знаний о возможных негативных воздействиях и возрастающих аналитических возможностей количество химических параметров, включаемых в программы мониторинга коммунального водоснабжения, экспоненциально возрастало в последнее десятилетие [52]. В соответствии с европейской директивой о питьевой воде [53] системы коммунального водоснабжения стремятся к индивидуальной программе мониторинга на основе рисков, и этот подход применим также и к применению повторного использования воды. Программы мониторинга на основе риска могут быть разработаны на основе знаний о химическом составе сточных вод и очищенных сточных вод, уязвимости принимающих подземных вод и потенциальных маршрутах воздействия. Ожидается, что процесс мониторинга на основе риска для повторного использования сточных вод в целях ирригации может быть основан на технологиях, которые в настоящее время используются для питьевой воды [47, 54]. Это может быть дополнено биоаналитическими инструментами, которые дают информацию о комплексном эффекте смесей химических веществ, связанных с конкретными воздействиями на здоровье [55, 56]. Ссылаясь на перечень законодательных предложений ЕС о микробиологических и химических рисках, из которых принимаются также во внимание требования и обязательства, многие дополнительные требования к качеству воды включены в предлагаемый регламент. Должно быть дополнительно разработано руководство о том, какие требования из этого законодательства должны быть включены в WRRMP. Практические примеры могут помочь понять, какой мониторинг является практичным, осуществимым и значимым.

Информированность о количестве химических веществ, сбрасываемых в водные ресурсы со сточными водами, привела также к повышенному вниманию и изучению преимуществ дополнительной очистки на очистных сооружениях [57]. Дополнительные биологические и технологические методы очистки, такие как активный ил, мембранные биореакторы, реакторы с биопленочным подвижным слоем, природные решения, такие как сконструированные болотные экосистемы также могут быть использованы в применени-

як повторного использования для смягчения рисков [58]. Уместность технологии очистки для конкретного случая повторного использования может быть оценена на основе надежных данных об эффективности удаления. Недавно разработанные критерии актуальности и надежности поддерживают выбор надлежащих технологий [59].

4. Управление

В то время как дефицит воды побуждает применять практику повторного использования воды, значительные вариации в потенциальных опасностях и рисках требуют ответственного повторного использования воды. Это порождает особую проблему в управлении. В качестве меры предосторожности при повторном использовании воды для ирригации можно было бы установить стандартный перечень требований, ориентированных на ожидаемое воздействие через продовольственные культуры. Концентрации в собранном урожае, окружающей среде и биоте могут быть измерены или оценены на основе судьбы и поведения химических веществ и патогенных организмов после сброса с очистных сооружений [60, 61]. Введение соответствующих факторов неопределенности/экстраполяции может привести к относительно умеренным стандартам качества воды, которые необходимо соблюдать, и, поэтому, контролировать. Ожидается, что подходы, основанные на рисках для конкретных мест, где меры по управлению опасностями и рисками по степени приоритетов в каждом конкретном случае, будут более приемлемыми. Это позволяет избежать чрезмерно жестких стандартов качества, которые могут препятствовать разработке схем повторного использования из-за затратной очистки и/или дорогостоящих требований к мониторингу [62]. Однако требование, чтобы каждая система повторного использования проводила свою собственную конкретную оценку всех существенных загрязняющих веществ, их токсичности и неопределенностей, должно привести к тому, что нормативные положения будут очень трудно выполнить и согласовать между системами повторного использования и государствами-членами. Следовательно, этот подход на основе риска требует дополнительных усилий для подготовки руководства о том, как определить минимальный набор требований, важных для конкретных случаев повторного использования воды.

Процесс оценки WRRMP может быть поддержан разработкой базы данных соответствующих уровней опасности и безопасности и инструктивный материал о разработке требований мониторинга. Существующие методы управления риском, базы данных и такие инструменты как AquaNES Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA)¹³ [35] могут быть полезными в этом отношении в этом отношении даже, если они не были специально разработаны для случаев повторного использования воды. Еще одним применимым методом является система для мониторинга на основе риска источников подземной воды для производства питьевой воды, предложенная в рамках программы совместных исследований голландских и фламандских компа-

¹³ Веб-приложение для количественной оценки микробиологического риска для применений повторного использования, разработанное в рамках проекта по Программе ЕС Горизонт 2020.

ний в секторе водоснабжения питьевой воды [52]. Кроме того, EFSA¹⁴ разработало руководство для прогнозирования в окружающей среде препаратов для защиты растений и продуктов их трансформации [63]. Хотя первоначально оно было разработано для оценки воздействия для почвенных организмов, его можно применять также для оценки рисков от повторного использования воды на здоровье человека и окружающую среду.

Разнородность случаев повторного использования воды и необходимость управления риском подчеркивает ценность перспективного и благоприятного режима регулирования [64]. Для отработанного механизма управления крайне важно привлекать заинтересованные стороны и добиваться стандартизации повторного использования воды в обществе. Обеспечение долговременного сотрудничества и привлечения заинтересованных сторон и потребителей является одним из ключевых факторов успеха в разработке схем повторного использования воды [62]. Создание уверенности и завоевание доверия с помощью ранних консультаций позволяет применить подход к конкретной ситуации, когда приходится иметь дело с неопределенностью относительно рисков и их восприятия. Участие заинтересованных сторон поддерживается также авторами работы [65] в их подходе к плану безопасного повторного использования воды. Важным элементом в участии заинтересованных сторон, в особенности общественности, является социальная легитимация повторного использования воды [66]. Использование долговременной интерпретации выгод принятия повторного использования воды и фактическое признание того, что повторное использование является установившейся практикой, может стать поддержкой общественно-го признания [67]. Четкое разъяснение рисков и управления рисками может оказать поддержку общественному признанию путем применения принципов оповещения о рисках [68]. К сожалению, WRRMP в новом регламенте ЕС для непосредственного использования бытовых сточных вод [20] не включает требования привлечения заинтересованных сторон. Это, однако, очень важно, так как этот WRRMP указывает на действия по управления рисками, которые, как правило, находятся вне контроля водоснабжающей организации в установках для повторного использования.

Механизм управления в случаях повторного использования воды должен также учитывать экономические аспекты. Важный фактор, препятствующий развитию системы повторного использования воды, связан с общими затратами на очистку и мониторинг системы повторного использования в целом [15, 62]. Для тех случаев, когда регенерированная вода используется для сельскохозяйственных целей, должны быть также включены существенные затраты, связанные с системой поставки и управления водой, используемой для ирригации [15]. С другой стороны, случаи повторного использования часто недооцениваются, так как ряд (экологических) выгод часто не учитывается. Авторы работы [15] указывают, что также часто не учитываются косвенные непрямые затраты. Затраты, связанные с очисткой сточных вод, несут различные организации (государственные или частные в водном хозяйстве, но не те, кто получают выгоду от наличия регенерированной воды (например, фермеры). Это обычная проблема, характерная для перехода к циркулярной экономике, в которой необходимо новое распределение социальных выгод, которое выходит за пределы традиционного ана-

¹⁴ Европейское агентство по безопасности продуктов питания.

лиза затрат и выгод конкретного случая повторного использования (например, воды). Циркулярная экономика требует систематических изменений во всей цепочке добавленной стоимости для воды, с получением выгод экономического развития от практики повторного использования воды [69, 70].

5. Осуществимость предложенного регламента для конкретного случая повторного использования воды

Практическая осуществимость предложенного регламента была оценена с помощью ключевых задач управления рисками WRRMP для случая просачивающейся ирригации (SSI) (исследовательский проект) с использованием очищенных сточных вод после очистных сооружений (STP) в Хааксберген¹⁵, Нидерланды. В этом случае SSI очищенные сточные воды после STP добавляются в контролируруемую систему водоотвода. Такие системы дают возможность контролировать уровень поверхностных вод и влажность почвы на сельскохозяйственных полях [71]. За счет интенсивной добавки воды контролируемые системы водоотвода становятся инфильтрационными системами, или системами подвального орошения¹⁶ (SSI). Системы SSI могут поставлять очищенные сточные воды после очистных сооружений (STP) для сельскохозяйственных растений, в то время как почва используется в качестве фильтра и буферной зоны [3]. Пилотные исследования в Хааксбергене проводятся с 2015 г. [72].

Предложенный регламент сосредоточен на рисках для качества воды и здоровья человека, а не на потенциальных выгодах или рисках нынешней ситуации (ирригация с использованием поверхностных вод, которые принимают бытовые сточные воды). Так как возможности (выгоды) не рассматриваются, а предложенный анализ риска очень обширный, невозможно найти баланс и реализовать ответственное повторное использование воды с использованием нынешнего предложенного регламента. Были идентифицированы некоторые недостатки. (i) Роли и ответственности различных заинтересованных сторон описаны нечетко. (ii) Хотя необходимо оценить потенциальные риски, хозяйствующий субъект, вероятно, не обладает подробной информацией и полномочиями в отношении инфраструктуры от точки сброса (сточных вод) до точки использования (ирригация). В случае Хааксбергена ирригация проводится с использованием инновационной подповерхностной системы, снижающей риски от непосредственного применения воды на сельскохозяйственных культурах или с помощью аэрозольного орошения¹⁷. Однако предложенный регламент не относится к просачивающейся ирригации, и требуются измерения и (экологический) мониторинг, который может быть менее важным для этого типа ирригации. (iii) В частности, для новых химических веществ и патогенных организмов информация об их появлении в данном конкретном случае отсутствует. Кроме того, их судьба и поведение в почве и сельскохозяйственных культурах, которые бу-

¹⁵ Муниципалитет и город в восточной части Нидерландов, в пров. Оверэйсел, в историко-географическом регионе Твенте.

¹⁶ Метод полива, при котором вода доставляется в корневую зону растений, а избыток может быть собран для повторного использования.

¹⁷ Аэрозольное орошение – мелкодисперсное дождевание, способ увлажнения приземного слоя воздуха, наземной части растений и частично поверхности почвы водой, раздробленной на мельчайшие капли. Применяется только в жаркое время.

дуг потребляться людьми или крупным рогатым скотом, не всегда доступна. Для определения того, необходимы ли дополнительные требования, требуется, чтобы хозяйствующий субъект выполнял оценку риска и сравнивал результаты с допустимыми уровнями риска или качества воды. (iv) Без руководства это будет тщательная попытка контролировать все соответствующие маршруты воздействия, и на практике это находится вне влияния хозяйствующего субъекта, который, тем не менее, несет эту ответственность в соответствии с предложенным регламентом. (v) Отсутствует руководство по адекватной проверке мониторинга, и необходимо оказать поддержку хозяйствующим субъектам и согласовать подтверждение мониторинга.

Оценка предложенного руководства проливает свет на проблемы выполнения руководства по содействию ответственному повторному использованию воды. Предлагается руководство для повестки дня исследований, и необходимо добиться того, чтобы практическое выполнение стало возможным. Используя новые, инновационные методы, можно разработать осуществимые и несложные стратегии мониторинга для анализа качества сточных вод в месте сброса без необходимости проведения мониторинга (недоступного) в местах использования. Вместо инициирования обширного мониторинга на каждом участке использования могут быть разработаны инструменты для принятия решений и базы данных с информацией о судьбе в окружающей среде с целью идентификации того, может ли повторное использование воды привести к возрастающему воздействию на окружающую среду (почву, поверхностные и подземные воды, сельскохозяйственные культуры) на участке ирригации или вблизи него, потенциально приводящему к рискам для экологии или людей. Измерения или моделирование воздействий на конкретном участке на людей, крупный рогатый скот и окружающую среду для сравнения с безопасной концентрацией являются дорогими и сложными. Альтернативно национальная или оценка риска для конкретного речного бассейна может быть в определенной степени основана на национальных концентрациях опасностей в городских сточных водах, эффективности процесса очистки и стандартах качества воды для общественного здравоохранения и окружающей среды [47, 48, 59]. Это можно использовать для определения управляемого набора индикаторов химических веществ из различных классов использования и с разными физико-химическими свойствами. Дополнительные требования к конкретному участку можно получить из подходов на основе риска. База данных с допустимыми уровнями риска или качества воды для различных целей повторного использования и соответствующие превентивные меры должны содействовать выполнению предложенных нормативов. Сельское хозяйство может получить выгоду от очищенных сточных вод как ресурсов пресной воды, а риски могут управляться с помощью мер предосторожности на основе самых важных маршрутов воздействия. В случае необходимости повторное использование может быть ограничено применениями с ограниченным потенциалом риска.

Проводимые в настоящее время исследования и инновации уже дают основу для этих целей с существующими базами данных, новыми методами анализа и инновационными методами очистки. Регламент ЕС о минимальных требованиях для повторного использования воды [19, 20] является частью законодательных рамок, которые разрабатываются в ЕС для поддержки ответственного повторного использования сточных вод для целей ирригации. Другие законодательные рамки, относящиеся к повторному использованию, были разработаны в разных странах мира (табл. 1), дающие возможность проводить международный обмен знаниями и опытом. Новые загрязняющие вещества и

новые технологии очистки будут продолжать появляться. Комплексная повестка дня исследований в области повторного использования воды будет поддерживать эффективное приобретение необходимых знаний и внедрение новшеств в необходимом направлении. Должны быть разработаны необходимые удобные в применении инструменты вместе с конечными пользователями, которые объединяют в себе эти знания и дадут возможность заинтересованным сторонам применять это также и в ненаучной среде.

Таблица 1

Обзор существующих и разрабатываемых законодательных рамок для повторного использования воды для промышленности, сельского хозяйства или питьевой воды

Руководства ISO 20426 ¹⁸ , 20468 ¹⁹ , 20469 ²⁰ (2018)
Руководства ВОЗ для безопасного использования сточных вод, испражнений и “серой воды” ²¹ (2006 г., продолжается пересмотр)
Руководство ВОЗ о повторном использовании питьевой воды (2017 г.)
Руководства ЭПА США о повторном использовании воды (2012 г.)
Штат Колорадо вводит повторное использование воды в законодательную базу (но этого нет в других штатах и федеральных правилах)
Федеральное правило США в рамках Закона об усовершенствовании продовольственной безопасности (2017 г.) (применимое для ирригации сельскохозяйственных культур в странах Латинской Америки)
Австралийские руководства по рециклингу воды (очистке и повторному использованию сточных вод) (2006 г.)
Национальные правила Омана для повторного использования воды
Национальные стандарты государств-членов ЕС (например, декрет короля Испании 1620/2007)
Минимальные требования ЕС для повторного использования воды в сельском хозяйстве (законодательство на стадии консультаций)
Объединенные Арабские Эмираты разрабатывают законодательные рамки для повторного использования воды (проводится технико-экономическое обоснование)
Саудовская Аравия проводит реструктуризацию организаций в секторе водоснабжения и министерств для прояснения ответственностей

6. Заключение

Повторное использование сточных вод все чаще рассматривается как возможность удовлетворения потребностей в пресной воде. Это означает смену парадигмы от “безопасной очистки и сброса сточных вод” к “трансформации использованных вод в пригодную для использования воду”.

¹⁸ Руководящие указания по оценке и управлению риском, связанным с повторным использованием не питьевой воды.

¹⁹ Руководящие указания для оценки эффективности технологий очистки для систем повторного использования воды.

²⁰ Руководящие указания для классификации качества повторно используемой воды.

²¹ “Серая вода” – бытовые сточные воды, исключая воду из туалета и кухни (входят вода из душа, ванны, и вода из-под крана в ванной и стиральной машины).

Необходимо обратиться к следующим вопросам. В какой степени давление на источники пресной воды снижется за счет использования очищенных сточных вод? Какие риски, относящиеся к наличию патогенных организмов и химических веществ, являются важными в этом конкретном случае, и как это воздействует на выбор подходящих технологий очистки воды? Какое соответствующее законодательство должно быть выполнено? Какие органы и заинтересованные стороны несут ответственность за каждый элемент программы повторного использования, и все ли они участвуют в достаточной степени?

Минимальные требования к микробиологическим и химическим опасностям в предложенном регламенте ЕС не в достаточной степени охватывают соответствующие риски для защиты здоровья человека и окружающей среды. План управления риском для повторного использования воды в предложенном регламенте является междисциплинарной и исчерпывающей задачей, а предложенный подход практически не осуществим, поскольку он очень сложный и предложенные ответственности и влияние хозяйствующего субъекта являются не соответствующими. Для поддержки ответственного повторного использования воды, оценки случаев повторного использования воды требуются экспертные знания как в отношении выгод, так и рисков в отношении доступности воды, качества, так и управления. Базы данных (об опасностях, рисках, исходных воздействиях и превентивных мерах) необходимы для последовательного и эффективного развития научных, экспертных и практических знаний. Необходимы руководящие материалы и инструменты для принятия решений с целью распространения экспертных знаний и поддержки лиц, принимающих решения, и заинтересованных сторон за ответственное повторное использование воды, т.е. сделать так, чтобы экспертные задания были доступны для специалистов по управлению рисками и заинтересованных сторон.

Библиография

1. European Commission (EC). Water Reuse. 2018. Available online: <http://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm> (accessed on 9 March 2020).
2. Water Research Europe (WRE). Water Reuse Europe Review. 2018. Available online: https://www.waterreuse-europe.org/wp-content/uploads/2018/08/wre_review2018_final.pdf (accessed on 9 March 2020).
3. Narain, D.M.; Bartholomeus, R.P.; Dekker, S.C.; Van Wezel, A.P. Natural purification through soils: Risks and opportunities of sewage effluent reuse in sub-surface irrigation. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* **2020**, in press.
4. Hamilton, A.J.; Stagnitti, F.; Xiong, X.; Kreidl, S.L.; Benke, K.K.; Maher, P. Wastewater irrigation: The state of play. *Vadose Zone J.* **2007**, *6*, 823–840. [CrossRef]
5. Deng, S.; Yan, X.; Zhu, Q.; Liao, C. The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne contaminants. *Environ. Pollut.* **2019**, *254*, 113020. [CrossRef]
6. Akpor, O.; Otohinoiyi, D.; Olaolu, D.; Aderiye, B. Pollutants in wastewater effluents: Impacts and remediation processes. *Int. J. Environ. Res. Earth Sci.* **2014**, *3*, 50–59.
7. Moazeni, M.; Nikaeen, M.; Hadi, M.; Moghim, S.; Mouhebat, L.; Hatamzadeh, M.; Hassanzadeh, A. Estimation of health risks caused by exposure to enteroviruses from agricultural application of wastewater effluents. *Water Res.* **2017**, *125*, 104–113. [CrossRef]

8. Hoogenboezem, W.; Ketelaars, H.; Medema, G.; Rijs, G.; Schijven, J. Cryptosporidium en Giardia: Voorkomen in Riolwater, Mest en Oppervlaktewater Met Zwem-En Drinkwaterfunctie. RIWA/RIVM/KIWA Report. Available online: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/cryptosporidium-en-giardia-voorkomen-inrioolwater-mest-en-opper> (accessed on 16 April 2020).
9. Sharma, M.; Handy, E.T.; East, C.L.; Kim, S.; Jiang, C.; Callahan, M.T.; Alard, S.M.; Micallef, S.; Craighead, S.; Anderson-Coughlin, B.; et al. Prevalence of Salmonella and Listeria monocytogenes in non-traditional irrigation waters in the Mid-Atlantic United States is affected by water type, season, and recovery method. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0229365. [CrossRef]
10. Panthi, S.; Sapkota, A.R.; Raspanti, G.; Allard, S.M.; Bui, A.; Craddock, H.A.; Murray, R.; Zhu, L.; East, C.; Handy, E.; et al. Pharmaceuticals, herbicides, and disinfectants in agricultural water sources. *Environ. Res.* **2019**, *174*, 1–8. [CrossRef]
11. Van Houtte, E.; Verbauwhede, J. Long-time membrane experience at Torreele's water re-use facility in Belgium. *Desalin. Water Treat.* **2013**, *51*, 4253–4262. [CrossRef]
12. Pintilie, L.; Torres, C.M.; Teodosiu, C.; Castells, F. Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study. *J. Clean. Prod.* **2016**, *139*, 1–14. [CrossRef]
13. Ternes, T.A.; Bonerz, M.; Herrmann, N.; Teiser, B.; Andersen, H.R. Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances. *Chemosphere* **2007**, *66*, 894–904. [CrossRef]
14. Devaux, I.; Gerbaud, L.; Planchon, C.; Bontoux, J.; Glanddier, P.Y. Infectious risk associated with wastewater reuse: An epidemiological approach applied to the case of Clermont-Ferrand, France. *Water Sci. Technol.* **2001**, *43*, 53–60. [CrossRef] [PubMed]
15. Giannoccaro, G.; Arborea, S.; de Gennaro, B.C.; Iacobellis, V.; Piccinni, A.F. Assessing reclaimed urban wastewater for reuse in agriculture: Technical and economic concerns for Mediterranean Regions. *Water* **2019**, *11*, 1511. [CrossRef]
16. Bartholomeus, R.P.; Huijgevoort, M.H.J.; van Loon, A.H.; van den Eertwegh, G.A.P.H.; Raat, K.J. Matching agricultural freshwater supply and demand – using recycled water for subirrigation purposes. In Proceedings of the 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany, 16–20 June 2019.
17. Zuurbier, K.G.; Smeets, P.W.M.H.; Roest, K.; van Vierssen, W. Use of Wastewater in Managed Aquifer Recharge for Agricultural and Drinking Purposes: The Dutch Experience. In *Safe Use of Wastewater in Agriculture*; Hettiarachchi, H., Ardakanian, R., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2018.
18. European Commission (EC). A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources. 2012. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673> (accessed on 16 April 2020).
19. Alcalde-Sanz, L.; Gawlik, B.M. *Minimum Quality Requirements for Water Reuse in Agricultural Irrigation and Aquifer Recharge—Towards a Legal Instrument on Water Reuse at EU Level*; EUR 28962 EN, Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2017.
20. European Commission (EC). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Minimum Requirements for Water Reuse. 2018. Available online: https://ec.europa.eu/environment/water/pdf/water_reuse_regulation.pdf (accessed on 9 March 2020).
21. European Council. Water Reuse for Agricultural Irrigation: Council Adopts New Rules. Available online: <https://www.consilium.europa.eu/en/>

[press/press-releases/2020/04/07/water-reuse-for-agriculturalirrigation-council-adopts-new-rules](#) (accessed on 16 April 2020).

22. Rizzo, L.; Krätke, R.; Linders, J.; Scott, M.; Vighi, M.; de Voogt, P. Proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge: SCHEER scientific advice. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* **2018**, *2*, 7–11. [CrossRef]

23. Dingemans, M.M.L.; Bartholomeus, R.P.; Medema, G.J. Evaluation of the Proposed EU Regulation on Minimum Requirements for Water Reuse for Irrigation. KWR Report. 2018. Available online: <https://library.kwrwater.nl/publication/56467244/> (accessed on 9 March 2020).

24. Drewes, J.E.; Hübner, U.; Zhiteneva, V.; Karakurt, S. *Characterization of Unplanned Water Reuse in the EU*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2017.

25. Siebert, S.; Burke, J.; Faures, J.M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Döll, P.; Portmann, F.T. Groundwater use for irrigation—A global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2010**, *14*, 1863–1880. [CrossRef]

26. Beard, J.E.; Bierkens, M.F.P.; Bartholomeus, R.P. Following the Water: Characterising de facto Wastewater Reuse in Agriculture in the Netherlands. *Sustainability* **2019**, *11*, 5936. [CrossRef]

27. Thebo, A.L.; Drechsel, P.; Lambin, E.; Nelson, K. A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 074008. [CrossRef]

28. Spinoni, J.; Naumann, G.; Vogt, J.V. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Glob. Planet Chang.* **2017**, *148*, 113–130. [CrossRef]

29. Sprenger, C.; Hartog, N.; Hernández, M.; Vilanova, E.; Grützmacher, G.; Scheibler, F.; Hannappel, S. Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: Historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeol. J.* **2017**, *25*, 1909. [CrossRef]

30. Hamann, E.; Stuyfzand, P.J.; Greskowiak, J.; Timmer, H.; Massmann, G. The fate of organic micropollutants during long-term/long-distance river bank filtration. *Sci. Total Environ.* **2016**, *545*, 629–640. [CrossRef] [PubMed]

31. Nham, H.T.; Greskowiak, J.; Nödler, K.; Rahman, M.A.; Spachos, T.; Rusteberg, B.; Massmann, G.; Sauter, M.; Licha, T. Modeling the transport behavior of 16 emerging organic contaminants during soil aquifer treatment. *Sci. Total Environ.* **2015**, *514*, 450–458. [CrossRef] [PubMed]

32. World Health Organization (WHO). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006. Available online: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gsuweg4/ (accessed on 9 March 2020).

33. Metcalf, L.; Harrison, P.E.; Tchobanoglous, G. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2004; Volume 4.

34. Van Wezel, A.P.; Ter Laak, T.L.; Fischer, A.; Bäuerlein, P.S.; Munthe, J.; Posthuma, L. Mitigation options for chemicals of emerging concern in surface waters; operationalising solutions-focused risk assessment. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* **2017**, *3*, 403–414. [CrossRef]

35. Smeets, P.W.M.H.; Linden, K.; Miehe, U. Rolling literature review on pathogen reduction by water treatment processes. In Proceedings of the 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany, 16–20 June 2019.

36. Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, Australian Health Ministers' Conference (NRMMC-

EPHC-AHMC). Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks: Phase 1. National Water Quality Management Strategy. 2006. Available online: <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water/managing-health-and-environmental-risks-phase-1> (accessed on 9 March 2020).

37. Toze, S. PCR and the detection of microbial pathogens in water and wastewater. *Water Res.* **1999**, *33*, 3545–3556. [CrossRef]

38. Hijnen, W.A.M.; Medema, G.J. *Elimination of Micro-Organisms by Water Treatment Processes*; IWA Publishing: London, UK, 2010.

39. Caicedo, C.; Rosenwinkel, K.H.; Exner, M.; Verstraete, W.; Suchenwirth, R.; Hartemann, P.; Nogueira, R. Legionella occurrence in municipal and industrial wastewater treatment plants and risks of reclaimed wastewater reuse: Review. *Water Res.* **2019**, *149*, 21–34. [CrossRef] [PubMed]

40. Garrison, L.E.; Kunz, J.M.; Cooley, L.A.; Moore, M.R.; Lucas, C.; Schrag, S.; Sarisky, J.; Whitney, C.G. Vital Signs: Deficiencies in Environmental Control Identified in Outbreaks of Legionnaires' Disease—North America, 2000–2014. *Morb. Mortal. Wkly. Rep.* **2016**, *65*, 576–584. [CrossRef]

41. Van Heijnsbergen, E.; Schalk, J.A.; Euser, S.M.; Brandsema, P.S.; den Boer, J.W.; de Roda Husman, A.M. Confirmed and Potential Sources of Legionella Reviewed. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 4797–4815. [CrossRef]

42. Petzold, M.; Prior, K.; Moran-Gilad, J.; Harmsen, D.; Lück, C. Epidemiological information is key when interpreting whole genome sequence data - lessons learned from a large Legionella pneumophila outbreak in Warstein, Germany, 2013. *EuroSurveill* **2017**, *22*. [CrossRef]

43. Van der Kooij, D.; van der Wielen, P.W.J.J. *Microbial Growth in Drinking Water Supplies*; IWA Publishing: London, UK, 2013.

44. Berendonk, T.U.; Manaia, C.M.; Merlin, C.; Fatta-Kassinos, D.; Cytryn, E.; Walsh, F.; Bürgmann, H.; Sorum, H.; Norström, M.; Pons, M.N.; et al. Tackling antibiotic resistance: The environmental framework. *Nat. Rev. Microbiol.* **2015**, *13*, 310–317. [CrossRef]

45. Anderson, M.; Clift, C.; Schulze, K.; Sagan, A.; Nahrgang, S.; Ait Ouakrim, D.; Mossialos, E. *Averting the AMR crisis: What are the Avenues for Policy Action for Countries in Europe*; Policy Brief, No. 32; European Observatory on Health Systems and Policies: Copenhagen, Denmark, 2019.

46. Christou, A.; Agüera, A.; Bayona, J.M.; Cytryn, E.; Fotopoulos, V.; Lambropoulou, D.; Manaia, C.M.; Michael, C.; Revitt, M.; Schröder, P.; et al. The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes—A review. *Water Res.* **2017**, *123*, 448–467. [CrossRef]

47. Baken, K.A.; Sjerps, R.M.A.; Schriks, M.; van Wezel, A.P. Toxicological risk assessment and prioritization of drinking water relevant contaminants of emerging concern. *Environ. Int.* **2018**, *118*, 293–303. [CrossRef]

48. Coppens, L.J.C.; Van Gils, J.; Ter Laak, T.; Raterman, B.; van Wezel, A.P. Towards spatially smart abatement of human pharmaceuticals in surface waters: Defining impact of sewage treatment plants on susceptible functions. *Water Res.* **2015**, *87*, 356–365. [CrossRef]

49. Gibson, R.; Durán-Alvarez, J.C.; Estrada, K.L.; Chávez, A.; Jiménez Cisneros, B. Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico. *Chemosphere* **2010**, *81*, 1437–1445. [CrossRef] [PubMed]

50. Xu, J.; Wu, L.; Chang, A.C.; Zhang, Y. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *183*, 780–786. [CrossRef] [PubMed]

51. Jalali, M.; Merikhpour, H.; Kaledhonkar, M.J.; Van Der Zee, S.E.A.T.M. Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils. *Agric. Water Manag.* **2008**, *95*, 143–153. [CrossRef]

52. Sjerps, R.M.A.; Brunner, A.M.; Fujita, Y.; Bajema, B.; de Jonge, M.; Bäuerlein, P.S.; de Munk, J.; Schriks, M. Clustering and Prioritisation to Design a Risk Based Monitoring Program in Groundwater Sources for Drinking Water. KWR Report. 2018. Available online: <https://library.kwrwater.nl/publication/56103342/> (accessed on 9 March 2020).

53. European Commission (EC). Drinking Water Directive in the Directory of European Union consolidated Legislation. 2015. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/83/2015-10-27> (accessed on 9 March 2020).

54. Brunner, A.M.; Dingemans, M.M.; Baken, K.A.; van Wezel, A.P. Prioritizing anthropogenic chemicals in drinking water and sources through combined use of mass spectrometry and ToxCast toxicity data. *J. Hazard. Mater.* **2019**, *364*, 332–338. [CrossRef] [PubMed]

55. Brack, W.; Ait Aissa, S.; Backhaus, T.; Dulio, V.; Escher, B.I.; Faust, M.; Hilscherova, K.; Hollender, J.; Hollert, H.; Müller, C.; et al. Effect-based methods are key. The European Collaborative Project SOLUTIONS recommends integrating effect-based methods for diagnosis and monitoring of water quality. *Environ. Sci. Eur.* **2019**, *31*, 10. [CrossRef]

56. Dingemans, M.M.L.; Baken, K.A.; van der Oost, R.; Schriks, M.; van Wezel, A.P. Risk-based approach in the revised European Union drinking water legislation: Opportunities for bioanalytical tools. *Integr. Environ. Assess. Manag.* **2019**, *15*, 126–134. [CrossRef]

57. Guillosoy, R.; Le Roux, J.; Mailler, R.; Vulliet, E.; Morlay, C.; Nauleau, F.; Gasperi, J.; Rocher, V. Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere* **2019**, *218*, 1050–1060. [CrossRef]

58. Krzeminski, P.; Tomei, M.C.; Karaolia, P.; Langenhoff, A.; Almeida, C.M.R.; Felis, E.; Gritten, F.; Andersen, H.R.; Fernandes, T.; Manaia, C.M.; et al. Performance of secondary wastewater treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern implicated in crop uptake and antibiotic resistance spread: A review. *Sci. Total Environ.* **2019**, *648*, 1052–1081. [CrossRef]

59. Fischer, A.; van Wezel, A.P.; Hollender, J.; Cornelissen, E.; Hofman, R.; van der Hoek, J.P. Development and application of relevance and reliability criteria for water treatment removal efficiencies of chemicals of emerging concern. *Water Res.* **2019**, *161*, 274–287. [CrossRef]

60. Ghisi, R.; Vamerali, T.; Manzetti, S. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environ. Res.* **2019**, *169*, 326–341. [CrossRef]

61. Voulvoulis, N.; Barceló, D.; Verlicchi, P. Pharmaceutical residues in sewage treatment works and their fate in the receiving environment. *Issues Environ. Sci. Technol.* **2016**, *41*, 120–179.

62. Frijns, J.; Smith, H.M.; Brouwer, S.; Garnett, K.; Elelman, R.; Jeffrey, P. How governance regimes shape the implementation of water reuse schemes. *Water* **2016**, *8*, 605. [CrossRef]

63. European Food Safety Agency (EFSA). EFSA Guidance Document for Predicting Environmental Concentrations of Active Substances of Plant Protec-

tion Products and Transformation Products of These Active Substances in Soil. 2017. Available online: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/j.efsa.2017.4982> (accessed on 9 March 2020).

64. Jeffrey, P.; Fawell, J.; Le Corre, K.; Frijns, J. Applying Regulation to Water Reuse: The Case of the EU. 2017. Available online: <http://www.globalwaterforum.org/2017/11/19/applying-regulation-to-water-reuse-the-case-of-the-eu/> (accessed on 9 March 2020).

65. Goodwin, D.; Raffin, M.; Jeffrey, P.; Smith, H.M. Applying the water safety plan to water reuse: Towards a conceptual risk management framework. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* **2015**, *1*, 709–722. [CrossRef]

66. Binz, C.; Harris-Lovett, S.; Kiparsky, M.; Sedlak, D.L.; Truffer, B. The thorny road to technology legitimation—Institutional work for potable water reuse in California. *Technol. Forecast Soc. Chang.* **2016**, *103*, 249–263. [CrossRef]

67. Smith, H.M.; Brouwer, S.; Jeffrey, P.; Frijns, J. Public responses to water reuse—Understanding the evidence. *J. Environ. Manag.* **2018**, *207*, 43–50. [CrossRef] [PubMed]

68. Jansen, T.; Claassen, L.; van Kamp, I.; Timmermans, D.R.M. 'All chemical substances are harmful.' public appraisal of uncertain risks of food additives and contaminants. *Food Chem. Toxicol.* **2020**, *136*, 110959. [CrossRef]

69. Tahir, S.; Steichen, T.; Shouler, M. Water and Circular Economy: A White Paper. Ellen MacArthur Foundation, Arup, Antea Group. 2018. Available online: https://nextgenwater.eu/wp-content/uploads/2018/10/Water_and_circular_economy-Co.Project_White_paper.pdf (accessed on 14 April 2020).

70. Šmol, M.; Adam, C.; Preisner, M. Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2020**, *22*, 682–697. [CrossRef]

71. Ayars, J.E.; Christen, E.W.; Hornbuckle, J.W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agric. Water Manag.* **2006**, *86*, 128–139. [CrossRef]

72. Bartholomeus, R.P.; Worm, B.; Oosterhuis, M.; Eertwegh, G.A.P.H.; Raat, K. Reuse of treated wastewater in agriculture? *H2O Water Matters* **2016**, *1*, 1–6.