

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ»

Виконав: студент групи ТЗД-216 (з/ф)
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» червня 2025 р. Фляжніков І. А.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ЕХТЗД

«10» червня 2025 р. Кватернюк С. М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: к.х.н., доцент кафедри ЕХТЗД

«10» червня 2025 р. Тітов Т.С.
(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доц. Іщенко В.А.
(прізвище та ініціали)

«10» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік.

Вінницький національний технічний університет

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Спеціальність 183 – «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітньо-професійна програма – Інженерна екологія та ресурсозберігаючі технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доцент

В.А. Іщенко
(підпис)
« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студенту

Фляжніков Ілля Артемович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ»

керівник роботи Кватернюк Сергій Михайлович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи

Типові ризики повеней.

4. Зміст текстової частини

1. Аналіз забезпечення екологічної безпеки впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія,
2. Аналіз інноваційних рішень для забезпечення екологічної безпеки в умовах повеней у Північному Рейні-Вестфалії;
3. Природоохоронні рішення для забезпечення екологічної безпеки впливу повеней.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Долина Ару до та під час катастрофічної повені.
2. Карти басейну Рейну: орієнтовні рівні безпеки та потенційно затоплена територія внаслідок річкових затоплення.
3. Потенціал пошкодження і ризик повені.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 25 » березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітки
		початок	закінчення	
1	Аналіз забезпечення екологічної безпеки впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія.	25.03.2025	27.04.2025	Викон
3	Аналіз інноваційних рішень для забезпечення екологічної безпеки в умовах повеней у Північному Рейні-Вестфалії.	27.04.2025	12.05.2025	Викон
4	Природоохоронні рішення для забезпечення екологічної безпеки впливу повеней.	12.05.2025	26.05.2025	Викон
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.05.2025	05.06.2025	Викон
6	Підготовка презентації та доповіді на захист БКР	05.06.2025	10.06.2025	Викон

Студент
(підпис)

Фляжніков І. А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи
(підпис)

Кватернюк С. М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота складається 80 сторінок формату А4, на яких є 10 рисунків, 7 таблиці, список використаних джерел містить 18 найменувань.

Метою роботи є комплексний аналіз та оцінка системи забезпечення екологічної безпеки від впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена комплексному аналізу системи забезпечення екологічної безпеки від впливу повеней у густонаселеному та промислово розвиненому регіоні Північний Рейн-Вестфалія (Німеччина). В умовах зміни клімату, що посилює частоту та інтенсивність екстремальних погодних явищ, традиційні інженерні методи захисту виявляються недостатніми. У дослідженні аналізується типологія ризиків, зокрема відмінності між повенями на великих річках та раптовими паводками. Детально розглядаються ключові екологічні наслідки, такі як забруднення водних ресурсів, ерозія ґрунтів, втрата біорізноманіття та руйнування критичної інфраструктури. Робота оцінює багатогранні стратегії, що впроваджуються у регіоні — від законодавчих рамок та інженерних споруд до природоорієнтованих рішень та заходів з адаптації. .

Ключові слова: екологічна безпека, управління ризиками повеней, зміна клімату, екологічні наслідки, забруднення води, ерозія ґрунту, природоорієнтовані рішення, системи раннього попередження.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 80 pages of A4 format, on which there are 10 figures, 7 tables, the list of used sources contains 18 names.

The method of work is a comprehensive analysis and assessment of the system of ensuring environmental safety from the impact of floods in the North Rhine-Westphalia region.

Bachelor's qualification thesis, dedicated to a comprehensive analysis of the system of ensuring environmental safety from the impact of floods in the densely populated and industrially developed region of North Rhine-Westphalia (Germany). In the conditions of climate change, which increases the frequency and intensity of extreme weather events, traditional engineering protection methods are insufficient. The study analyzes the typology of risks, in particular the differences between floods on large rivers and flash floods. Key environmental impacts, such as water pollution, erosion of foundations, loss of biodiversity and destruction of critical infrastructure, are considered in detail. The work evaluates multifaceted strategies implemented in the regions - from legislative frameworks and engineering structures to nature-based solutions and adaptation measures. .

Keywords: environmental security, flood risk management, climate change, environmental impacts, water pollution, erosion of the foundation, nature-based solutions, early warning systems.

ВІДГУК

**наукового керівника на бакалаврську кваліфікаційну роботу
студента заочної форми навчання групи ТЗД-216 (з/ф) Фляжнікова
Іллі Артемовича “ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ
ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ”**

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена надзвичайно актуальній та гострій проблемі — аналізу та оцінці системи екологічної безпеки в умовах зростання ризиків повеней, зумовлених зміною клімату. Вибір регіону дослідження, Північного Рейну-Вестфалії, є цілком обґрунтованим, адже досвід цієї густонаселеної та промислово розвиненої землі Німеччини, яка зіткнулася з катастрофічними наслідками повені 2021 року, становить значний науковий і практичний інтерес.

У процесі роботи над дослідженням студент продемонстрував високий рівень самостійності, здатність до критичного мислення та вміння працювати з різноманітними джерелами інформації, зокрема з нормативно-правовими актами, науковими звітами та статистичними даними.

Робота має чітку та логічну структуру. Особливої уваги заслуговує комплексний розгляд екологічних наслідків повеней. Автор не обмежується загальними твердженнями, а детально аналізує вплив на якість води, стан ґрунтів, біорізноманіття та критичну інфраструктуру, підкріплюючи свої висновки конкретними даними та прикладами з повені 2021 року. Важливим є аналітичний висновок про наявність критичного зворотного зв'язку, де антропогенна діяльність посилює руйнівну силу природних явищ.

Фляжніков І. А. вчасно і повністю виконав всі поставлені завдання, характеризується виключно з позитивного боку. В цілому бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має значну практичну цінність. Тому рекомендую оцінити роботу на оцінку «А».

Керівник роботи,

д-р, проф., професор каф. ЕХТЗД

kv

Сергій КВАТЕРНЮК

РЕЦЕНЗІЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента заочної форми навчання 4 курсу із спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища
Фляжнікова Іллі Артемовича на тему: «ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ».

Рецензована бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню комплексної системи управління ризиками повеней та забезпечення екологічної безпеки в німецькому регіоні Північний Рейн-Вестфалія (ПРВ). Робота справляє враження цілісного, логічно побудованого та самостійного наукового дослідження. Актуальність обраної теми не викликає жодних сумнівів. На тлі глобальних кліматичних змін, що перетворюють екстремальні погодні явища на нову норму, аналіз передових світових практик із протидії повеням є вкрай важливим. Досвід Північного Рейну-Вестфалії, що поєднує інженерні, природоорієнтовані та законодавчі підходи, є цінним джерелом знань для вдосконалення подібних систем в інших країнах, зокрема і в Україні. Трагічні події липня 2021 року, детально згадані у роботі, лише підкреслюють нагальну потребу в переході від суто технічного захисту до інтегрованих стратегій екологічної безпеки. У вступі автор чітко обґрунтовує вибір теми, її актуальність, визначає мету та завдання, об'єкт і предмет дослідження, що свідчить про сформованість у студента навичок наукової роботи. Перший розділ роботи демонструє глибоке опрацювання теоретичної та фактичної бази. Автор не лише описує проблему, а й проводить її глибокий аналіз. Важливою перевагою є представлена типологія ризиків повеней, де чітко розмежовано повільно-прогресуючі паводки на великих річках та раптові зливові повені, що вимагають кардинально різних підходів до управління. Особливо варто відзначити детальний аналіз багатогранних екологічних наслідків повеней. Автор грамотно розкриває проблеми забруднення води, ерозії ґрунтів, втрати біорізноманіття та руйнування інфраструктури, спираючись на конкретні дані та приклади. Аналіз стратегій та заходів, що вживаються в ПРВ, є комплексним і охоплює всі рівні: від директив ЄС до індивідуальних заходів самозахисту громадян..

У бакалаврській роботі можна відзначити такий недолік: у роботі детально проаналізовано досвід лише одного регіону, для посилення наукової новизни та обґрунтованості висновків доцільно було б додати елементи порівняльного аналізу, наприклад, коротко зіставити підходи ПРВ зі стратегіями іншого регіону, що потерпає від повеней (наприклад, Баварії в Німеччині або регіонів у Нідерландах).

Робота має практичне значення, виконана на належному науково-методичному рівні і заслуговує позитивної оцінки.

Рецензент



к.х.н., доц. кафедри ЕХТЗД

Тарас ТІТОВ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ	6
1.1 Аналіз ризиків повеней та екологічної безпеки у Північному Рейні-Вестфалії	6
1.2 Типологія ризиків повеней у Північному Рейні-Вестфалії	7
1.3 Екологічні наслідки повеней	10
1.4 Посилення ризиків повеней та необхідність адаптації до зміни клімату	14
1.5 Стратегії та заходи екологічної безпеки від повеней у ПРВ	16
1.6 Ефективність, прогалини та виклики у захисті від повеней у ПРВ	22
2 АНАЛІЗ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ПОВЕНЕЙ У ПІВНІЧНОМУ РЕЙНІ-ВЕСТФАЛІЇ	28
2.1 Сучасна система управління повенями у Північному Рейні-Вестфалії	28
2.2 Існуючі стратегії, законодавство та технічні рішення	30
2.3 Ефективність заходів, прогалини та виклики	32
2.4 Пропоновані стартап-ідеї для екологічної безпеки в умовах повеней ...	33
3 ПРИРОДООХОРОННІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ	48
3.1 Екологічна безпека та управління повенями у Північному Рейн-Вестфалії	48
3.2 Важливість інтегрованих природоохоронних рішень для екологічної безпеки	49
3.3 Типові ризики повеней та їх екологічний вплив	50
3.4 Законодавча база та існуючі стратегії захисту від повеней у ЄС	53
3.5 Інженерні та технічні рішення для забезпечення екологічної безпеки ..	56
3.6 Природоохоронні рішення та приклади їх розрахунку	58
3.7 Зелені дахи та проникні поверхні	62

3.8 Управління ґрунтами та сталі сільськогосподарські практики	64
3.9 Відновлення водно-болотних угідь та концепція "міста-губки"	66
3.10 Приклад оцінки ефективності видалення забруднюючих речовин	67
3.11 Комплексна оцінка ефективності та виклики впровадження рішень ...	68
3.12 Прогалини в існуючих заходах та системі попередження	68
3.13 Вплив зміни клімату на ризики повеней та стратегії адаптації	69
3.14 Рекомендації та перспективи для екологічної безпеки NRW	70
3.15 Необхідність сталого фінансування та міжвідомчої співпраці	71
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТОК А. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	76
ДОДАТОК Б	77
ДОДАТОК В	78

ВСТУП

Зміна клімату перетворює екстремальні погодні явища на нову реальність, що ставить під загрозу густонаселені та промислово розвинені регіони. Північний Рейн-Вестфалія (ПРВ), як одна з ключових федеральних земель Німеччини, зіткнулася з безпрецедентними викликами, пов'язаними зі збільшенням частоти та інтенсивності повеней. Катастрофічна повінь у липні 2021 року, що завдала регіону збитків на мільярди євро та призвела до людських жертв, стала трагічним підтвердженням нагальної необхідності перегляду та посилення існуючих стратегій захисту.

Актуальність цієї роботи полягає в тому, що традиційні підходи до управління повенями, орієнтовані переважно на інженерний захист, виявляються недостатніми для протидії комплексним екологічним наслідкам. Забруднення водних ресурсів, ерозія ґрунтів, втрата біорізноманіття та руйнування критичної інфраструктури вимагають інтегрованого підходу, що ставить у центр уваги саме екологічну безпеку. Аналіз досвіду ПРВ, регіону, що активно впроваджує багатогранні стратегії — від законодавчих рамок до природоорієнтованих рішень — є надзвичайно цінним для розробки стійких моделей управління ризиками в умовах глобальних кліматичних змін.

Метою даної роботи є комплексний аналіз та оцінка системи забезпечення екологічної безпеки від впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Аналіз забезпечення екологічної безпеки впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія;
- Аналіз інноваційних рішень для забезпечення екологічної безпеки в умовах повеней у Північному Рейні-Вестфалії;
- Природоохоронні рішення для забезпечення екологічної безпеки впливу повеней.

Об'єкт дослідження — система управління ризиками повеней та забезпечення екологічної безпеки в Північному Рейні-Вестфалії.

Предмет дослідження – заходи, стратегії та практики, спрямовані на попередження, пом'якшення та ліквідацію екологічних наслідків повеней у зазначеному регіоні.

Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплекс загальнонаукових методів: аналіз та синтез для вивчення теоретичних основ та узагальнення даних; системний підхід для розгляду заходів екологічної безпеки як єдиного комплексу; порівняльний аналіз для оцінки різних типів повеней та стратегій; узагальнення для формулювання висновків на основі вивчення нормативно-правових документів, наукових звітів та статистичних даних.

1 АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ

1.1 Аналіз ризиків повеней та екологічної безпеки у Північному Рейні-Вестфалії

Дослідження надає всебічний аналіз забезпечення екологічної безпеки під час повеней у Північному Рейні-Вестфалії (ПРВ). У ньому розглядаються різноманітні ризики повеней, підкреслюється їхнє посилення внаслідок зміни клімату та детально описуються екологічні наслідки, включаючи забруднення води, ерозію ґрунту, вплив на біорізноманіття та інфраструктуру. У звіті представлено багатогранний підхід ПРВ до екологічної безпеки від повеней, що охоплює законодавчі, інженерні, природоорієнтовані та неструктурні заходи. Визначаються ключові прогалини та виклики, такі як залишкові ризики, недоліки у комунікації та необхідність посилення інтегрованого планування. Звіт завершується рекомендаціями щодо зміцнення стійкості до повеней та екологічної безпеки в регіоні.

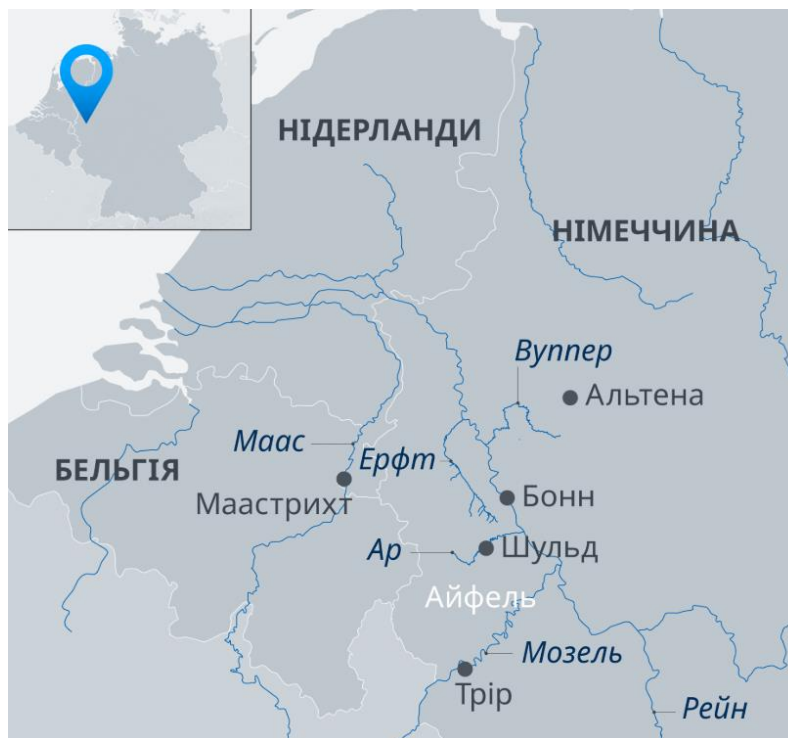


Рисунок 1.1 – Регіони в Німеччині та Бельгії, що постраждали від катастрофічної повені

Північний Рейн-Вестфалія (ПРВ) є високоурбанізованою та густонаселеною федеральною землею Німеччини, що характеризується значними річковими системами, такими як Рейн, Рур, Вуппер, Ерфт та численними меншими водотоками. Її різноманітний ландшафт, що варіюється від низин до гірських регіонів, суттєво впливає на динаміку паводкових подій. Природне прагнення людей селитися поблизу водойм призвело до інтенсивного розвитку в зонах, схильних до повеней, що збільшує загальну вразливість регіону до наслідків повеней [1].

Екологічна безпека, у контексті цього звіту, визначається як комплексний захист та підвищення стійкості природних екосистем — включаючи водойми, ґрунти та біорізноманіття — а також життєво важливої антропогенної інфраструктури від згубних наслідків повеней. Метою є забезпечення безперервної функціональності, здоров'я та цілісності цих систем. Загальна мета стратегій управління повенями полягає у зменшенні ризиків для здоров'я людей, захисті довкілля, збереженні культурних цінностей та економічних благ від збитків, пов'язаних з повенями [1].

Дослідження має на меті надати детальний аналіз поточних заходів щодо екологічної безпеки від повеней у ПРВ. Він критично оцінить існуючі заходи, виявить постійні виклики та прогалини в їхній реалізації, а також запропонує стратегічні рекомендації для підвищення стійкості регіону до повеней та екологічної безпеки в умовах мінливого клімату.

1.2 Типологія ризиків повеней у Північному Рейні-Вестфалії

Повені у Північному Рейні-Вестфалії проявляються у двох основних типологіях, кожна з яких має свої унікальні характеристики та виклики для управління.

Характеристики повеней у великих річкових системах (наприклад, Рейн).

Повені у великих річкових системах, таких як Рейн, зазвичай розвиваються повільно. Ця особливість забезпечує відносно тривалий період попередження, що

дозволяє більш організовано та своєчасно вжити підготовчих заходів [1]. Однак значним викликом, пов'язаним із цими великомасштабними річковими повенями, є тривала висока вода, яка може зберігатися протягом кількох тижнів, що призводить до тривалих періодів затоплення та порушень [1].



Рисунок 1.2 – Містечко Шульд в Арській долині після того, як зійшла вода

Аналіз раптових повеней (Sturzfluten) у малих водотоках та міських районах. Навпаки, повені у менших річках та струмках переважно спричинені локалізованими, інтенсивними зливами, що призводять до швидких раптових повеней (Sturzfluten) [1]. Ці події характеризуються надзвичайно швидким підвищенням та подальшим зниженням рівня води, що супроводжується надзвичайно коротким часом попередження, часто лише годинами або навіть хвилинами [1]. Раптові повені також відомі тим, що перевантажують міські каналізаційні системи, спричиняючи значні збитки в районах, що знаходяться за межами безпосередньої близькості до природних водотоків [1]. Руйнівні повені у липні 2021 року, які сильно вплинули на частини ПРВ та Рейнланд-Пфальцу, стали яскравим прикладом таких подій, коли деякі райони отримали до 150 літрів опадів на квадратний метр протягом 24 годин [3]. Зокрема,

долина Інди отримала в середньому 101 літр, а долина Ерфту — 117 літрів під час цієї катастрофічної події [3].

Різниця у швидкості розвитку та тривалості повеней має вирішальне значення для розуміння їхньої потенційної шкоди та ефективності заходів реагування. Повільніші повені у великих річках дозволяють впроваджувати масштабніші структурні заходи, такі як перенесення дамб, тоді як раптові повені вимагають негайних, локалізованих та високоефективних систем попередження, а також індивідуальних заходів самозахисту. Природа повені визначає оптимальну стратегію реагування та залишкові ризики. Для раптових повеней особливу увагу слід приділяти розробці надійних систем раннього попередження, що дозволяють швидко реагувати на місцях, а також формуванню сильної культури індивідуальної підготовленості та самостійності у постраждалих громадах.

Таблиця 1.1 – Зведення типових ризиків повеней у ПРВ

Тип повені	Основна причина	Час попередження	Динаміка рівня води	Зачеплені райони	Типовий вплив
Повені у великих річках (наприклад, Рейн)	Тривалі регіональні опади над великими водозборами	Відносно тривалий (дні до тижнів)	Повільне підвищення, тривалі високі рівні, поступове зниження	Широкі річкові заплави, ширші долинні райони	Широкомасштабне затоплення, довгострокові порушення інфраструктури та сільського господарства
Раптові повені (Sturzfluten) у малих водотоках/міських районах	Локалізовані, інтенсивні зливи	Надзвичайно короткий (години до хвилин)	Швидке підвищення та зниження, раптовий початок	Менші річкові береги, урбанізовані райони, перевантажені дренажні та каналізаційні системи	Локалізовані серйозні структурні пошкодження, негайні руйнування, високий ризик для життя

1.3 Екологічні наслідки повеней

Повені мають значні та багатогранні екологічні наслідки, що впливають на якість води, ґрунти, біорізноманіття та критичну інфраструктуру.

Повені значно погіршують якість води, змиваючи широкий спектр забруднюючих речовин у поверхневі води та системи ґрунтових вод [3]. Це широкомасштабне забруднення безпосередньо погіршує якість запасів питної води та серйозно впливає на водні екосистеми [3]. Основними джерелами забруднення є затоплені промислові об'єкти, перевантажені очисні споруди та пошкоджені приватні резервуари для мазуту [3]. Під час повеней у липні 2021 року спостерігалися тимчасові стрибки концентрації нафти та дизельного палива в Рейні, а також підозра на мобілізацію важких металів, що свідчить про викид небезпечних речовин у водне середовище [4]. Катастрофа зачепила близько 40 очисних споруд у ПРВ (з 31 зосередженою в районі Кельна), які зазнали затоплення, зворотного потоку з водотоків або відключення електроенергії [8]. Хоча більшість з них були швидко відновлені (75% протягом 4 днів, усі до 3 серпня), їхня тимчасова несправність підкреслює критичну вразливість у управлінні стічними водами під час екстремальних подій [4]. Комунальні каналізаційні мережі також зазнали значних пошкоджень та замулення, хоча більшість з них залишалися функціональними, незважаючи на порушення [8].

Інтенсивні зливи, особливо на схилах, є основною причиною зсувів, селевих потоків та збільшення поверхневого стоку, що призводить до серйозної ерозії ґрунту [3]. Цей процес призводить до незворотної втрати цінного верхнього шару ґрунту, який є важливим для сільськогосподарської продуктивності, і може спричинити значні втрати врожаю на постраждалих територіях [3]. Інтенсивні сільськогосподарські практики, такі як надмірне обробіток ґрунту та використання важкої техніки, призводять до ущільнення ґрунту. Це зменшує природну водоутримуючу здатність ґрунту та його проникність, тим самим збільшуючи поверхневий стік та ризик ерозії [5]. Широкомасштабне ущільнення ґрунту через урбанізацію та будівництво непроникних поверхонь, таких як бетон та асфальт,

перешкоджає інфільтрації дощової води у ґрунт. Це посилює поверхневий стік, безпосередньо сприяючи підвищенню ризику повеней у міських та приміських районах [3]. "Регенерозивність" (ерозійна сила опадів) у ПРВ демонструє тривожне збільшення на $+44,2 \text{ Н/год*рік}$ з 1973 року, що вказує на зростаючу загрозу ерозії ґрунту, спричиненої опадами, яка посилюється підвищенням температури та повільнішим рухом штормових систем [9]. Крім фізичної втрати ґрунту, посилена ерозія також призводить до вимивання поживних речовин (сприяючи евтрофікації) та транспортування накопичених забруднюючих речовин у водойми, що додатково сприяє їх замуленню та деградації [9].



Рисунок 1.3 – Наслідок масштабного зсуву ґрунту в Ерфштатті

Повені можуть спричинити значні екологічні порушення, призводячи до пригнічення або втрати видів у біоценозах (спільнотах організмів). Це може призвести до зменшення загального видового різноманіття, особливо впливаючи на види, які є здобиччю для домашніх тварин [10]. Післяпаводкове заболочування ґрунтів може створити умови, сприятливі для поширення хвороб (наприклад, плісняви) та шкідників в екосистемах, не адаптованих до такого тривалого насичення. Це, у свою чергу, може сприяти втратам врожаю в сільському господарстві та загальному зниженню місцевого біорізноманіття [3]. І навпаки, тривалі періоди

посухи, також наслідок зміни клімату, можуть призвести до масової загибелі водних популяцій, таких як риби, молюски та амфібії. Ці втрати мають каскадні наслідки для всього харчового ланцюга, впливаючи на вищі трофічні рівні, включаючи різні види птахів [5]. Значною проблемою є поточний екологічний стан річок у Німеччині, понад 90% яких, як повідомляється, перебувають у поганому стані. Це підкреслює нагальну потребу у відновлювальних заходах для підвищення як біорізноманіття, так і природної водоутримуючої здатності цих систем [11]. Відновлення природних водотоків та їхніх заплав є ключовим для їхньої здатності тимчасово зберігати надлишкову воду, тим самим зменшуючи пікові рівні повеней та одночасно підтримуючи та покращуючи біорізноманіття [1]. Проекти ренатурації спеціально спрямовані на створення та відновлення життєво важливих середовищ існування для рідкісних видів та відновлення зв'язків між ізольованими паводковими каналами та заплавними водно-болотними угіддями, сприяючи екологічній стійкості [11].



Рисунок 1.4 – Лаахське озеро - найбільший маар в Айфелі

Повені завдають величезної матеріальної шкоди як державній, так і приватній інфраструктурі, включаючи житлові будинки, комерційні об'єкти та основні послуги

[1]. Повені у липні 2021 року завдали збитків на суму близько 33,1 мільярда євро по всій Німеччині, причому лише на ПРВ припадало близько 12,3 мільярда євро прямих збитків. Найбільша частка цих збитків припала на приватні домогосподарства (14,0 мільярда євро), за ними йшли будівельний сектор (6,9 мільярда євро), транспортна інфраструктура (6,8 мільярда євро) та промисловість і торгівля (5,0 мільярда євро). Критична інфраструктура, така як транспортні шляхи (наприклад, залізнична лінія Euregiobahn), мережі водопостачання (наприклад, в Ешвайлері) та каналізаційні системи, зазнали значних порушень та руйнувань [8]. Економічна діяльність, така як внутрішнє судноплавство, може бути серйозно обмежена через високий рівень води, що впливає на ланцюги поставок та торгівлю [5]. Крім матеріальних втрат, катастрофічні події також призвели до трагічних людських жертв: 49 загиблих у ПРВ під час повеней 2021 року 13 та 189 по всій Німеччині.

Аналіз наслідків повеней виявляє критичний зворотний зв'язок: втручання людини, такі як широке ущільнення ґрунту [3] та інтенсивні сільськогосподарські практики [5], безпосередньо посилюють вплив повеней, зменшуючи природне поглинання води та збільшуючи поверхневий стік та ерозію ґрунту. Це не просто вплив повеней, а те, як землекористування людини посилює їхню серйозність. Крім того, забруднення, що походить від затоплених промислових об'єктів та перевантажених очисних споруд [3] під час повеней, створює вторинну екологічну катастрофу (наприклад, погіршення якості води, евтрофікація, потенційна мобілізація важких металів [8]). Це демонструє кумулятивний ефект: діяльність людини збільшує ймовірність та серйозність повеней, а ці повені, у свою чергу, спричиняють викид забруднюючих речовин з антропогенних систем, створюючи цикл посилення деградації навколишнього середовища. Забезпечення екологічної безпеки під час повеней вимагає фундаментальної зміни підходу. Йдеться не лише про управління водними ресурсами, а й про критичну інтеграцію сталих практик землекористування та надійних заходів захисту навколишнього середовища у всі аспекти містобудування, сільськогосподарської політики та промислового регулювання. Ця проактивна інтеграція є важливою для зменшення як ймовірності серйозних паводкових подій, так і масштабу їхньої екологічної шкоди.

Таблиця 1.2 – Екологічні наслідки повеней

Зачеплений компонент	Специфічні наслідки	Спостережувані механізми/джерела
Якість води	Хімічне забруднення (наприклад, нафта, важкі метали), переповнення каналізації, евтрофікація, погіршення запасів питної води	Затоплені промислові об'єкти, перевантажені очисні споруди, пошкоджені резервуари для мазуту, вимивання поживних речовин з еродованого ґрунту
Ґрунт	Прискорена ерозія, деградація земель, втрата цінного верхнього шару ґрунту, втрати врожаю, збільшення поверхневого стоку	Інтенсивні опади, широке ущільнення ґрунту, інтенсивні сільськогосподарські практики, ущільнення ґрунту
Біорізноманіття	Порушення середовищ існування, пригнічення видів, поширення хвороб/шкідників, порушення харчових ланцюгів	Заболочування, пряма фізична сила, змінені умови середовища існування, зміни у видовому складі
Інфраструктура	Пошкодження транспортних мереж, енергопостачання, систем зв'язку, очисних споруд, значні економічні втрати, людські жертви	Пряма фізична сила паводкових вод, перевантаження системи, структурні пошкодження

1.4 Посилення ризиків повеней та необхідність адаптації до зміни клімату

Зміна клімату вже не є віддаленою загрозою, а є сучасною реальністю в ПРВ. Регіон вже відчуває помітне збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, включаючи тривалі хвилі спеки та сильні зливи (Starkniederschläge) [1]. Емпіричні спостереження останніх років переконливо свідчать про те, що локальні зливи будуть відбуватися частіше та з більшою інтенсивністю в майбутньому [1]. "Регенерозивність" (ерозійна сила опадів) у ПРВ значно зросла на +44,2 Н/год*рік з 1973 року. Це зростання безпосередньо пов'язане зі збільшенням температури, що сприяє повільнішому руху дощових злив та гроз, дозволяючи більшій кількості води випадати на концентрованій площі протягом тривалого

періоду [9].

Кліматичні моделі прогнозують, що загальне збільшення опадів призведе до вищої частоти паводкових подій [1]. М'якші зимові температури означають, що опади рідше зберігаються у вигляді снігу. Натомість вони випадають у вигляді дощу, безпосередньо сприяючи річковим стокам протягом зимових місяців, тим самим збільшуючи ризик зимових повеней [5]. Повінь 2021 року, що характеризувалася надзвичайними обсягами опадів (до 150 л/м² за 24 години), широко розглядається як чіткий показник типу екстремальних подій, які стануть більш поширеними в майбутньому через зміну клімату [3].

ПРВ нещодавно пережив кілька суворих посушливих літніх періодів (наприклад, 2018-2020, 2022), які призвели до історично низьких рівнів води в річках, значних обмежень судноплавства, широкомасштабних втрат врожаю, серйозних пошкоджень лісів та підвищеного ризику лісових пожеж [5]. Парадоксально, ці тривалі сухі періоди можуть супроводжуватися інтенсивними зливами. Коли дощ випадає на висушені, ущільнені ґрунти, які мають знижену здатність поглинати воду, це призводить до значного збільшення поверхневого стоку та підвищеного ризику раптових повеней [3]. Це явище підкреслює тривожний зсув до більш частих та інтенсивних гідрологічних екстремумів, що коливаються між дефіцитом води та руйнівним надлишком.

Твердження "екстремальне стає новою нормою" [14] відображає глибоку зміну в розумінні. Це означає, що регіон переходить від ізольованих екстремальних погодних явищ до стійкої моделі гідрологічної нестабільності, що охоплює як сильні посухи, так і інтенсивні повені. Це не просто окремі інциденти, а системна зміна у доступності води та викликах управління водними ресурсами. Спостережуване збільшення "регенерозивності" [9] безпосередньо пов'язує зміну клімату з прискоренням деградації ґрунту та забруднення води під час паводкових подій. Крім того, критична взаємодія між затверділими від посухи ґрунтами та подальшими сильними зливами з виявляє фундаментальну системну вразливість: ті самі умови, що спричиняють дефіцит води, також ненавмисно створюють ідеальні умови для більш руйнівних та швидких повеней. Адаптаційні стратегії в ПРВ повинні кардинально

еволюціонувати за межі реактивного захисту від повеней. Вони повинні охоплювати проактивне, інтегроване управління водними ресурсами, яке вирішує весь спектр гідрологічних екстремумів. Це вимагає радикального переосмислення традиційних практик землекористування, містобудування (наприклад, концепції "міст-губок" [11]) та сільськогосподарських методів для побудови всебічної системної стійкості як до дефіциту води, так і до її надлишку, визнаючи їх двома сторонами однієї медалі, спричиненої кліматом.

1.5 Стратегії та заходи екологічної безпеки від повеней у ПРВ

Північний Рейн-Вестфалія застосовує багатогранний підхід до забезпечення екологічної безпеки від повеней, що охоплює законодавчі, інженерні, природоорієнтовані та неструктурні заходи, а також комплексні стратегії адаптації до зміни клімату.

На федеральному рівні Німеччини "Закон про покращення превентивного захисту від повеней", прийнятий у 2005 році, суттєво змінив федеральний Закон про водне господарство (WHG) та Будівельний кодекс [16]. Це законодавство зобов'язує федеральні землі офіційно визначити 100-річні заплави (HQ 100) протягом п'яти років після його набрання чинності [16]. Важливо, що воно запровадило положення, що дозволяють дозволяти будівництво в цих заплавах за дуже суворих, кумулятивних умов, тим самим відходячи від попередньої абсолютної заборони будівництва в таких зонах [16].

Директива Європейського Союзу про оцінку та управління ризиками повеней (EG-HWRM-RL) забезпечує фундаментальну основу. Вона інтегрує планування, запобігання та технічні заходи у комплексні "Плани управління ризиками повеней". Ця директива зобов'язує держави-члени систематично проводити попередню оцінку ризиків повеней, створювати детальні карти небезпеки повеней та ризиків, а також розробляти плани управління ризиками для всіх річкових басейнів з обов'язковим переглядом кожні шість років [1]. Ця рамка ЄС значно доповнює та підтримує існуючу концепцію захисту від повеней ПРВ [1].

На рівні землі ПРВ розробила власну комплексну концепцію захисту від повеней, яка постійно оновлюється з середини 1990-х років, втілюючи цілісний підхід до управління повенями [1]. Принцип індивідуальної відповідальності за вжиття запобіжних заходів для мінімізації збитків від повеней юридично закріплений у § 5 Abs. 2 федерального Закону про водне господарство (WHG), що застосовується в ПРВ.1 До федерального закону, конкретні державні норми (наприклад, §§ 112 ff. LWG NRW) вже передбачали ідентифікацію та визначення територій HQ 100 [16].

Будівництво дамб та їх перенесення (Deichbau und Deichrückverlegung): Ці заходи передбачають або будівництво нових дамб, або стратегічне переміщення існуючих далі вглиб суші. Основна мета полягає у створенні більшого простору для паводкових вод, зменшенні тиску на існуючі споруди та дозволі річкам природно розливатися під час високих вод [1]. Для Рейну конкретно заплановано сім перенесень дамб та чотири керовані зони утримання, що мають на меті знизити рівень води на ключових гідропостах та затримати прибуття пікових паводкових хвиль [1]. Ці масштабні втручання, за прогнозами, створять додатковий об'єм утримання 140 мільйонів кубічних метрів на площі близько 3325 гектарів [2].

Будівництво водосховищ та управління зонами утримання у водосховищах: Ці інженерні споруди призначені для тимчасового зберігання надлишкової води, тим самим зменшуючи пікові витрати води нижче за течією та пом'якшуючи наслідки повеней [1].

Модернізація інфраструктури: Прикладом інноваційних технічних рішень є місто Райне, яке першим у ПРВ впровадило нову гнучку, мобільну протипаводкову стіну. Ця система дозволяє швидко розгортати її для швидкого закриття прогалин в існуючих захисних бар'єрах, заощаджуючи критичний час та персонал під час паводкових подій [17].

Розвиток водотоків та ренатурація (Gewässerentwicklung und Renaturierung): Відновлення природних русел річок та пов'язаних з ними заплав (Auen) є наріжним каменем природоорієнтованого захисту від повеней. Ці відновлені території здатні тимчасово зберігати надлишкову воду, ефективно зменшуючи пікові рівні повеней та значно сприяючи превентивному захисту від повеней [1].

Важливість природних заплав: Природні заплавні ландшафти (naturnahe Auenlandschaften) та болота визнані життєво важливими компонентами здорової системи управління водними ресурсами. Однак вони особливо вразливі до тривалої нестачі води, що підкреслює подвійну проблему управління як повенями, так і посухами [5].

Проекти ренатурації: Хоча вони не розташовані виключно в ПРВ, такі проекти, як ті, що реалізуються на Нижній Гавелі, Еммеріхер Вард уздовж Рейну та ініціатива AllerVielfalt Verden, демонструють величезний потенціал великомасштабної ренатурації. Ці зусилля спрямовані на відновлення та створення різноманітних середовищ існування для рідкісних видів, розширення природних заплав та відновлення зв'язків між річками та їхніми історичними паводковими каналами, тим самим підвищуючи як біорізноманіття, так і природний захист від повеней [11].

Концепції "життя з водою": Сучасне управління повенями все частіше пропагує такі концепції, як "чутливі до води міста" (часто називають "Schwammstädte" або міста-губки) та фундаментальне покращення якості ґрунту. Ці підходи вважаються важливими для розвитку кліматично стійкої водної економіки [11]. Це включає стратегії, такі як відключення запечатаних міських поверхонь від звичайних змішаних каналізаційних систем та впровадження більш природних методів управління дощовою водою [18].

Картування небезпеки та ризиків повеней: Детальні карти розробляються для схильних до повеней водотоків для візуального представлення територій, схильних до "столітніх" паводків (HQ 100). Ці карти є вирішальними для інформування постраждалих осіб та громад, що дозволяє їм готуватися та діяти превентивно [1]. Міністерство навколишнього середовища ПРВ опублікувало "Leitfaden Hochwassergefahrenkarten" (Посібник з карт небезпеки повеней) для забезпечення єдиної основи для цих оцінок [1].

Передові системи прогнозування та попередження: Надійна та добре функціонуюча система прогнозування повеней визначена як один з найважливіших інструментів превентивного захисту від повеней [1]. Для Рейну звіти та прогнози повеней централізовано видаються Центром повідомлень про повені в Майнці [1].

Державне управління з питань природи, навколишнього середовища та захисту прав споживачів ПРВ (LANUV) керує розгалуженою гідрологічною вимірювальною мережею та надає дані про поточний рівень води через свій вебсайт та мобільний додаток "MeinePegel" [1]. Поточні зусилля зосереджені на покращенні можливостей прогнозування для менших водотоків, включаючи експериментальне використання опадівного радару для виведення паводкових витрат з вимірювань опадів [1].

Кампанії з підвищення обізнаності громадськості та індивідуальний самозахист: Комплексні кампанії з інформування громадськості щодо ризиків повеней та ефективних захисних заходів вважаються вирішальними для підвищення стійкості громади [1]. Окремі громадяни юридично зобов'язані, згідно з § 5 Abs. 2 WHG, вживати відповідних запобіжних заходів для мінімізації потенційних збитків від повеней для їхньої власності [1]. Практичні поради для домовласників включають встановлення зворотних клапанів для запобігання зворотного потоку каналізації, зберігання цінних речей за межами підвалів, уникнення похилих поверхонь у бік будинку, встановлення порогів на підвальних вікнах та дверях, очищення дренажних отворів від сміття, розташування комунальних блоків (електрика, газ, опалення) над підвальними рівнями та розгляд водонепроникних підвалів або навіть відмову від підвалів у нових будівлях у зонах високого ризику [1].



Рисунок 1.5 – Долина Ару до та під час катастрофічної повені

Запобігання у сільському господарстві: Прямі виплати Європейського Союзу фермерам все частіше пов'язані з дотриманням правил "Cross Compliance", які включають вимоги до сільськогосподарських практик, що зменшують ерозію. Ці практики передбачають постійне покриття ґрунту, прямий посів, зменшення обробітку ґрунту та контурне землеробство на схильних до ерозії землях [9]. Збереження постійних пасовищ, з їхнім захисним дерниною, також є ключовим компонентом цих превентивних заходів [9].

ПРВ нещодавно прийняла нову комплексну стратегію адаптації до клімату, що включає 110 конкретних заходів, розроблених для того, щоб зробити штат "кліматично пристосованим". Ця стратегія має на меті забезпечити посилений захист від низки кліматичних впливів, включаючи повені, посухи та хвилі спеки [14]. Реалізація цієї стратегії керується урядом землі до 2029 року та підлягає постійному перегляду та оновленню [14].

Діють різні ініціативи фінансування для підтримки місцевих суб'єктів, включаючи муніципалітети та підприємства, у впровадженні заходів з адаптації до клімату. Приклади включають заклик Європейського фонду регіонального розвитку (EFRE) щодо "Klimaanpassung.Kommunen.NRW" та "Klimaanpassung.Unternehmen.NRW" [18]. Спеціальне фінансування також виділяється на управління ризиками сильних дощів на муніципальному рівні, що охоплює розробку карт небезпеки, аналіз ризиків та концепції дій, а також на проєкти сталого водовідведення, які сприяють відключенню запечатаних поверхонь та природному управлінню дощовою водою [18].

Ініціатива "Klimaresiliente Region mit internationaler Strahlkraft" (Кліматично стійкий регіон з міжнародним впливом) конкретно спрямована на Рурську область, найбільшу агломерацію Німеччини, з метою зміцнення її зелено-блакитної інфраструктури за допомогою децентралізованого управління дощовою водою та зусиль з розпечатування [18]. Рамки захисту від катастроф штату активно коригуються для підготовки до більш частих екстремальних погодних явищ, включаючи посилене планування, регулярні навчання та розширення транскордонних мереж співпраці [14].

Таблиця 1.3 – Ключові заходи захисту від повеней та їх застосування у ПРВ

Тип заходу	Опис	Приклади/Застосування у ПРВ
Законодавча/регуляторна база	Встановлення правових рамок та директив для управління ризиками повеней та екологічної безпеки.	Федеральний Закон про покращення превентивного захисту від повеней (2005), Директива ЄС про оцінку та управління ризиками повеней (EG-HWRM-RL), Концепція захисту від повеней ПРВ, § 5 Abs. 2 WHG, §§ 112 ff. LWG NRW 1
Інженерні/технічні рішення	Будівництво та управління фізичними спорудами для контролю та пом'якшення паводкових вод.	Будівництво та перенесення дамб (наприклад, 7 перенесень дамб на Рейні), будівництво водосховищ, керовані зони утримання (4 заплановані для Рейну), мобільні протипаводкові стіни (наприклад, у Райне) 1
Природоорієнтовані рішення	Використання природних процесів та екосистем для підвищення стійкості до повеней.	Розвиток водотоків та ренатурація (наприклад, проекти на Нижній Гавелі, Еммеріхер Вард, AllerVielfalt Verden), концепції "міст-губок", покращення якості ґрунту, збереження постійних пасовищ, практики зменшення ерозії у сільському господарстві (Cross Compliance)
Неструктурні/превентивні заходи	Заходи, що не передбачають будівництва, спрямовані на зменшення вразливості та підвищення готовності.	Карти небезпеки повеней та ризиків (HQ 100), системи прогнозування та попередження (Центр повідомлень про повені в Майнці, LANUV, додаток "MeinePegel", опадівний радар), кампанії з підвищення обізнаності громадськості, індивідуальні заходи самозахисту (зворотні клапани, зберігання цінностей поза підвалами)
Стратегії адаптації до клімату	Довгострокові плани та ініціативи для адаптації до наслідків зміни клімату, включаючи посилені ризики повеней.	Нова комплексна стратегія адаптації до клімату ПРВ (110 заходів), програми фінансування EFRE ("Klimaanpassung.Kommunen.NRW", "Klimaanpassung.Unternehmen.NRW"), управління ризиками сильних дощів на муніципальному рівні, ініціатива "Klimaresiliente Region mit internationaler Strahlkraft", коригування рамок захисту від катастроф

Комплексний набір стратегій, що охоплює законодавчі рамки, традиційні інженерні рішення, зростаючий акцент на природоорієнтовані підходи та всеосяжні

стратегії адаптації до клімату, демонструє чітку та прогресивну еволюцію в підході ПРВ до управління повенями. Законодавчий перехід від "абсолютної заборони будівництва" в заплавах до дозволу будівництва за "суворих кумулятивних умов" [16] свідчить про перехід до управління ризиками та співіснування з ними, а не спроби повного уникнення. Повторний акцент на "житті з водою" [1] та розвитку "кліматично стійкого водного господарства" [11] вказує на глибоке визнання того, що повені неможливо повністю запобігти, але їх необхідно стратегічно інтегрувати в регіональне планування. Це означає фундаментальний перехід від суто оборонних та реактивних заходів до більш адаптивних та стійких систем, які активно працюють у гармонії з природними гідрологічними процесами. Довгострокова ефективність положень ПРВ щодо екологічної безпеки від повеней все більше залежить від успішної інтеграції цих різноманітних заходів. Це вимагає виходу за межі ізолюваного, традиційного інженерного мислення, щоб охопити екологічні принципи, впровадити децентралізовані рішення та прийняти проактивний, довгостроковий підхід до адаптації до клімату. Така комплексна стратегія вимагає надійного міжсекторального планування, сильної узгодженості політики та готовності до інновацій на всіх рівнях управління.

1.6 Ефективність, прогалини та виклики у захисті від повеней у ПРВ

Незважаючи на комплексний підхід, захист від повеней у ПРВ стикається з певними обмеженнями та викликами, які впливають на його загальну ефективність.

Широко визнано, що 100% захист від повеней є недосяжною метою; певний рівень залишкового ризику завжди зберігатиметься, навіть за наявності найповніших захисних заходів [1]. Технічні захисні споруди самі по собі забезпечують лише обмежену ефективність проти локалізованих, інтенсивних злив, спричинених грозами, що підкреслює необхідність багатостороннього підходу [1]. Парадоксально, але в районах, де існують захисні споруди, масштаби збитків іноді можуть бути більшими, якщо ці захисні споруди виходять з ладу, порівняно з районами без таких споруд. Це часто пояснюється помилковим відчуттям безпеки, що заохочує більш

вразливий розвиток, або тим, що концентрований потік води посилює наслідки при прориві [1].

Випрямлення русел річок: Штучне випрямлення русел річок, часто для навігації або рекультивації земель, значно скорочує природний шлях течії. Це збільшує швидкість води, що призводить до більшого та швидшого скидання вниз за течією, тим самим збільшуючи ризик повеней у нижніх течіях [5].

Ущільнення ґрунту (Versiegelung): Широкі непроникні поверхні від урбанізації (наприклад, будівлі, дороги, парковки) перешкоджають інфільтрації дощової води в ґрунт. Це різко збільшує поверхневий стік, перевантажуючи дренажні системи та призводячи до широкомасштабних міських повеней [3].

Втрата заплав: Історично природні заповоди діяли як вирішальні буферні зони, тимчасово зберігаючи надлишкову воду під час високих вод. Будівництво дамб, які відрізають ці заповоди, усуває ці життєво важливі природні водосховища, зменшуючи природну здатність ландшафту поглинати паводкові води [6].

Інтенсивне сільськогосподарське використання: Сучасні інтенсивні сільськогосподарські практики, особливо ті, що передбачають використання важкої техніки, можуть призвести до серйозного ущільнення ґрунту. Це зменшує водоутримуючу здатність ґрунту та його проникність, що призводить до збільшення поверхневого стоку та підвищеного ризику ерозії під час сильних дощів [5].

Повені 2021 року виявили значні недоліки в реагуванні на прогнози та системи попередження, зокрема в долинах Ар та Ерфт. Були проблеми з ефективною адаптацією системи та запобіганням збиткам, що свідчить про розрив між наявними даними та дієвими заходами. Крім того, інцидент з гравійним кар'єром в Ерфтштадті-Блесемі, де відсутність належного захисту від повеней призвела до катастрофи, підкреслив проблеми з дотриманням правил та обмін інформацією між органами влади. Геологічна служба ПРВ раніше висловлювала занепокоєння щодо стабільності схилів кар'єру до відповідного окружного уряду, вказуючи на прогалини в оцінці ризиків та комунікації. Загалом, адміністративні дані щодо захисту від повеней не завжди централізовані та структуровані, що ускладнює ефективне управління та координацію. Також існує потреба у збільшенні фінансування для водогосподарських

заходів, спрямованих на захист громадських територій, з необхідністю збільшення річних асигнувань до 100 мільйонів євро.

Таблиця 1.4 – Виклики та прогалини у захисті від повеней у ПРВ

Категорія викликів	Специфічні прогалини/виклики	Наслідки
Залишкові ризики та обмеження заходів	Неможливість 100% захисту, обмежена ефективність технічних споруд проти раптових повеней, потенційно більші збитки при відмові захисних споруд	Помилкове відчуття безпеки, підвищена вразливість, необхідність багатогранного підходу
Втручання людини та посилення повеней	Випрямлення русел річок, ущільнення ґрунту (урбанізація), втрата заплав, інтенсивне сільське господарство (ущільнення ґрунту)	Збільшення швидкості води, перевантаження дренажних систем, зменшення природної водоутримуючої здатності, підвищений ризик ерозії та міських повеней
Недоліки реагування та управління	Прогалини у реагуванні на прогнози та системи попередження (повені 2021 року), проблеми з обміном даними та координацією між органами влади, недостатнє фінансування	Зниження ефективності систем попередження, посилення збитків, неефективне використання ресурсів, перешкоди для інтегрованого планування
Законодавчі та адміністративні виклики	Складність дотримання правил, нецентралізовані адміністративні дані, необхідність постійного перегляду та адаптації законодавства	Юридичні колізії, затримки у впровадженні заходів, відсутність комплексної картини ризиків

Фрагментація відповідальності, брак прозорості та недостатня обізнаність громадськості перешкоджають ефективному захисту від повеней. Це означає, що навіть за наявності передових систем попередження, якщо інформація не доходить до постраждалих або не спричиняє відповідних дій, її ефективність знижується. Це підкреслює необхідність покращення координації між різними зацікавленими сторонами, такими як муніципалітети, водогосподарські органи, рятувальні служби та громадяни. Посилення самодопомоги та підвищення обізнаності про ризики серед населення є критично важливими, оскільки абсолютний захист від повеней неможливий. Для подолання цих викликів необхідна краща координація між органами влади та прозорість у впровадженні законодавства та адміністративних рішень, що дозволить ефективніше керувати конфліктами та застарілими структурами.

Аналіз забезпечення екологічної безпеки від повеней у Північному Рейні-Вестфалії показує, що регіон стикається зі зростаючими та складними викликами, значною мірою посиленими зміною клімату. Хоча ПРВ розробила всебічну систему захисту від повеней, що включає законодавчі, інженерні, природоорієнтовані та неструктурні заходи, існують помітні прогалини та обмеження, які вимагають подальшої уваги.

По-перше, фундаментальне розуміння того, що абсолютний захист від повеней є недосяжним, є вирішальним. Залишкові ризики залишатимуться, і стратегії повинні бути спрямовані на управління цими ризиками, а не на їх повне усунення. Це означає, що громади та окремі особи повинні бути поінформовані та підготовлені до потенційних подій.

По-друге, взаємозв'язок між діяльністю людини та посиленням ризиків повеней є очевидним. Ущільнення ґрунту, випрямлення річок, втрата заплав та інтенсивне сільське господарство безпосередньо сприяють збільшенню частоти та інтенсивності паводкових подій, а також посилюють екологічні наслідки, такі як забруднення води та ерозія ґрунту. Це вказує на необхідність фундаментального переосмислення землекористування та розвитку.

По-третє, зміна клімату змінює гідрологічний режим регіону, роблячи

екстремальні явища, такі як сильні зливи та посухи, "новою нормою". Парадоксальна взаємодія між посухами, що ущільнюють ґрунт, та подальшими

Рекомендації:

- Посилення інтегрованого управління водними ресурсами: Необхідно перейти від традиційного, ізольованого підходу до захисту від повеней до комплексного, інтегрованого управління водними ресурсами. Це повинно включати тісну координацію між різними секторами (містобудування, сільське господарство, промисловість, охорона навколишнього середовища) та рівнями управління (федеральний, земельний, муніципальний).
- Пріоритет природоорієнтованим рішенням: Збільшити інвестиції та прискорити реалізацію проєктів ренатурації річок, відновлення заплав та впровадження концепцій "міст-губок". Ці заходи не тільки підвищують природну здатність ландшафту до утримання води, але й покращують біорізноманіття та якість екосистем.
- Покращення систем раннього попередження та комунікації: Розвивати та модернізувати системи прогнозування повеней, особливо для малих водотоків, де раптові повені становлять найбільший ризик. Це включає використання передових технологій, таких як опадівний радар, а також забезпечення ефективної та своєчасної комунікації з громадськістю, щоб уникнути недоліків, спостережуваних під час повеней 2021 року.
- Сприяння індивідуальній та громадській стійкості: Активно інформувати та навчати населення щодо ризиків повеней та заходів самозахисту. Підвищення обізнаності та здатності до самодопомоги є вирішальними для пом'якшення наслідків, оскільки повний захист від повеней неможливий.
- Перегляд та адаптація землекористування: Впроваджувати суворіші правила щодо ущільнення ґрунту та будівництва в зонах ризику повеней. Заохочувати практики, що зменшують поверхневий стік та сприяють інфільтрації води, такі як розпечатування поверхонь у містах та сталі сільськогосподарські методи.
- Забезпечення адекватного фінансування: Збільшити довгострокове

фінансування заходів щодо захисту від повеней та адаптації до клімату, визнаючи, що інвестиції в превентивні заходи є економічно вигіднішими, ніж витрати на відновлення після катастроф.

Впровадження цих рекомендацій дозволить Північному Рейну-Вестфалії не лише краще захистити своє населення та інфраструктуру від зростаючих ризиків повеней, але й підвищити екологічну стійкість регіону в умовах мінливого клімату.

2 АНАЛІЗ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ПОВЕНЕЙ У ПІВНІЧНОМУ РЕЙНІ-ВЕСТФАЛІЇ

2.1 Сучасна система управління повенями у Північному Рейні-Вестфалії

Північний Рейн-Вестфалія (ПРВ), як один з найбільш густонаселених і промислово розвинених регіонів Німеччини, стикається зі значними викликами, пов'язаними з повенями. Катастрофічні повені, що сталися в липні 2021 року, особливо в долинах Ар та Ерфт, продемонстрували руйнівну силу екстремальних погодних явищ, спричинених зміною клімату Ці події призвели до загибелі 49 людей у ПРВ, завдали збитків на мільярди євро, зокрема 12,3 мільярда євро лише в Північному Рейні-Вестфалії, та спричинили масштабні екологічні наслідки.

Зміна клімату призводить до збільшення частоти та інтенсивності локальних злив та екстремальних повеней, що робить проблему екологічної безпеки невідкладною. У відповідь на ці виклики, уряд ПРВ активно розробляє та впроваджує стратегії адаптації до зміни клімату, включаючи посилення захисту від повеней. Цей звіт має на меті запропонувати та проаналізувати десять інноваційних бізнес-ідей для стартапів, спрямованих на підвищення екологічної безпеки та стійкості регіону до впливу повеней. Кожна ідея розглядається з точки зору вирішуваної екологічної проблеми, інноваційного рішення, потенційного впливу, ринкового потенціалу та ключових викликів.

Регіон ПРВ стикається з двома основними типами повеней: повільними повенями на великих річках, таких як Рейн, які надають відносно тривалий час для попередження, та швидкими паводками (Sturzfluten) на малих річках та струмках, спричиненими локальними інтенсивними опадами. Останні характеризуються надзвичайно короткими часами попередження та можуть призводити до перевантаження каналізаційних систем та пошкодження територій за межами русел річок.

Зміна клімату посилює ці ризики, збільшуючи ймовірність локальних сильних злив та екстремальних повеней. Це призводить до низки серйозних екологічних

наслідків. Одним з найважливіших є забруднення води, коли паводкові води змивають забруднюючі речовини з промислових об'єктів, каналізаційних систем та приватних резервуарів з мазутом у поверхневі та ґрунтові води. Це, своєю чергою, погіршує якість питної води та водних екосистем.

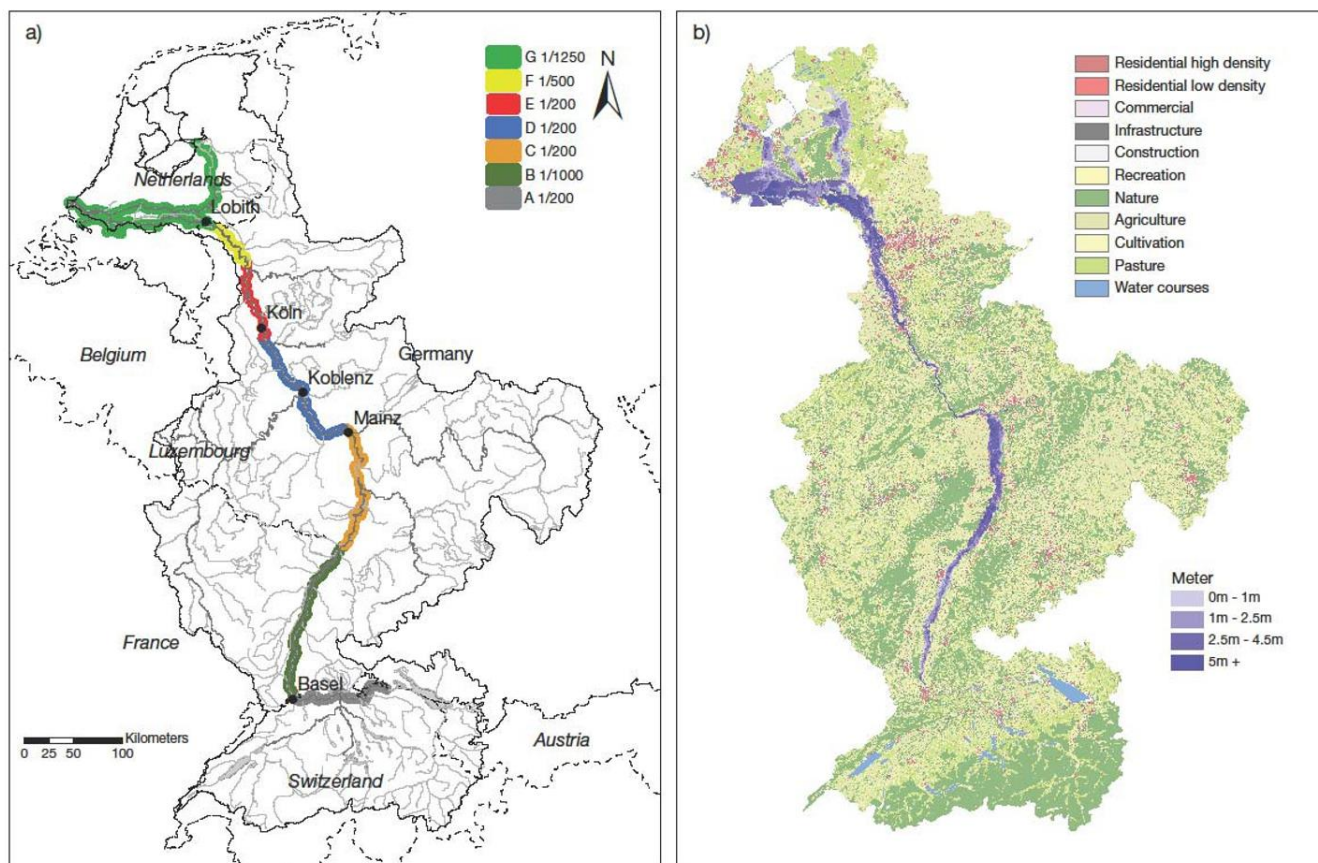


Рисунок 2.1 – Карти басейну Рейну: (а) орієнтовні рівні безпеки та (б) потенційно затоплена територію внаслідок річкових затоплення

Ерозія ґрунту також є значною проблемою, особливо в сільськогосподарських районах, де сильні дощі призводять до втрати родючого верхнього шару ґрунту та збільшення стоку осаду та поживних речовин у водойми. Це не тільки знижує продуктивність ґрунту, але й сприяє замуленню річок та озер.

Вплив на біорізноманіття проявляється у пригніченні певних видів, зменшенні кількості видів у біоценозах, а також у загибелі популяцій риб, молюсків та амфібій через низький рівень води або забруднення. Вологість ґрунтів після повені може сприяти поширенню хвороб та шкідників, що також негативно впливає на

біорізноманіття.

Інфраструктура також зазнає значних пошкоджень. Повені руйнують дороги, мости, електромережі та будівлі, що призводить до мільярдних збитків. Наприклад, у 2021 році значні пошкодження були зафіксовані в приватних домогосподарствах, будівельному секторі та транспортній інфраструктурі.

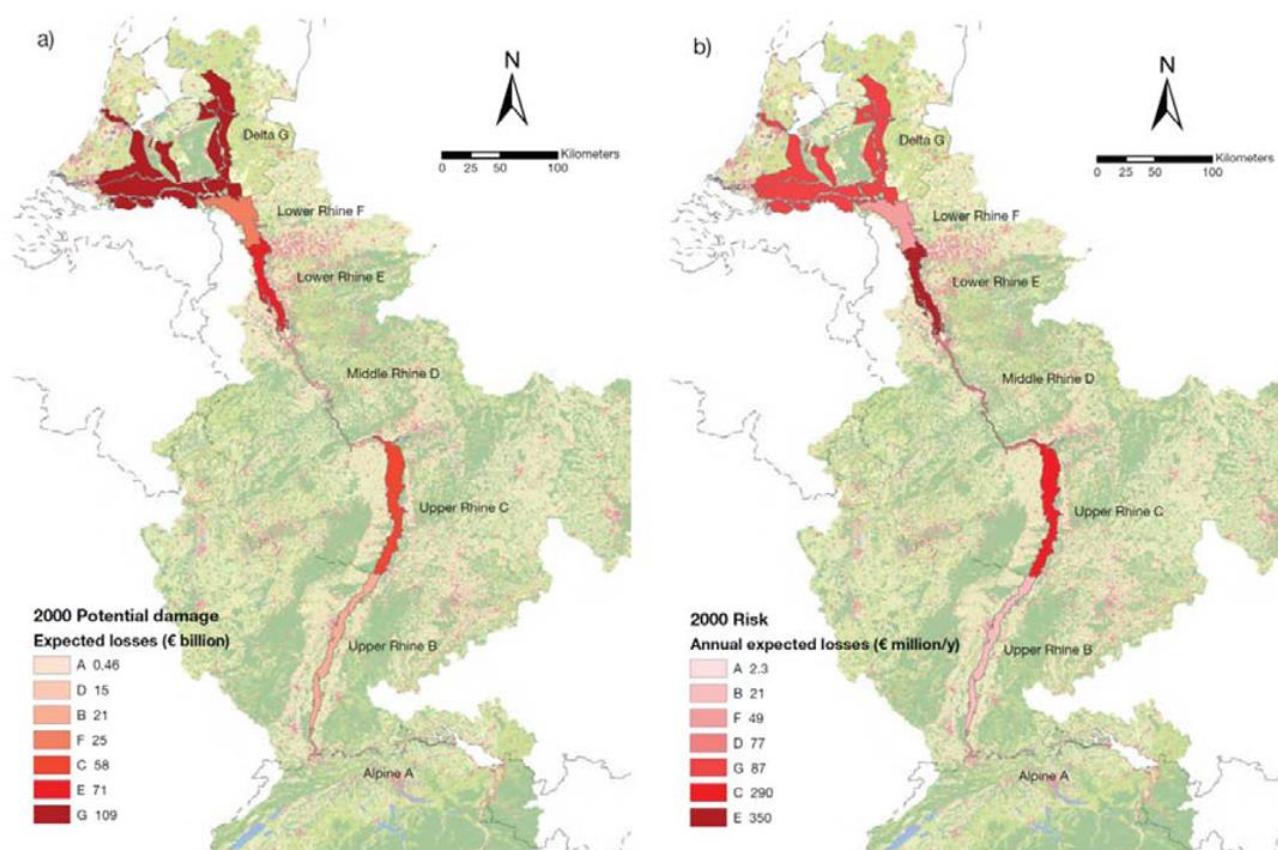


Рисунок 2.2 – Потенціал пошкодження (а) і ризик повіні (б)

2.2 Існуючі стратегії, законодавство та технічні рішення

Уряд ПРВ та відповідні інституції впроваджують комплексний підхід до захисту від повеней. Законодавча база включає Закон про водне господарство (Wasserhaushaltsgesetz) та відповідні положення земельного водного законодавства ПРВ (§§ 112 ff. LWG NRW), які вимагають від регіонів офіційно визначати зони затоплення на основі 100-річних паводків. Директива ЄС щодо оцінки та управління ризиками повеней (EG-HWRM-RL) інтегрує планування, запобігання та технічні

заходи захисту в "План управління ризиками повеней".

Серед інженерних та технічних рішень використовуються будівництво та перенесення дамб, створення водосховищ та управління просторами для утримання води в греблях. Особлива увага приділяється розвитку та ренатуралізації водних об'єктів, оскільки природні русла річок та їх заплави здатні тимчасово зберігати надлишок води, знижуючи пікові рівні повеней. Крім того, надаються рекомендації щодо індивідуальних заходів самозахисту для власників нерухомості, таких як встановлення зворотних клапанів, зберігання цінних речей поза підвалами та облаштування порогів біля вікон.

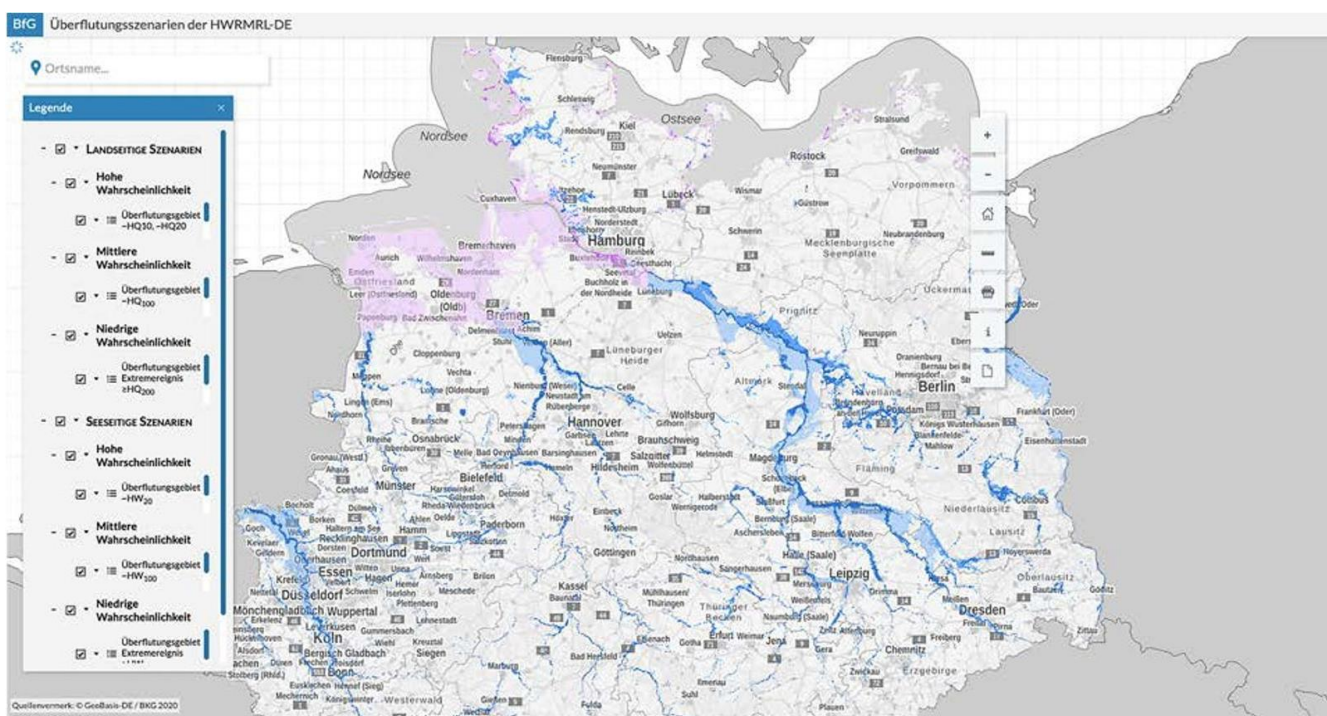


Рисунок 2.3 – Знімок екрана геопорталу Федерального водного агентства.

Геопортал надає послідовні візуалізації карти небезпеки повеней

Системи попередження відіграють ключову роль у запобіжному захисті від повеней. Державне управління природи, навколишнього середовища та захисту споживачів ПРВ (LANUV) інформує громадськість про поточну ситуацію з повенями через свій веб-сайт та додаток "MeinePegel", який надає дані про рівень води з понад 130 важливих вимірювальних станцій. Ведеться робота над покращенням

прогнозування повеней для малих водних об'єктів, зокрема, випробовується використання радарів опадів.

2.3 Ефективність заходів, прогалини та виклики

Незважаючи на існуючі заходи, повний захист від повеней неможливий, і певний залишковий ризик завжди зберігається. Катастрофа 2021 року виявила значні прогалини. Екстремальні опади, що перевищили середньомісячні показники в 1,5-2 рази, випали на вже насичені ґрунти, що унеможливило поглинання води.¹ Щільна забудова, значне запечатування поверхонь та відсутність ретенційних зон також посилюють проблему.

Були виявлені недоліки у реагуванні на прогнози та системи попередження, що перешкоджало ефективній адаптації системи та запобіганню збиткам. Наприклад, у випадку з кар'єром Ерфтштадт-Блесем, Геологічна служба ПРВ раніше висловлювала занепокоєння щодо стабільності схилів при підвищенні рівня ґрунтових вод, але ці занепокоєння, схоже, не були належним чином враховані.

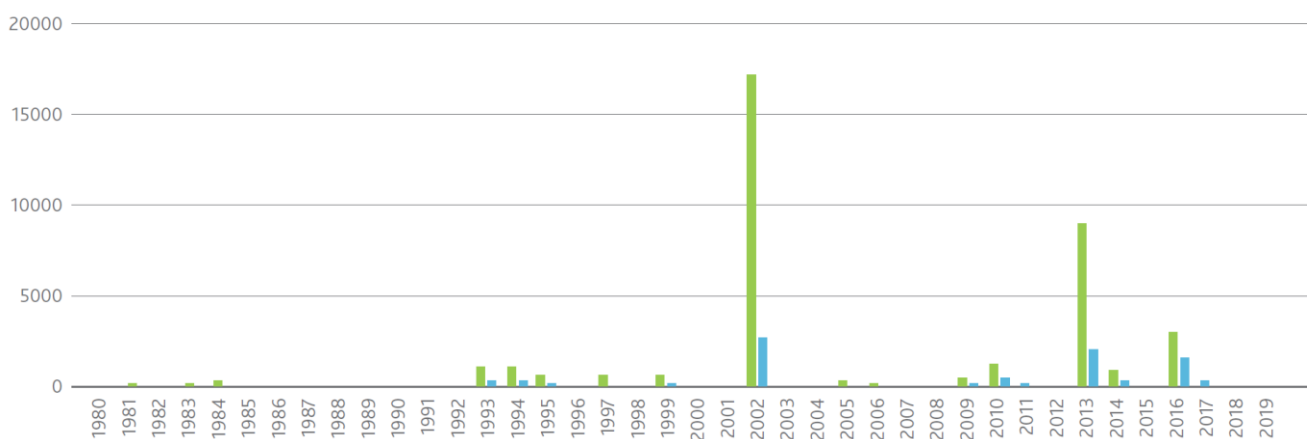


Рисунок 2.4 – Загальні (зел.) та застраховані (син.) збитки в мільйонах доларів США від повеней та раптових повеней у Німеччині між 1980 та 2018 роками

Серед інших викликів – відсутність централізованих та структурованих

адміністративних даних, що ускладнює координацію між органами влади. Також існує потреба у збільшенні фінансування заходів з адаптації до зміни клімату та захисту від повеней, оскільки муніципалітети не можуть самостійно покрити всі необхідні інвестиції. Необхідно посилити самодопомогу та обізнаність населення про ризики.

Зміна клімату є центральним фактором, що впливає на ризики повеней.⁵ ПРВ активно розробляє стратегії адаптації, включаючи нову стратегію адаптації до зміни клімату з 110 заходами, спрямованими на кращий захист від повеней, посух та спеки. Ці стратегії включають підтримку муніципалітетів, громадян та підприємств через надання даних, інформації, консультацій та фінансування проектів.

Управління повенями в ПРВ передбачає участь широкого кола зацікавлених сторін. До них належать урядові органи (Міністерство навколишнього середовища, земельні уряди), муніципалітети, водні асоціації та об'єднання дамб, які відіграють центральну роль у плануванні та реалізації заходів. Також важливими є дослідницькі установи та університети, які надають наукову основу та розробляють нові технології. Неурядові організації, такі як NABU та BUND, активно виступають за природний захист від повеней та ренатуралізацію річок. Приватний сектор, включаючи страхові компанії, інженерні фірми та компанії, що надають технологічні рішення, є ключовими партнерами. Нарешті, громадяни та місцеві громади відіграють важливу роль у самозахисті та підвищенні обізнаності про ризики.

2.4 Пропоновані стартап-ідеї для екологічної безпеки в умовах повеней

Нижче представлено десять бізнес-ідей для стартапів, які можуть суттєво покращити екологічну безпеку та стійкість Північного Рейну-Вестфалії до повеней.

AI-Powered Hyper-Local Flood & Water Quality Forecasting (Гіперлокальне Прогнозування Повеней та Якості Води на Базі Штучного Інтелекту)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Критичний виклик коротких часів попередження для раптових паводків у малих водних об'єктах та міських районах, а також затримка виявлення погіршення якості води після повені.⁵ Існуючі

системи часто не мають необхідної деталізації та інтеграції в реальному часі для негайних, локалізованих загроз.

Основне інноваційне рішення: Розробка платформи на базі штучного інтелекту, яка інтегрує дані в реальному часі від щільної мережі IoT-сенсорів, розгорнутих у малих річках, міських дренажних системах та вразливих водозборах ПРВ. Ці сенсори контролюватимуть рівень води, потік, опади, вологість ґрунту та ключові параметри якості води. Інновація платформи полягає в її здатності надавати гіперлокальні, прогностичні оповіщення як про затоплення, так і про потенційні проблеми з якістю води (наприклад, хімічне забруднення, бактеріальні спалахи) з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Вона пропонуватиме дієві рекомендації муніципалітетам, аварійним службам та окремим домогосподарствам через зручний додаток.

Екологічний вплив та переваги: Завдяки швидкому реагуванню, це рішення значно зменшує екологічні збитки від забруднення та мінімізує ерозію ґрунту, дозволяючи своєчасно впроваджувати тимчасові бар'єри. Воно захищає біорізноманіття, попереджаючи про деградацію середовища існування, та забезпечує громадське здоров'я, гарантуючи безпеку джерел питної води. Включення параметрів якості води перетворює цінність пропозиції з простої системи попередження про повені на комплексну платформу екологічної безпеки та громадського здоров'я. Дослідження постійно вказують на серйозне забруднення води після повеней, спричинене промисловими об'єктами, каналізаційними стоками та витоками мазуту. Можливість прогнозувати як затоплення, так і потенційне поширення забруднюючих речовин у реальному часі надає значно більш всеосяжну та критично важливу послугу. Це дозволяє вживати цільових превентивних заходів, таких як завчасне закріплення хімічних резервуарів, та швидке проведення заходів з відновлення після повені, безпосередньо усуваючи каскадні екологічні та медичні наслідки, що робить це рішення незамінним.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Існує високий попит з боку муніципалітетів (особливо тих, що сильно постраждали у 2021 році, як-от Ерфтштадт, Штольберг), водоканалів, сільськогосподарського сектору та приватних власників

нерухомості. Проактивна позиція ПРВ щодо адаптації до зміни клімату та існуюча цифрова інфраструктура створюють сприятливе середовище для моделей B2B та B2C.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Значні початкові інвестиції у розгортання сенсорної мережі та розробку моделей ШІ; вирішення проблем конфіденційності та безпеки даних; забезпечення безперебійної сумісності з різноманітними існуючими муніципальними та регіональними системами; забезпечення широкого впровадження громадськістю та довіри до систем попередження.

"Sponge City" Urban Retrofit & Green Infrastructure Implementation (Модернізація міст за концепцією "місто-губка" та впровадження зеленої інфраструктури)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Поширене запечатування поверхонь у міських районах ПРВ, що значно перешкоджає природній інфільтрації води, посилює раптові паводки та виснажує запаси ґрунтових вод.¹ Це також сприяє ефекту міського теплового острова та зниженню міського біорізноманіття.

Основне інноваційне рішення: Стартап, що спеціалізується на цілісному проектуванні, плануванні та впровадженні концепцій "Міста-губки" як для існуючих міських районів, так і для нових забудов по всьому ПРВ. Це охоплює широкий спектр елементів зелено-блакитної інфраструктури: проникне покриття, зелені дахи та стіни, дощові сади, затримувальні ставки та відновлення міських водно-болотних угідь. Інновація полягає в пропонуванні інтегрованих, естетично привабливих та багатофункціональних рішень, що підвищують міську стійкість, сприяють біорізноманіттю та покращують загальну якість життя, використовуючи передові технології ГІС для оптимального просторового планування та оцінки впливу.

Екологічний вплив та переваги: Значно збільшує природну інфільтрацію води, тим самим зменшуючи поверхневий стік та пом'якшуючи ризик повеней; ефективно поповнює запаси ґрунтових вод; суттєво покращує міське біорізноманіття шляхом створення нових середовищ існування; природно фільтрує забруднюючі речовини з дощових вод; зменшує ефект міського теплового острова; та підвищує естетичну

привабливість та функціональність громадських просторів. Концепція "Міста-губки" пропонує переконливий економічний аргумент, який виходить далеко за межі чистої екології, роблячи її дуже привабливою для ширшого кола інвесторів та зацікавлених сторін. Дослідження чітко вказують, що "міста-губки" забезпечують відчутні економічні вигоди, такі як "зниження витрат на обслуговування" та "три- або навіть чотириразове збільшення вартості нерухомості в прилеглих районах". Це прямо контрастує з величезними фінансовими втратами, понесеними від традиційних повеней. Це демонструє, що природоорієнтовані рішення є не просто екологічним ідеалом чи регуляторним тягарем, а надійною економічною інвестицією. Стартап у цій сфері може ефективно продавати ці рішення не тільки як заходи захисту від повеней, а як невід'ємні компоненти інвестицій у міську регенерацію, що приносять значну віддачу від інвестицій. Ця багатогранна цінна пропозиція є вирішальною для залучення приватного фінансування та прискорення впровадження, значно розширюючи ринок за межі традиційних екологічних грантів.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Високий попит з боку муніципалітетів, відділів міського планування, забудовників, житлових асоціацій та великих корпоративних кампусів, розташованих у густонаселених районах ПРВ. Концепція тісно узгоджується зі стратегіями адаптації до зміни клімату ПРВ та має право на різні можливості фінансування ЄС.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Високі початкові капітальні інвестиції для великомасштабних проєктів; складна координація з численними муніципальними департаментами та приватними землевласниками; ретельне управління для пом'якшення потенційної джентрифікації в оновлених районах; забезпечення громадської згоди та вирішення питань довгострокового обслуговування.

Advanced Soil Health & Erosion Control for Agriculture (Передові Рішення для Здоров'я Ґрунту та Контролю Ерозії в Сільському Господарстві)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Значна ерозія ґрунту в сільськогосподарських районах через сильні дощі та неоптимальні практики

землекористування, що призводить до втрати родючого верхнього шару ґрунту, збільшення стоку осаду та поживних речовин у водні об'єкти, а також зниження здатності ґрунту до інфільтрації води.

Основне інноваційне рішення: Стартап, що пропонує інтегровані, керовані даними рішення для сталого пом'якшення наслідків повеней у сільському господарстві. Це включатиме інструменти точного землеробства, що використовують IoT-сенсори для моніторингу вологості ґрунту, рівня поживних речовин та ущільнення в реальному часі. Рекомендації на основі ШІ направлятимуть фермерів щодо оптимальних практик, таких як використання покривних культур, безвідвальне землеробство та сівозміна. Послуги також можуть включати картографування за допомогою дронів для виявлення зон високого ризику ерозії та надання підтримки у впровадженні контурної оранки, терасування та стратегічної посадки живоплотів або рослинних буферів.

Екологічний вплив та переваги: Суттєво зменшує ерозію ґрунту та стік поживних речовин, що призводить до покращення якості води в річках та ґрунтових водах; підвищує вміст органічної речовини в ґрунті та його водоутримувальну здатність, роблячи землю більш стійкою як до повеней, так і до посух; збільшує біорізноманіття в сільськогосподарських ландшафтах; зменшує залежність від хімічних речовин; і, зрештою, підвищує стійкість врожаю до екстремальних погодних явищ. Взаємозв'язок між сільськогосподарськими практиками та впливом повеней створює подвійну ринкову можливість для стартапів, які можуть одночасно вирішувати питання захисту та екологічного внеску. Сталі сільськогосподарські практики не тільки захищають фермерські господарства, але й сприяють загальному регіональному запобіганню повеням, забезпечуючи взаємовигідну ситуацію. Це також відповідає сільськогосподарській політиці ЄС, яка заохочує ерозійно-зменшувальне управління орними землями. Це підкреслює, що інвестиції в здоров'я ґрунту є не лише екологічно відповідальними, але й економічно вигідними для фермерів, оскільки вони підвищують стійкість господарств до екстремальних погодних умов, забезпечуючи довгострокову продовольчу безпеку та екологічну стабільність.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Фермери та сільськогосподарські кооперативи по всьому ПРВ, особливо ті, що працюють у схильних до повеней або горбистих регіонах. Рішення добре узгоджуються з існуючою сільськогосподарською політикою ЄС (наприклад, Cross Compliance) та відповідають зростаючому попиту на сталі методи ведення сільського господарства.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Подолання опору фермерів до впровадження нових технологій та практик; управління початковими інвестиційними витратами для фермерів; необхідність надійних освітніх програм та постійної підтримки; забезпечення безперебійної інтеграції з існуючими системами управління фермерськими господарствами.

Modular & Nature-Based Flood Barriers/Retention Systems (Модульні та Природоорієнтовані Бар'єри/Системи Утримання Води)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Потреба у гнучкому, швидко розгортаному та екологічно інтегрованому захисті від повеней, особливо для малих водних об'єктів та критичної інфраструктури. Традиційна "сіра" інфраструктура часто є недостатньою або екологічно шкідливою.

Основне інноваційне рішення: Розробка та впровадження інноваційних модульних протипаводкових бар'єрів, які швидко встановлюються/демонтуються, є багаторазовими та інтегруються з природними ландшафтними елементами (наприклад, проникні матеріали, рослинний дизайн). Це може включати мобільні бар'єри для швидкого розгортання та напівпостійні, природоорієнтовані системи утримання води, що покращують місцеві екосистеми (наприклад, невеликі водно-болотні угіддя, терасовані заплави). Інновація полягає в поєднанні швидкого розгортання з екологічним покращенням.

Екологічний вплив та переваги: Зменшує шкоду від повеней для екосистем та інфраструктури; мінімізує залежність від бетонних конструкцій; створює або відновлює природні середовища існування; покращує якість води через природну фільтрацію; зменшує викиди CO₂ порівняно з традиційними методами. Перехід від суто "сірих" до "зелено-сірих" або "природоорієнтованих" рішень є критично

важливою тенденцією в управлінні повенями. Підкреслення значного скорочення викидів CO₂ (наприклад, на 99,6% для бар'єрів NoFloods порівняно з мішками з піском 40) надає потужний аргумент на користь сталості, що приваблює до кліматичних цілей та потенційно відкриває додаткові джерела фінансування. Це позиціонує стартап як лідера в галузі сталої стійкості до повеней, а не просто як постачальника захисних рішень.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Високий попит з боку муніципалітетів, промислових об'єктів, приватних землевласників, аварійних служб та операторів інфраструктури в районах ПРВ, схильних до повеней.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Високі початкові виробничі витрати; логістичні складнощі для швидкого розгортання; громадське сприйняття нетрадиційних рішень; забезпечення довгострокової довговічності та обслуговування.

Wastewater Treatment Plant Flood Resilience & Circularity Solutions (Рішення для Стійкості Очисних Споруд та Циркулярної Економіки Води)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Вразливість критичної інфраструктури очищення стічних вод до затоплення, що призводить до забруднення водних об'єктів та ризиків для громадського здоров'я. Також недовикористані можливості циркулярної економіки в управлінні водними ресурсами.

Основне інноваційне рішення: Пропонувати комплексний пакет послуг для підвищення стійкості очисних споруд (ОС) до повеней та сприяння циркулярності. Це включає оцінку ризиків повеней, підняття критичного обладнання, встановлення бар'єрів та резервного живлення. Інновація поширюється на інтеграцію принципів циркулярної економіки: передові системи рециркуляції сірих вод для неполивних потреб (наприклад, зрошення, промислові процеси) та технології для перетворення осаду стічних вод на цінні ресурси (наприклад, біовугілля для покращення ґрунту, виробництво енергії).

Екологічний вплив та переваги: Запобігає скиданню неочищених стічних вод під час повеней, захищаючи водні екосистеми та джерела питної води; зберігає прісні

водні ресурси через повторне використання; зменшує відходи та сприяє відновленню ресурсів з осаду; знижує вуглецевий слід управління водними ресурсами. Зосередження на стійкості очисних споруд стосується не лише уникнення негайних катастроф, але й побудови довгострокової водної безпеки та ефективності використання ресурсів. Інтегруючи принципи циркулярної економіки, стартап одночасно вирішує численні екологічні виклики, перетворюючи відходи на цінність. Це позиціонує компанію як цілісного партнера з управління водними ресурсами, а не просто як службу захисту від повеней, що відповідає ширшим цілям сталості.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Державні та приватні водоканали, промислові підприємства з великим водоспоживанням та муніципалітети в ПРВ.³⁴

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Високі капітальні інвестиції для модернізації інфраструктури; регуляторні перешкоди для повторного використання води; громадське сприйняття переробленої води; технологічні складнощі перетворення осаду.

Community-Based Flood Preparedness & Digілокалізованої, дієвої інформації та скоординованої реакції громади під час повеней, що призводить до збільшення людських та економічних втрат. Потребує посилення обізнаності громадськості та здатності до самодопомоги.

Основне інноваційне рішення: Розробка цифрової платформи, яка створює "цифрові двійники" громад з високим ризиком, інтегруючи карти небезпеки повеней, дані сенсорів у реальному часі та оцінки вразливості, специфічні для громади. Платформа надаватиме персоналізовану інформацію про ризик повеней, маршрути евакуації, списки екстрених контактів та рекомендації щодо самодопомоги (наприклад, як використовувати протипаводкові бар'єри, як захистити майно). Вона також сприятиме каналам зв'язку між громадянами, місцевими органами влади та аварійними службами, а також дозволить проводити віртуальні симуляції повеней для навчання та підготовки.

Екологічний вплив та переваги: Зменшує вторинну шкоду навколишньому середовищу завдяки своєчасному закріпленню небезпечних матеріалів; мінімізує

кількість відходів, що утворюються від пошкодженого майна; сприяє підвищенню стійкості громади, опосередковано підтримуючи зусилля з відновлення навколишнього середовища. Надання громадянам локалізованих, дієвих даних змінює парадигму від централізованих попереджень до проактивної стійкості громади. Підхід "цифрового двійника" дозволяє динамічно оцінювати ризики та персоналізовано готуватися, виходячи за рамки загальних порад. Це не тільки зменшує прямі наслідки повеней, але й сприяє розвитку культури екологічного управління та колективних дій, що є життєво важливими для довгострокової екологічної безпеки.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Муніципалітети, місцеві агентства з управління надзвичайними ситуаціями, громадські об'єднання та страхові компанії в ПРВ.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Інтеграція даних з розрізнених джерел; забезпечення зручності використання та доступності для всіх демографічних груп; підтримка точності даних та оновлень у реальному часі; побудова довіри в громадах.

Post-Flood Environmental Remediation & Restoration Services (Послуги з екологічної ремедіації та відновлення після повеней)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Довгострокова екологічна шкода після повеней, включаючи забруднений ґрунт/воду, порушені екосистеми та затримку відновлення природних середовищ існування.

Основне інноваційне рішення: Спеціалізований постачальник послуг, що пропонує комплексні послуги з екологічної ремедіації та відновлення після повеней. Це включає швидку оцінку забруднення (наприклад, нафтою, хімікатами, важкими металами) , цільові операції з очищення з використанням передових методів біоремедіації, стабілізацію ґрунту для запобігання вторинній ерозії та екологічне відновлення пошкоджених заплав, водно-болотних угідь та річкових середовищ існування. Послуги також можуть включати моніторинг біорізноманіття та програми реінтродукції.

Екологічний вплив та переваги: Прискорює відновлення екосистем, запобігає довгостроковому поширенню забруднення, відновлює природні водорегулюючі можливості, покращує біорізноманіття та якість води. Масштаби повеней 2021 року виявили недостатність післяаварійного екологічного відновлення. Спеціалізована служба може перетворити реактивне очищення на стратегічне екологічне відновлення, створюючи новий ринок для спеціалізованих екологічних послуг. Це виходить за межі простого "виправлення" шкоди до активного "відбудови" екологічної стійкості, визнаючи, що природні системи є ключовими для майбутнього захисту від повеней.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Муніципалітети, регіональні водні органи, промислові землевласники та страхові компанії в ПРВ.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Високі експлуатаційні витрати на спеціалізоване обладнання та персонал; складне регуляторне середовище для очищення від забруднень; забезпечення довгострокового фінансування проектів відновлення; громадські очікування щодо швидкого відновлення.

Climate-Resilient Land Use Planning & Consulting (Консультування та планування землекористування, стійкого до зміни клімату)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Застаріле планування землекористування, що посилює ризики повеней (наприклад, забудова в заплавах, запечатування поверхонь), та відсутність інтегрованих стратегій адаптації до зміни клімату на місцевому рівні.

Основне інноваційне рішення: Консалтингова фірма, що спеціалізується на плануванні землекористування, стійкого до зміни клімату, та розробці політики для муніципалітетів та регіональних органів влади в ПРВ. Це включає проведення комплексних оцінок ризиків повеней з урахуванням сценаріїв зміни клімату, розробку "кліматично-стійких" правил зонування, консультування з питань сталого міського розвитку (наприклад, мандати на зелену інфраструктуру, вимоги до прониких поверхонь) та сприяння міжмуніципальній співпраці для інтегрованого управління водозбірними басейнами.⁵ Інновація полягає в перетворенні кліматичної науки на дієві політики планування та наданні підтримки у впровадженні.

Екологічний вплив та переваги: Зменшує майбутні ризики повеней, спрямовуючи забудову подалі від вразливих районів та сприяючи природоорієнтованим рішенням; захищає та відновлює природні заплави; покращує екосистемні послуги (наприклад, фільтрацію води, забезпечення середовища існування); сприяє довгостроковій екологічній стійкості. Катастрофа 2021 року виявила критичні недоліки в інтеграції захисту від повеней у планування землекористування, з конкретними прикладами, такими як інцидент з гравійним кар'єром Ерфтштадт-Блесем. Це підкреслює нагальну потребу в парадигмальному зсуві від реактивного захисту до проактивного, кліматично обґрунтованого просторового планування. Стартап у цій галузі може стати вирішальним партнером для урядів, допомагаючи їм впроваджувати законодавчо закріплені плани управління ризиками повеней⁵ та уникати майбутніх катастроф, тим самим створюючи довгостроковий, високоцінний ринок консалтингових послуг.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Муніципальні та регіональні відділи планування, агентства з розвитку земель та розробники великих інфраструктурних проєктів у ПРВ.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Подолання політичної інерції та опору зацікавлених сторін; складні правові та адміністративні рамки; потреба у високоспеціалізованих знаннях як у кліматичній науці, так і в міському плануванні; демонстрація відчутних довгострокових переваг для виправдання початкових витрат.

AI-Driven Early Warning for Infrastructure Vulnerability (Раннє попередження про вразливість інфраструктури на базі штучного інтелекту)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Критична інфраструктура (транспорт, енергетика, зв'язок) є дуже вразливою до пошкоджень від повеней, що призводить до широкомасштабних збоїв та значних економічних втрат.¹ Існуючі системи попередження часто зосереджуються на рівнях води, а не на прямому впливі на інфраструктуру.

Основне інноваційне рішення: Розробка платформи на базі штучного інтелекту, яка використовує прогностичну аналітику для оцінки вразливості конкретних

інфраструктурних об'єктів (доріг, мостів, електромереж, трубопроводів) до майбутніх повеней, враховуючи глибину води, швидкість потоку та тривалість. Вона інтегруватиме дані з прогнозів погоди, гідрологічних моделей, структурних датчиків та ГІС-картографування інфраструктури. Платформа видаватиме цільові оповіщення та рекомендуватиме превентивні дії (наприклад, зміну маршрутів руху, відключення ліній електропередач, розгортання тимчасових бар'єрів). Інновація полягає в її зосередженості на ризику, специфічному для активів, та дієвих стратегіях пом'якшення.

Екологічний вплив та переваги: Запобігає забрудненню навколишнього середовища від пошкодженої інфраструктури (наприклад, розливи нафти з електростанцій, витіки газу); зменшує кількість відходів від зруйнованих матеріалів; мінімізує збої в роботі основних служб, опосередковано підтримуючи зусилля з реагування на надзвичайні ситуації. Величезні економічні та людські втрати від пошкодження інфраструктури у 2021 році вказують на критичний пробіл у поточній готовності до повеней. Перехід від загальних попереджень про повені до оцінки вразливості конкретних активів та дієвих рекомендацій для операторів інфраструктури може запобігти катастрофічним збоєм та вторинним екологічним катастрофам. Це створює нішу для високоспеціалізованих, високоцінних B2B-рішень, які безпосередньо сприяють регіональній економічній стабільності та екологічній безпеці.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Оператори інфраструктури (наприклад, Deutsche Bahn, енергетичні компанії, муніципальні транспортні органи), промислові парки та агентства цивільного захисту в ПРВ.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Висока складність інтеграції різноманітних потоків даних; потреба в надійних прогностичних моделях для різних типів інфраструктури; проблеми кібербезпеки для даних критичної інфраструктури; регуляторні дозволи на автоматизовані попередження та дії.

Innovative Flood Waste Management & Resource Recovery (Інноваційне управління відходами повеней та відновлення ресурсів)

Основна екологічна проблема, що вирішується: Величезні обсяги змішаних

відходів, що утворюються під час та після повеней, створюючи значні екологічні та логістичні виклики (наприклад, забруднені уламки, небезпечні матеріали). Традиційне управління відходами не справляється з масштабом та складністю.

Основне інноваційне рішення: Стартап, що спеціалізується на підходах циркулярної економіки до управління відходами повеней. Це включає швидке розгортання мобільних сортувальних та переробних установок для відокремлення матеріалів, що підлягають вторинній переробці (наприклад, метали, пластмаси, деревина, заповнювачі), від забруднених уламків. Інновація полягає в розробці та впровадженні технологій для обробки забруднених матеріалів на місці (наприклад, термічна десорбція для забрудненого нафтою ґрунту, мобільні установки для очищення води) та вивченні шляхів для відновлення та повторного використання ресурсів (наприклад, перетворення деревних уламків на біоенергію, заповнювачів для будівництва).

Екологічний вплив та переваги: Значно зменшує навантаження на сміттєзвалища; запобігає поширенню забруднюючих речовин з відходів повеней; відновлює цінні ресурси; зменшує вуглецевий слід, пов'язаний з виробництвом нових матеріалів; сприяє принципам циркулярної економіки у відновленні після катастроф. Величезний обсяг відходів після повеней (та пов'язане з цим забруднення) є значним, часто недооціненим екологічним наслідком екстремальних погодних явищ. Застосовуючи принципи циркулярної економіки до відходів катастроф, стартап може перетворити величезну проблему на можливість для відновлення ресурсів та сталого відновлення. Це стосується не лише утилізації відходів, а й побудови більш стійкої та ресурсоефективної економіки після катастроф, зменшуючи майбутнє екологічне навантаження.

Ринковий потенціал та цільові клієнти в ПРВ: Муніципалітети, організації з надання допомоги при стихійних лихах, будівельні компанії, що займаються відновленням, та компанії з управління відходами в ПРВ.

Ключові виклики та міркування щодо впровадження: Високі капітальні інвестиції для спеціалізованого обладнання; складна логістика в зонах лиха; дотримання нормативних вимог щодо поводження з небезпечними відходами; пошук

життєздатних ринків для відновлених ресурсів.

Аналіз викликів, пов'язаних з повенями в Північному Рейні-Вестфалії, чітко вказує на зростаючу вразливість регіону до екстремальних погодних явищ, посилених зміною клімату. Наслідки повеней 2021 року продемонстрували багатогранний характер їх впливу – від прямих людських та економічних втрат до довгострокової екологічної деградації, включаючи забруднення води, ерозію ґрунту та втрату біорізноманіття. Існуючі стратегії, хоча й є всеосяжними, мають прогалини, особливо у сфері швидкого реагування, інтеграції даних та проактивного планування землекористування.

Запропоновані десять стартап-ідей представляють собою інноваційні підходи до вирішення цих проблем. Вони охоплюють широкий спектр рішень: від високотехнологічного прогнозування та моніторингу до природоорієнтованих інфраструктурних проектів та послуг з відновлення. Кожна ідея підкреслює не лише екологічну необхідність, але й значний економічний потенціал, що може залучити інвестиції та сприяти сталому розвитку. Наприклад, концепція "Міста-губки" демонструє, як екологічні рішення можуть одночасно підвищувати вартість нерухомості та знижувати експлуатаційні витрати, перетворюючи екологічні заходи на привабливі інвестиційні можливості. Аналогічно, застосування принципів циркулярної економіки до управління відходами після повеней перетворює проблему утилізації на можливість відновлення ресурсів та сталого відновлення.

Для успішного впровадження цих ідей та підвищення загальної екологічної безпеки Північного Рейну-Вестфалії в умовах повеней, рекомендується наступне:

- Сприяти державно-приватному партнерству: Уряд, муніципалітети та дослідницькі установи повинні активно співпрацювати зі стартапами та приватними компаніями для розробки, тестування та впровадження інноваційних рішень. Це дозволить поєднати державні ресурси з гнучкістю та інноваційним потенціалом приватного сектору.
- Оптимізувати механізми фінансування: Необхідно спростити доступ до фінансових ресурсів для проектів з адаптації до зміни клімату та захисту від повеней, особливо для муніципалітетів та малих і середніх підприємств. Це може

включати додаткові та більш цільові програми фінансування, а також спрощення процедур подання заявок.

- Сприяти міждисциплінарній співпраці та обміну даними: Ефективне управління повеннями вимагає інтеграції знань та даних з різних галузей – метеорології, гідрології, містобудування, сільського господарства, екології та інформаційних технологій. Створення централізованих платформ для обміну даними та координації зусиль є критично важливим.
- Інвестувати в дослідження та розробки (R&D): Постійні інвестиції в наукові дослідження та розробку нових технологій, таких як ШІ для прогнозування та природоорієнтовані рішення, є життєво важливими для підтримки лідерства в галузі екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату.
- Наголошувати на довгостроковій стійкості: Замість короткострокових заходів реагування, фокус має бути зміщений на побудову довгострокової стійкості, що включає інтеграцію захисту від повеней у всі аспекти планування землекористування, розвитку інфраструктури та управління природними ресурсами. Це дозволить не лише зменшити майбутні збитки, але й створити більш безпечне, здорове та процвітаюче середовище для жителів Північного Рейну-Вестфалії.

3 ПРИРОДООХОРОННІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ

3.1 Екологічна безпека та управління повенями у Північному Рейн-Вестфалії

Регіон Північний Рейн-Вестфалія (NRW), будучи однією з найбільш густонаселених земель Німеччини, постійно стикається зі зростаючими викликами, пов'язаними з повенями. Ці виклики посилюються зміною клімату, що призводить до збільшення частоти та інтенсивності екстремальних опадів. Катастрофічні повені 2021 року, які спричинили загибель 49 людей у NRW та завдали збитків на мільярди євро, яскраво продемонстрували недостатність традиційних інженерних підходів та нагальну потребу в інтегрованих природоохоронних рішеннях.

Цей звіт аналізує типові ризики повеней та їхні багатогранні екологічні наслідки, включаючи забруднення води, ерозію ґрунту та втрату біорізноманіття. Він досліджує еволюцію стратегій управління повенями від суто технічного захисту до комплексного управління ризиками, що поєднує "сіру" (інженерну) та "зелену" (природоохоронну) інфраструктуру. Представлені приклади розрахунків демонструють кількісну ефективність природоохоронних рішень, таких як відновлення заплав, зелені дахи, проникні поверхні та сталі сільськогосподарські практики, у зменшенні об'ємів стоку, підвищенні інфільтрації та покращенні якості води.

Аналіз виявляє, що, незважаючи на наявність розгалуженої законодавчої бази, ефективність заходів щодо захисту від повеней підринається складністю взаємодії зацікавлених сторін, нечіткістю відповідальності та недостатньою обізнаністю населення. Зростаюча частота екстремальних погодних явищ вимагає від NRW переходу до багатоаспектної стратегії адаптації, що охоплює весь водний цикл та землекористування.

Ключові рекомендації включають посилення інтеграції "сірої" та "зеленої" інфраструктури, вдосконалення систем моніторингу та прогнозування, підвищення

обізнаності населення та зміцнення міжвідомчої співпраці. Забезпечення сталого фінансування та прозорих механізмів управління знаннями є критично важливим для підвищення стійкості регіону до майбутніх кліматичних викликів.

Північний Рейн-Вестфалія (NRW) є одним із найбільш урбанізованих та густонаселених регіонів Німеччини, що робить його особливо вразливим до наслідків повеней. Зміна клімату значно посилює ці ризики, призводячи до збільшення ймовірності локальних сильних злив та екстремальних паводків.⁴ Ці кліматичні зміни проявляються не лише у зростанні інтенсивності опадів, але й у загальному зсуві погодних моделей, що вимагає адаптації до нових реалій.

Катастрофа в липні 2021 року стала переломним моментом, продемонструвавши руйнівну силу екстремальних погодних явищ. Тоді в NRW загинуло 49 людей, а загальні збитки в Німеччині сягнули 33.1 – 40.5 мільярдів євро. Ця подія підкреслила, що існуючі стратегії та інфраструктура виявилися недостатніми для протистояння таким масштабам стихії. Події 2021 року переконливо довели, що зростаюча частота та інтенсивність екстремальних погодних явищ, спричинених зміною клімату, є основним рушієм для переходу від традиційного підходу "контролю" до інтегрованого "управління ризиками" у сфері боротьби з повенями. Це не просто зміна термінології, а фундаментальне переосмислення філософії управління водними ресурсами, що виходить за рамки простих інженерних рішень.

3.2 Важливість інтегрованих природоохоронних рішень для екологічної безпеки

Традиційне управління повенями, яке історично базувалося на інженерних рішеннях, таких як будівництво дамб та каналізаційних систем, виявилось недостатнім для подолання зростаючих невизначеностей, спричинених зміною клімату. Сучасне розуміння проблеми вимагає парадигмального зсуву від суто технічного захисту до інтегрованого управління ризиками. Цей підхід є проактивним, комплементарним та сталим, спрямованим на зменшення не лише прямих

економічних збитків, але й довгострокового екологічного та соціального впливу.

Екологічна безпека в контексті повеней вимагає комплексних рішень, які не тільки зменшують ризики для людського життя та інфраструктури, але й активно захищають та відновлюють природні екосистеми. Природоохоронні рішення (Nature-Based Solutions, NbS) пропонують багатофункціональні переваги, що виходять за рамки простого запобігання затопленню. Вони сприяють покращенню якості води, збереженню біорізноманіття, поглинанню вуглецю та створенню більш привабливих і здорових міських та сільських ландшафтів.¹³ Інтеграція цих "зелених" підходів із традиційною "сірою" інфраструктурою є ключовим елементом для побудови стійкої та адаптивної системи управління повенями в NRW.

3.3 Типові ризики повеней та їх екологічний вплив

У Північному Рейн-Вестфалії розрізняють кілька типів повеней, кожен з яких має свої особливості та вимагає специфічних підходів до управління. Повені на великих річках, таких як Рейн, характеризуються повільним розвитком, що надає відносно достатньо часу для попередження та евакуації населення.⁴ Проте, високі рівні води можуть зберігатися протягом декількох тижнів, що створює довготривалі виклики для постраждалих районів.

Таблиця 3.1 –Матриця загроз

Потенціал забруднення	Фізичний вплив (глибина води)				
	1 $h < 0,5 \text{ м}$	2 $0,5 \text{ м} < h < 2 \text{ м}$	3 $2 \text{ м} < h < 3 \text{ м}$	4 $3 \text{ м} < h < 4 \text{ м}$	5 $> 4 \text{ м}$
1	1	1.5	2	2.5	3
2	1.5	2	2.5	3	3.5
3	2	2.5	3	3.5	4
4	2.5	3	3.5	4	4.5
5	3	3.5	4	4.5	5

На противагу цьому, повені на малих річках і струмках, а також "Sturzfluten" (раптові паводки), спричинені локальними інтенсивними опадами, є значно більш небезпечними через їхню швидкість та непередбачуваність. Ці події призводять до стрімкого зростання та падіння рівня води, залишаючи вкрай мало часу для реагування. Раптові паводки можуть перевантажувати міські каналізаційні системи, завдаючи значної шкоди територіям, що знаходяться поза безпосередніми руслами річок. Спостереження останніх років вказують на те, що ймовірність таких локальних сильних злив та екстремальних повеней зростає внаслідок зміни клімату.

Екологічні наслідки повеней у NRW є не лише прямими фізичними руйнуваннями, а й комплексними та довгостроковими, що вимагає багатовимірного підходу до рішень.

Забруднення води: Повені можуть призвести до масового потрапляння забруднюючих речовин у поверхневі та підземні води. Це включає промислові відходи, сільськогосподарські хімікати, нафтопродукти, такі як мазут з опалювальних баків, а також поживні речовини та важкі метали, що вимиваються з ґрунту. Наприклад, під час повеней у липні 2021 року в Рейні поблизу Бад-Хоннефа було зафіксовано підвищені концентрації мазуту та дизельного палива (до 50 мікрограмів на літр). Це забруднення значно погіршує якість питної води та негативно впливає на водні екосистеми.

Ерозія ґрунту: Сильні зливи та підвищена кінетична енергія дощових крапель призводять до руйнування ґрунтових частинок та їх інтенсивного змивання.⁶ Це може викликати зсуви, селеві потоки та значну втрату цінного верхнього шару ґрунту. Наслідком ерозії також є евтрофікація водойм через надходження поживних речовин та забруднення ґрунтових вод.

Вплив на біорізноманіття: Затоплення екосистем, особливо тих, що не пристосовані до тривалих періодів під водою, може призвести до пригнічення або загибелі низки видів, включаючи рибу, молюсків та амфібій. Крім того, надмірна вологість ґрунтів та загальна стагнація води після повеней можуть сприяти поширенню хвороб та шкідників, таких як цвіль, що призводить до загального скорочення біорізноманіття.

Таблиця 3.2 – Критерії оцінки екологічної чутливості рецепторів, пов'язаних з водою

Масштаб		Критерій чутливості	Рецептори навколишнього середовища
Кількісний	Якісний		Опис
1	низький	низька екологічна чутливість	Залежні від води території охорони птахів, інші (різні інші невизначені рецептори навколишнього середовища)
2	проміжний	проміжна екологічна чутливість	Охоронні території, поверхневі водойми (ВРД), середовища існування флори та фауни, що залежать від води
3	високий	висока екологічна чутливість	Заповідні зони для питної води та джерел води

Повені завдають колосальних збитків критичній інфраструктурі. Це включає руйнування транспортних мереж, будівель, а також систем водопостачання та водовідведення. У 2021 році, наприклад, близько 40 очисних споруд у NRW постраждали від затоплення, зворотного стоку або відключення електроенергії, хоча більшість з них були оперативно відновлені.¹⁷ Однак, перебої у водопостачанні, як це сталося в Ешвайлері, були значними та вимагали тривалого відновлення.

Катастрофа в липні 2021 року в NRW та Рейнланд-Пфальці стала наслідком безпрецедентних опадів, що випали на вже насичені ґрунти. У деяких районах за 24 години випало до 150 літрів дощу на квадратний метр, що значно перевищило середньомісячні показники. Однак, масштаб трагедії був посилений не лише екстремальністю опадів, а й підкреслив вразливість, спричинену антропогенними факторами. Щільна забудова, особливо у безпосередній близькості до річок, великі площі ущільнення ґрунту та відсутність достатніх ретенційних площ значно перешкоджали поглинанню води, що призвело до посилення повеней. Це вказує на критичну роль землеустрою та містобудування у зниженні ризиків.

Загальні збитки в Німеччині від цієї події оцінюються від 33.1 до 40.5 мільярдів євро, причому найбільша частина припала на приватні домогосподарства (14.0 млрд євро), будівельний сектор (6.9 млрд євро) та транспортну інфраструктуру (6.8 млрд євро). Ці цифри демонструють колосальний економічний тягар, який несуть такі

катастрофи.

Шкала екологічної значущості		Загроза*				
		-----▶				
		Низький		Високий		
Екологічна чутливість	Тип заповідної території	1	2	3	4	5
Низький	Залежні від води території охорони птахів, інші (різні інші невизначені об'єкти охорони навколишнього середовища)	1	1.5	2	2.5	3
Середній рівень	Водозалежні середовища існування флори та фауни, поверхневі водойми	1.5	2	2.5	3	3.5
Високий	Заповідні зони для питної води та джерел води	2	2.5	3	3.5	4

* Загроза = (потенціал забруднення + категорія рівня води) / 2

Категорія пошкодження (DC)	низький	Посередник	високий
----------------------------	---------	------------	---------

Рисунок 3.1 – Оцінка екологічної шкоди виводиться з матриці загроз та екологічної чутливості

Крім матеріальних збитків, повені 2021 року виявили значні прогалини у реагуванні на прогнози та системи попередження. Незважаючи на наявність передових метеорологічних систем, які могли передбачити сильні опади за кілька днів, недоліки в комунікації та координації перешкоджали ефективній адаптації та запобіганню збиткам. Це підкреслює, що екологічні наслідки повеней є не лише прямими (фізичні руйнування), а й комплексними та довгостроковими, включаючи хімічне забруднення, деградацію ґрунтів та втрату біорізноманіття, що вимагає багатовимірного підходу до рішень.

3.4 Законодавча база та існуючі стратегії захисту від повеней у ЄС

Законодавча база Німеччини, зокрема Закон про водне господарство (Wasserhaushaltsgesetz, WHG), встановлює фундаментальні принципи управління

водними ресурсами та захисту від повеней. Згідно з § 5 Abs. 2 WHG, кожна особа, яка може постраждати від повеней, зобов'язана вживати відповідних запобіжних заходів для захисту від несприятливих наслідків повеней та мінімізації збитків у межах можливого та розумного. Цей принцип підкреслює індивідуальну відповідальність поряд з державними заходами.

На європейському рівні, Директива ЄС про оцінку та управління ризиками повеней (EG-HWRM-RL) відіграє ключову роль у формуванні національних стратегій. Вона вимагає від держав-членів систематичного проведення попередньої оцінки ризиків повеней, створення карт небезпеки та ризиків, а також розробки планів управління ризиками для всіх річкових басейнів. Ці плани повинні переглядатися кожні шість років. Ця директива була імплементована у федеральне законодавство Німеччини, забезпечуючи єдиний підхід до управління ризиками повеней.

Закон про покращення превентивного захисту від повеней (Hochwasserschutzgesetz) від 3 травня 2005 року, який набрав чинності 10 травня 2005 року, вніс важливі зміни до WHG та Будівельного кодексу. Зокрема, він передбачає законодавче визначення зон затоплення, які землі повинні офіційно встановлювати протягом п'яти років після набрання чинності закону на основі 100-річних паводків (HQ 100). Хоча ця норма не є суттєвою зміною до чинного законодавства NRW, вона посилює правову основу для виділення таких зон.

Північний Рейн-Вестфалія розробила власну комплексну концепцію захисту від повеней у середині 1990-х років, яка постійно оновлюється та переслідує цілісний підхід до управління ризиками. Ця концепція включає низку інструментів та заходів: Плани дій щодо повеней (HW-AP): Для 25 схильних до повеней водних шляхів у NRW з початку 2000-х років були розроблені Плани дій щодо повеней. Ці плани створюються у координації з відповідними муніципалітетами, округами та асоціаціями, і їх зміст доноситься до громадян через брошури та інтернет.

Карти небезпеки повеней (Hochwassergefahrenkarten): Ці карти розроблені для інформування населення про зони, які можуть бути затоплені під час "столітніх" паводків. Вони слугують важливим інструментом для превентивних заходів та підготовки населення.

Система інформування та попередження про повені (Hochwassermelddienst): Добре функціонуюча система прогнозування повеней є одним із найважливіших інструментів превентивного захисту. LANUV інформує громадськість про поточну ситуацію з повенями через свій веб-сайт, а дані водомірних постів доступні через додаток "MeinePegel".⁴ Для Рейну в Рейнланд-Пфальці та NRW повідомлення про повені централізовано надходять через Центр повідомлень про повені в Майнці. Ведеться інтенсивна робота над покращенням прогнозування повеней для малих водних об'єктів, експериментуючи з використанням метеорологічних радарів для висновків про паводкові стоки з вимірювань дощу.

Ефективне управління ризиками повеней у NRW вимагає злагодженої співпраці багатьох зацікавлених сторін:

Державні органи: Міністерство навколишнього середовища, сільського господарства, природи та захисту прав споживачів NRW (MULNV) відіграє провідну роль у розробці політики та координації.⁴ Окружні уряди (Bezirksregierungen) та Державне агентство природи, навколишнього середовища та захисту прав споживачів (LANUV) відповідають за імплементацію та моніторинг.

Муніципалітети та місцеві органи влади: Відіграють центральну роль в управлінні ризиками повеней на місцевому рівні. Їхні обов'язки включають розробку планів, інформування населення, координацію надзвичайних ситуацій та забезпечення відповідної забудови.

Водогосподарські асоціації та об'єднання: Співпрацюють у розробці планів дій, управлінні водними ресурсами та реалізації заходів захисту від повеней.

Громадські організації: Такі як NABU та BUND, активно беруть участь у комісіях з питань захисту від повеней, надають експертну думку та адвокатують природні рішення.

Приватні особи та підприємства: Зобов'язані вживати заходів самозахисту та розглядати страхування від стихійних лих.

Метеорологічні служби: Надають ключові дані та прогнози для систем раннього попередження.

Незважаючи на наявність розгалуженої законодавчої бази та стратегічних

планів у NRW, їх ефективність підривається складністю взаємодії зацікавлених сторін, нечіткістю відповідальності та недостатньою обізнаністю населення. Наприклад, під час повеней 2021 року, незважаючи на попередження, значна частина населення не очікувала настільки сильного затоплення або не мала чітких інструкцій щодо дій. Це вказує на те, що навіть найкращі технічні та природоохоронні рішення не можуть бути ефективними без адекватного людського фактора – обізнаності, підготовки та чітких інструкцій. Це не просто недолік системи, а глибока проблема взаємодії між технологіями, управлінням та суспільством, що вимагає посилення координації та комунікації, а не лише розробки нових законів.

3.5 Інженерні та технічні рішення для забезпечення екологічної безпеки

Традиційні інженерні рішення залишаються важливим компонентом у комплексній стратегії захисту від повеней у Північному Рейн-Вестфалії. Ці заходи спрямовані на безпосереднє управління водними потоками та захист населених пунктів та інфраструктури.

Будівництво та перенесення дамб: Одним із ключових заходів є будівництво та стратегічне перенесення дамб. На Рейні, наприклад, заплановано сім перенесень дамб, а також створення чотирьох керованих зон утримання води. Ці заходи дозволять створити додатковий об'єм утримання води до 140 мільйонів кубометрів на площі близько 3325 гектарів. Метою є зниження рівня води та затримка піку повені, що надає більше часу для реагування та зменшує руйнівні наслідки для нижніх ділянок річки.

Будівництво водосховищ та управління затримуючими просторами у водосховищах: Водосховища та спеціально керовані затримуючі простори в існуючих водосховищах є ще одним важливим інструментом. Ці споруди допомагають тимчасово зберігати надлишкову воду під час паводків, контролюючи її вивільнення та зменшуючи пікові навантаження на річкову систему.

Сучасні інженерні рішення для захисту від повеней у NRW еволюціонують від статичних "сірих" інфраструктурних об'єктів до більш динамічних, технологічно

інтегрованих та локалізованих систем, що відображає адаптацію до викликів швидких та непередбачуваних паводків.

Покращення прогнозування: Ведеться інтенсивна робота над покращенням прогнозування повеней, особливо для малих водних об'єктів, де час попередження є критично коротким. Експериментується з використанням метеорологічних радарів для висновків про паводкові стоки з вимірювань дощу, що дозволяє значно подовжити час попередження.

Інформаційні послуги: Державне агентство природи, навколишнього середовища та захисту прав споживачів (LANUV) інформує громадськість про поточну ситуацію з повенями через свій веб-сайт, а дані водомірних постів доступні через додаток "MeinePegel". Це забезпечує доступ до актуальної інформації для широкого загалу.

Штаби командування: Бундесвер розглядає створення спеціальних штабів, які дозволяють вчасно виводити інфраструктуру з небезпечних зон або захищати її від впливу стихійних лих.

AI-базовані платформи: Німецькі технологічні компанії розробляють інноваційні AI-базовані платформи раннього попередження, спеціально адаптовані для малих річок та вразливих водозборів. Ці платформи інтегрують дані з IoT-датчиків, метеорологічних служб та інших джерел для надання прогнозів у реальному часі та карт впливу, що дозволяє швидше та точніше реагувати на загрози.

Окрім масштабних інженерних проектів, важливу роль відіграють заходи на рівні окремих домогосподарств та інноваційні, гнучкі рішення.

Самозахист домогосподарств: Власникам нерухомості надаються конкретні рекомендації щодо захисту своїх об'єктів від раптових паводків. Це включає встановлення зворотних клапанів для запобігання проникненню води через каналізацію, зберігання цінних речей поза підвалами, встановлення порогів біля вікон та дверей підвалів, регулярне очищення каналізаційних стоків від сміття та розміщення комунікацій (електрика, газ, опалення) вище рівня підвалів.

Цифрові інструменти для готовності: Для підвищення готовності населення до повеней розробляються та впроваджуються цифрові інструменти. Додатки, такі як FEMA Flood Map Service Center, FloodCheck-App та Warn-App NINA, надають

актуальну інформацію про зони затоплення, рівні води та попередження, дозволяючи громадянам краще оцінювати ризики та вживати превентивних заходів.

Інноваційні мобільні бар'єри: Місто Райне в NRW є прикладом впровадження гнучких та швидкорозгортаних рішень. Там використовується інноваційна мобільна стіна, розроблена в Мюнстері, яка може бути швидко встановлена лише двома співробітниками для закриття прогалин у захисних спорудах.³⁶ Компанії, такі як NoFloods та Aggeres, пропонують різноманітні мобільні бар'єри для швидкого та ефективного захисту критичної інфраструктури та населених пунктів, що є особливо важливим для реагування на раптові паводки. Цей перехід від "масивного будівництва" до "інтелектуальних систем" та "швидких розгортань" є ключовим трендом у сучасному захисті від повеней.

3.6 Природоохоронні рішення та приклади їх розрахунку

Природоохоронні рішення (NbS) визнані економічно ефективними альтернативами або доповненнями до традиційної "сірої" інфраструктури. Вони забезпечують більшу стійкість у довгостроковій перспективі та надають безліч додаткових переваг, таких як покращення якості води, збереження біорізноманіття, можливості для відпочинку та поглинання вуглецю.

Відновлення заплав є не лише екологічно корисною, а й кількісно вимірною стратегією зменшення ризиків повеней, яка може бути інтегрована в комплексне гідрологічне моделювання для обґрунтування інвестицій та оптимізації дизайну.

Принципи відновлення заплав та ренатурації річок полягають у наданні річкам більшого простору, відновленні їхніх природних меандрів та заплав, а також збільшенні шорсткості русла та заплави. Це дозволяє воді розливатися та сповільнювати потік, тим самим зменшуючи пікові рівні повеней нижче за течією. Цей підхід є протилежним до традиційного спрямлення та укріплення річок, яке прискорює потік води та збільшує ризик затоплення нижче за течією.

Таблиця 3.3 – Порівняння традиційних та природоохоронних рішень для захисту від повеней

Критерій	Традиційні рішення	інженерні рішення	Природоохоронні рішення (NbS)
Тип рішення	Дамби, водосховища, каналізаційні системи, укріплення берегів		Відновлення заплав, зелені дахи, проникні поверхні, водно-болотні угіддя, управління ґрунтами, ренатурація річок
Основна функція	Зменшення затоплення, утримання води, відведення води		Утримання/інфільтрація води, зменшення поверхневого стоку, очищення води, поповнення ґрунтових вод, підтримка біорізноманіття
Ключові екологічні ко-вигоди	Обмежені; можуть мати негативний вплив (наприклад, фрагментація річок, зміна природних екосистем)		Покращення якості води, відновлення природних середовищ існування, збільшення біорізноманіття, поглинання вуглецю, зниження міської температури ("острів тепла")
Економічна ефективність (загальна)	Високі капітальні витрати, значні регулярні витрати на обслуговування та ремонт		Часто нижчі капітальні витрати, менші експлуатаційні витрати, додаткові економічні вигоди (наприклад, підвищення вартості нерухомості, рекреаційний потенціал)
Вимоги до обслуговування	Високі, спеціалізовані, часто механізовані		Часто нижчі, більш природні процеси, можуть вимагати ландшафтного догляду
Гнучкість/Адаптивність до зміни клімату	Обмежена; вимагає значних модифікацій для адаптації до нових кліматичних умов		Висока; адаптується до мінливих умов, працює з природними процесами, може бути масштабована

Таблиця 3.4 – Огляд гідрологічних моделей для оцінки впливу рішень

Назва моделі	Основне застосування	Ключові параметри (приклади)	Сильні сторони	Обмеження/Виклики	Приклади застосування (у звіті)
HEC-HMS	Моделювання опадів-стоку, формування стоку, проходження стоку по водозбору	Curve Number (CN), початковий дефіцит вологи, коефіцієнт шорсткості Меннінга (Manning's n)	Широко використовується, відкритий код, інтеграція з ГІС, оцінка пікового стоку та об'єму інфільтрації	Вимоги до даних, необхідність калібрування, обмеження для екстремальних подій	Відновлення заплав, зелені дахи, проникні поверхні, управління ґрунтами
HEC-RAS	Гідравліка річок, моделювання затоплення, глибина та швидкість потоку	Коефіцієнт шорсткості Меннінга (Manning's n), геометрія русла та заплави, цифрова модель рельєфу (DEM)	Моделювання 1D/2D потоків, візуалізація зон затоплення, оцінка впливу на інфраструктуру	Складність для неспеціалістів, чутливість до вхідних даних, не завжди враховує біологічні процеси	Відновлення заплав
SWMM	Управління зливовими водами, моделювання міського стоку, якість води	Параметри шарів зелених дахів/проникних поверхонь (товщина, пористість, провідність), коефіцієнти забруднення	Комплексне моделювання міських систем, оцінка якості води, вбудовані модулі для LID (Low Impact Development)	Вимоги до деталізації даних, складність калібрування для великих територій	Зелені дахи, проникні поверхні, концепція "міста-губки"
RUSLE	Оцінка ерозії ґрунту від дощової ерозії та поверхневого стоку	R (ерозійність опадів), K (ерозійність ґрунту), LS (довжина та крутизна схилу), C (управління покривом), P (підтримуючі практики)	Проста у використанні, широко визнана, дозволяє кількісно оцінити вплив сільськогосподарських практик	Емпірична модель, не враховує всі типи ерозії, потребує локальних даних для факторів C і P	Управління ґрунтами, сталі сільськогосподарські практики

Екологічні переваги таких заходів є численними. Відновлення заплав сприяє значному покращенню якості води, зокрема через процеси денітрифікації (перетворення нітратів на азот) та розкладання органічних речовин. Це також призводить до відновлення природних середовищ існування та збільшення біорізноманіття, оскільки створюються умови для розвитку різноманітних видів рослин і тварин, які залежать від динаміки річкових систем. Крім того, відновлені заплави сприяють поповненню ґрунтових вод, що є важливим для підтримки водного балансу регіону.

Приклад розрахунку об'єму утримання води.

Гідрологічні моделі, такі як HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) та HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), широко використовуються для моделювання гідрологічних процесів та оцінки впливу природоохоронних рішень на повені. HEC-HMS моделює формування стоку та його проходження по водозбору, тоді як HEC-RAS моделює гідравліку русла річки, включаючи глибину, швидкість та площу затоплення.

Оцінка об'єму утримання води заплавою може бути проведена за допомогою цифрових моделей рельєфу (DEM) та моделювання затоплення. Дослідження показують, що відновлення заплав може значно збільшити об'єм утримання води. Наприклад, один акр водно-болотних угідь може утримувати близько 1 мільйона галонів (приблизно 3 акр-фути) води під час повеней. Для річки Червелл у Великій Британії відновлення русла річки до доінженерних розмірів зменшило піковий стік на 10-15% та збільшило рівень води в заплаві на 0.5-1.6 м.

Приклад розрахунку об'єму утримання води:

Припустимо, у Північному Рейн-Вестфалії планується відновити ділянку заплави вздовж річки.

Визначення площі відновленої заплави.

Припустимо, площа відновленої ділянки заплави становить 100 гектарів (що дорівнює 1 км² або 1 000 000 м²).

Оцінка середньої глибини затоплення.

На основі гідравлічного моделювання (наприклад, за допомогою HEC-RAS) або

польових даних попередніх подій, припустимо, що середня глибина затоплення на цій відновленій заплаві під час 100-річної повені становитиме 1 метр.

Розрахунок об'єму утримання.

Об'єм (V) = Площа (A) × Середня глибина (H)

$V = 100 \text{ гектарів} \times 10\,000 \text{ м}^2/\text{гектар} \times 1 \text{ м} = 1\,000\,000 \text{ м}^3$.

Оцінка впливу на піковий стік.

Цей об'єм утримання води може бути інтегрований у гідрологічну модель (наприклад, HEC-HMS) для оцінки зменшення пікового стоку нижче за течією. Дослідження показують, що такі заходи можуть зменшити піковий стік на 10-15%.⁵³

Цей приклад демонструє, як інженерні моделі можуть кількісно оцінювати екологічні рішення, перетворюючи "зелені" ініціативи з концептуальних на інженерно-обґрунтовані.

3.7 Зелені дахи та проникні поверхні

Зелені дахи та проникні поверхні є не просто естетичними елементами міського середовища, а мають значний, кількісно вимірний гідрологічний вплив на зменшення поверхневого стоку та покращення якості води, що вимагає точного інженерного моделювання для оптимізації їх дизайну та інтеграції в міську інфраструктуру.

Зелені дахи: Ці системи значно зменшують поверхневий стік з дахів, перехоплюючи від 15% до 90% дощової води. Вони поглинають приблизно 50-60% води у свій субстрат та рослинний покрив. Крім гідрологічних переваг, зелені дахи зменшують навантаження на злизові системи, покращують якість води шляхом природної фільтрації та сприяють охолодженню міського середовища, зменшуючи ефект "острова тепла".

Проникні поверхні: Такі покриття, як проникний асфальт або бруківка, дозволяють дощовій воді просочуватися безпосередньо в ґрунт, а не стікати по поверхні. Це значно зменшує поверхневий стік та сприяє поповненню ґрунтових вод. Крім того, проникні поверхні покращують якість зливових вод, фільтруючи

забруднення, та можуть сприяти зниженню міської температури.

Для кількісної оцінки впливу зелених дахів та проникних поверхонь використовуються гідрологічні моделі. EPA National Stormwater Calculator (SWC) застосовує модель SWMM (Storm Water Management Model) для оцінки річного обсягу та частоти стоку з ділянки, враховуючи зелену інфраструктуру. SWMM дозволяє моделювати різні практики низького впливу (LID), такі як зелені дахи, дощові сади та проникні покриття, оцінюючи їх ефективність у зменшенні стоку та забруднень. Моделі MIKE+ та MODFLOW-URBAN також використовуються для симуляції зелених рішень та їх впливу на міський водний цикл.

Приклад розрахунку зменшення стоку зеленим дахом

Припустимо, необхідно оцінити зменшення об'єму стоку з даху будівлі після встановлення зеленого даху.

Визначення площі даху та інтенсивності опадів.

Припустимо, площа даху становить 200 м². Інтенсивність опадів для розрахункової події становить 50 мм (0.05 м).

Визначення коефіцієнта поглинання зеленого даху. Зелені дахи поглинають 50-60% стоку.⁵⁵ Для цього прикладу візьмемо середнє значення 55%.

Розрахунок об'єму стоку без зеленого даху (базовий сценарій).

Об'єм ($V_{\text{без}}$) = Площа × Інтенсивність опадів = 200 м² × 0.05 м = 10 м³.

Розрахунок об'єму стоку із зеленим дахом.

Об'єм ($V_{\text{з дахом}}$) = $V_{\text{без}} \times (1 - \text{Коефіцієнт поглинання}) = 10 \text{ м}^3 \times (1 - 0.55) = 4.5 \text{ м}^3$.

Розрахунок зменшення об'єму стоку.

Зменшення об'єму = $V_{\text{без}} - V_{\text{з дахом}} = 10 \text{ м}^3 - 4.5 \text{ м}^3 = 5.5 \text{ м}^3$.

Приклад розрахунку інфільтрації проникним покриттям:

Припустимо, необхідно оцінити, скільки води може інфільтрувати через проникне покриття.

Визначення параметрів шару зберігання.

Припустимо, шар гравію під проникним покриттям має товщину 0.3 м (300 мм) та пористість 30%.

Розрахунок об'єму зберігання.

Об'єм зберігання на 1 м² площі покриття = Товщина шару × Пористість = 0.3 м × 0.3 = 0.09 м³ води на 1 м² площі.

Визначення швидкості інфільтрації ґрунту. Припустимо, швидкість інфільтрації ґрунту під покриттям становить 10 мм/год (0.01 м/год).

Розрахунок часу дренажу (drawdown time).

Час дренажу = Об'єм зберігання / Швидкість інфільтрації = 0.09 м / 0.01 м/год = 9 годин.

Ці розрахунки показують, що зелені дахи та проникні поверхні є не просто естетичними елементами, а мають значний, кількісно вимірний гідрологічний вплив на зменшення поверхневого стоку та покращення якості води. Це вимагає точного інженерного моделювання для оптимізації їх дизайну та інтеграції в міську інфраструктуру, як це було показано в кейс-стаді в Бохумі.

3.8 Управління ґрунтами та сталі сільськогосподарські практики

Сталі сільськогосподарські практики є фундаментальним, але часто недооціненим компонентом екологічної безпеки від повеней, оскільки вони безпосередньо впливають на здоров'я ґрунту, що є ключовим для водоутримання та інфільтрації. Їхній вплив може бути кількісно оцінений за допомогою моделей ерозії.

Впровадження консерваційного землеробства, що включає нульовий обробіток ґрунту, використання покривних культур, сівозміну, контурну оранку, терасування та агролісівництво, є ключовим для покращення здоров'я ґрунту. Ці практики зберігають структуру ґрунту, збільшують вміст органічних речовин та значно покращують інфільтрацію води.

Переваги таких підходів включають значне зменшення ерозії ґрунту, підвищення водоутримуючої здатності ґрунту, зниження поверхневого стоку та покращення якості води за рахунок зменшення вимивання поживних та шкідливих речовин. Наприклад, покривні культури діють як природний бар'єр проти паводкових вод і допомагають утримувати вологу в ґрунті, мінімізуючи шкоду від екстремальних

повеней.

Приклад розрахунку зменшення ерозії

Універсальне рівняння втрат ґрунту (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) є широко використовуваною емпіричною моделлю для оцінки середньорічних втрат ґрунту від дощової ерозії та поверхневого стоку. Рівняння має вигляд: $A = R \times K \times LS \times C \times P$, де A – середньорічна втрата ґрунту, R – ерозійність опадів, K – ерозійність ґрунту, LS – фактор довжини та крутизни схилу, C – фактор управління покривом, P – фактор підтримуючих практик. Природоохоронні рішення впливають на фактори C та P .

Приклад розрахунку зменшення ерозії (фактор C):

Фактор C (Cover-Management Factor) відображає ступінь захисту ґрунту рослинним покривом та методами управління. Його значення варіюється від майже 0 (для добре захищеного ґрунту) до 1 (для голої землі).

Визначення базового фактора C (без заходів).

Для голої (необробленої) землі фактор C зазвичай приймається як 1.0.

Визначення фактора C для консерваційного землеробства. Для кукурудзи з нульовим обробітком ґрунту та високою врожайністю (наприклад, 150 бушелів/акр) фактор C може становити 0.02.

Розрахунок відсотка зменшення ерозії за рахунок фактора C .

$$\text{Зменшення} = ((C_{\text{базовий}} - C_{\text{новий}}) / C_{\text{базовий}}) \times 100\%$$

$$\text{Зменшення} = ((1.0 - 0.02) / 1.0) \times 100\% = 98\%.$$

Цей розрахунок показує, що перехід на нульовий обробіток ґрунту може зменшити потенційні втрати ґрунту на 98% лише за рахунок фактора C .

Приклад розрахунку зменшення ерозії (фактор P):

Фактор P (Support Practice Factor) враховує вплив підтримуючих практик, таких як контурна оранка або терасування.

Визначення базового фактора P (без підтримуючих практик).

Для ділянки без контурування або терасування фактор P зазвичай приймається як 1.0.

Визначення фактора P для контурної оранки. Для контурної оранки фактор P

може варіюватися від 0.5 до 0.6.⁷⁴ Для цього прикладу візьмемо значення 0.5.

Розрахунок відсотка зменшення ерозії за рахунок фактора Р.

$$\text{Зменшення} = ((P_{\text{базовий}} - P_{\text{новий}}) / P_{\text{базовий}}) \times 100\%$$

$$\text{Зменшення} = ((1.0 - 0.5) / 1.0) \times 100\% = 50\%.$$

Додатково, буферні смуги вздовж річок, що є природоохоронним рішенням, можуть зменшити ерозію ґрунту на 40% у масштабах водозбору.

Ці приклади демонструють, що управління ґрунтами – це не лише про продуктивність сільського господарства, а й про природну інфраструктуру, яка зменшує ризик повеней, і що ці переваги можуть бути обґрунтовані числовими даними.

3.9 Відновлення водно-болотних угідь та концепція "міста-губки"

Концепція "міста-губки" та відновлення водно-болотних угідь є не лише стратегіями управління повенями, а й багатофункціональними природоохоронними рішеннями, які забезпечують значне покращення якості води та біорізноманіття, що може бути кількісно підтверджено за допомогою специфічних формул та передових моделей.

Водно-болотні угіддя: Водно-болотні угіддя діють як природні губки, поглинаючи та повільно вивільняючи надлишкову воду, тим самим значно зменшуючи пікові стоки під час повеней. Вони також відіграють ключову роль у покращенні якості води через природні процеси фільтрації, видаляючи забруднюючі речовини та надлишок поживних речовин. Крім того, водно-болотні угіддя поповнюють ґрунтові води та створюють життєво важливі середовища існування для різноманітних видів рослин і тварин, сприяючи збереженню біорізноманіття.

Концепція "міста-губки": Ця концепція є цілісним підходом до міського водного менеджменту, що передбачає зберігання зливової води там, де вона випадає, а не її швидке відведення. Це досягається за допомогою "блакитно-зеленої" інфраструктури, такої як зелені дахи, дощові сади, проникні поверхні, водно-болотні угіддя та ставки. Метою є зменшення навантаження на традиційні каналізаційні

системи, покращення якості води, підвищення біорізноманіття та покращення якості життя містян за рахунок створення більш зелених та привабливих просторів.

3.10 Приклад оцінки ефективності видалення забруднюючих речовин

Ефективність очищення стічних вод у штучних водно-болотних угіддях може бути кількісно оцінена. Загальна формула для вимірювання відсотка ефективності видалення забруднюючих речовин у водно-болотних угіддях виглядає так: % ефективності видалення = $[(\sum m_i - m_o) / \sum m_i]$, де m_i – вхідна концентрація забруднюючої речовини, а m_o – вихідна концентрація. Дослідження також використовують передові моделі машинного навчання для прогнозування ефективності видалення таких забруднюючих речовин, як аміачний азот, загальний азот, загальний фосфор та хімічне споживання кисню (ХСК).

Приклад розрахунку ефективності видалення забруднюючих речовин у водно-болотних угіддях.

Припустимо, необхідно оцінити ефективність водно-болотного угіддя у видаленні загального азоту (TN) зі стічних вод.

Визначення вхідних та вихідних концентрацій. Припустимо, вхідна концентрація загального азоту (TN) у стічних водах становить 20 мг/л. Після проходження через водно-болотне угіддя, вона зменшується до 3.46 мг/л.

Розрахунок ефективності видалення.

% видалення TN = $((\text{Вхідна концентрація} - \text{Вихідна концентрація}) / \text{Вхідна концентрація}) \times 100\%$

% видалення TN = $((20 \text{ мг/л} - 3.46 \text{ мг/л}) / 20 \text{ мг/л}) \times 100\% = 82.7\%$.

Цей розрахунок відповідає значенням, отриманим у дослідженнях, де ефективність видалення загального азоту становила 82.77%. Аналогічно, для загального фосфору (TP) ефективність може становити 81.36%, а для аміачного азоту – 94.05%. Це підкреслює, що "зелена" інфраструктура є не просто "м'яким" рішенням, а науково обґрунтованим інструментом з конкретними показниками ефективності, що має вимірний вплив на екологічну якість.

3.11 Комплексна оцінка ефективності та виклики впровадження рішень

Природоохоронні рішення (NbS) часто є більш економічно ефективними, ніж традиційні інженерні підходи. Вони не тільки вимагають менших витрат на обслуговування, але й надають численні додаткові екосистемні послуги, які генерують суспільну та економічну цінність.

Порівняльний аналіз витрат та вигод, проведений для відновлення заплав, показав, що цей підхід забезпечує подібний рівень захисту від повеней, але з меншими інвестиційними та експлуатаційними витратами, а також значно більшими перевагами для екосистем та вищими показниками біорізноманіття порівняно з будівництвом штормових басейнів. Загальна додаткова цінність NbS може становити від 32 до 100 мільйонів євро протягом 30 років порівняно з технічним підходом.

Ця таблиця демонструє, що природоохоронні рішення, незважаючи на потенційно дещо вищі щорічні експлуатаційні витрати у деяких випадках, забезпечують значну економічну вигоду в довгостроковій перспективі за рахунок нижчих капітальних витрат та численних додаткових екосистемних послуг.

3.12 Прогалини в існуючих заходах та системі попередження

Ефективність будь-яких рішень щодо захисту від повеней, включаючи передові технології та природоохоронні рішення, критично залежить від якості комунікації, обізнаності населення та міжвідомчої координації. Це було яскраво продемонстровано прогалинами у реагуванні на повені 2021 року.

Недостатній захист: Абсолютний захист від повеней неможливий, і навіть із захисними заходами завжди залишається залишковий ризик.⁴ Екстремальні події, такі як ті, що сталися у 2021 році, можуть перевантажити навіть добре спроектовані рішення.⁸⁷

Прогалини в системі попередження: Під час повеней 2021 року, незважаючи на наявність систем попередження, значна частина населення NRW не була належним

чином поінформована або підготовлена. Опитування показали, що 35% опитаних жителів NRW не отримали жодного попередження, а 85% тих, хто отримав попередження, не очікували настільки сильного затоплення. Крім того, 46% респондентів повідомили про відсутність ситуаційних знань щодо захисної поведінки. Були виявлені недоліки у наданні адекватних рекомендацій людям, що перебувають у зоні ризику, що призвело до низької сприйнятої ефективності захисної поведінки.¹⁰ Це вказує на те, що навіть найкращі технічні та природоохоронні рішення не можуть бути ефективними без адекватного людського фактора – обізнаності, підготовки та чітких інструкцій.

Інфраструктурні недоліки: Іноді прогалини виявляються і на етапі планування та затвердження інфраструктурних проєктів. Наприклад, геологічна служба NRW висловлювала занепокоєння щодо стабільності кар'єру Ерфтштадт-Блесем до повеней 2021 року, що вказує на можливі недоліки у затвердженні та моніторингу, які могли сприяти масштабам катастрофи.

3.13 Вплив зміни клімату на ризики повеней та стратегії адаптації

Зміна клімату не лише збільшує ризик повеней, але й створює комплексні та взаємопов'язані виклики, такі як посухи та хвилі спеки. Це вимагає від NRW переходу від реагування на окремі стихійні лиха до розробки інтегрованої, багатоаспектної стратегії адаптації, що охоплює весь водний цикл та землекористування.

Зростання ризиків: У NRW вже відчуються наслідки зміни клімату: екстремальні погодні явища, такі як хвилі спеки та сильні опади, стають частішими. З 2018 по 2020 рік та у 2022 році Північний Рейн-Вестфалія пережила чотири посушливі літа з втратами врожаю, драматичними лісовими пожежами та історично низькими рівнями води у водоймах. Це підтверджує, що екстремальні явища стають новою нормою.

Стратегії адаптації NRW: У відповідь на ці виклики, NRW розробила нову стратегію адаптації до зміни клімату, що включає 110 заходів для кращого захисту

від повеней, посух та спеки. Ця стратегія передбачає підтримку муніципалітетів, громадян та підприємств через надання даних, інформації, консультацій, сприяння проектам та створення структур і мереж.

Фінансування адаптації: Муніципалітети в Німеччині вже інвестували значні кошти в заходи адаптації до зміни клімату. У 2021 році вони виділили близько 1 мільярда євро на рік на захист від повеней та сильних дощів. Проте, землі Німеччини закликають федеральний уряд надати додаткові кошти для адаптації до клімату та зробити їх легкодоступними для місцевих органів влади, оскільки поточних ресурсів недостатньо для виконання всіх завдань.

3.14 Рекомендації та перспективи для екологічної безпеки NRW

Майбутня стійкість Північного Рейн-Вестфалії до повеней залежить не лише від впровадження інноваційних технічних та природоохоронних рішень, а й від трансформації управлінських структур, фінансових механізмів та підвищення соціальної капіталізації (обізнаності та співпраці громад).

Інтеграція "сірої" та "зеленої" інфраструктури.

Необхідно відходити від дихотомії "сіре" проти "зеленого" до гібридних рішень, що поєднують традиційні інженерні споруди з природоохоронними заходами.¹⁵ Цей підхід дозволить максимізувати ефективність захисту, одночасно отримуючи численні екологічні та соціальні ко-вигоди. Наприклад, поєднання перенесення дамб із відновленням заплав може створити більші ретенційні об'єми та покращити біорізноманіття, ніж кожен захід окремо.

Посилення моніторингу, прогнозування та обізнаності населення

Забезпечення ефективної екологічної безпеки вимагає постійного вдосконалення систем раннього попередження та активної взаємодії з населенням.

Покращення систем раннього попередження: Необхідно продовжувати інвестувати у передові технології, такі як штучний інтелект та метеорологічні радари, для підвищення точності та швидкості прогнозування повеней, особливо для малих водних об'єктів. Важливо також забезпечити інтеграцію даних з різних джерел для

створення цілісної картини ризиків.

Забезпечення чіткої комунікації: Досвід 2021 року показав критичну потребу в чіткій, своєчасній та зрозумілій комунікації щодо очікуваних масштабів повеней та конкретних рекомендацій щодо дій для населення. Це включає використання різноманітних каналів зв'язку та адаптацію повідомлень до різних аудиторій.

Зміцнення здатності до самозахисту: Необхідно підвищувати обізнаність про ризики серед населення та зміцнювати їхню здатність до самозахисту. Це може бути досягнуто через просвітницькі кампанії, навчання та широке використання цифрових інструментів, таких як додатки для попередження та карти ризиків.

3.15 Необхідність сталого фінансування та міжвідомчої співпраці

Довгострокова стійкість до кліматичних викликів вимагає не лише технічних рішень, а й міцної інституційної та фінансової основи.

Забезпечення сталого фінансування: Необхідно забезпечити достатнє та стабільне фінансування для заходів адаптації до зміни клімату та захисту від повеней. Це включає збільшення субсидій та спрощення програм фінансування для муніципалітетів, оскільки поточні інвестиції є недостатніми для досягнення кліматичної нейтральності та адаптації.

Посилення міжвідомчої співпраці: Подолання існуючих адміністративних та політичних бар'єрів вимагає посилення міжвідомчої та міжмуніципальної співпраці, а також співпраці між федеральним урядом та землями. Це дозволить уникнути фрагментації зусиль та забезпечити цілісний підхід до управління ризиками.

Прозоре управління знаннями: Створення прозорих механізмів управління знаннями та даними є важливим для кращого планування та реалізації проектів. Це дозволить зацікавленим сторонам отримувати доступ до актуальної інформації та використовувати її для прийняття обґрунтованих рішень.

Реалізація цих рекомендацій дозволить Північному Рейн-Вестфалії не лише ефективніше протистояти зростаючим ризикам повеней, але й створити більш стійке, екологічно безпечне та адаптоване до зміни клімату майбутнє.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було проведено комплексний аналіз системи забезпечення екологічної безпеки від впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія. Аналіз існуючих ризиків, наслідків, стратегій та викликів дозволив сформулювати низку ключових висновків.

Ризики повеней у ПРВ мають диференційований характер, що вимагає адаптивних стратегій. Було встановлено існування двох основних типів повеней: повільні повені на великих річках (напр., Рейн), що дають час на попередження, та раптові, руйнівні паводки (Sturzfluten) у малих водотоках, спричинені локальними зливами. Ця подвійність доводить неефективність уніфікованого підходу та наголошує на необхідності розробки гнучких, локалізованих систем реагування, особливо для малих річок, де системи раннього попередження та індивідуальна готовність громадян відіграють вирішальну роль.

Екологічні наслідки повеней є системними та створюють цикл посилення деградації довкілля. Повені не лише завдають прямої шкоди, але й запускають каскад негативних ефектів: хімічне та бактеріологічне забруднення води через затоплення промислових об'єктів та очисних споруд; прискорена ерозія та деградація ґрунтів, посилена попередньою урбанізацією та інтенсивним сільським господарством; порушення екосистем та втрата біорізноманіття. Діяльність людини не лише страждає від повеней, але й посилює їхню руйнівну силу, що вказує на критичний зв'язок між землекористуванням та екологічною безпекою.

Зміна клімату є центральним фактором, що трансформує гідрологічний режим регіону та робить адаптацію безальтернативною. Спостережуване збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ — від руйнівних злив до тривалих посух — перестало бути теоретичною загрозою. Феномен, коли висушені посухою ґрунти не здатні поглинати інтенсивні опади, лише посилює ризик раптових повеней. Це підтверджує тезу "екстремальне стає новою нормою" і вимагає переходу від реактивного захисту до проактивного, інтегрованого управління водними ресурсами, що враховує весь спектр гідрологічних екстремумів.

Стратегія демонструє прогресивну еволюцію від суто інженерного захисту до комплексного управління ризиками. Регіон впроваджує багатогранний підхід, що поєднує законодавчі рамки (Директива ЄС, федеральні закони), технічні рішення (дамби, водосховища), неструктурні заходи (картування ризиків, системи прогнозування) та, що найважливіше, природоорієнтовані рішення. Концепції "міст-губок", ренатурація річок та створення простору для води свідчать про фундаментальний зсув у бік співіснування з повенями, а не лише боротьби з ними.

Незважаючи на комплексність заходів, існують значні виклики та "залишкові ризики". Абсолютний захист від повеней є недосяжним, і навіть найнадійніші інженерні споруди мають межі ефективності, особливо проти раптових паводків. Помилкове відчуття безпеки в захищених районах, недоліки в комунікації ризиків та необхідність посилення міжсекторної інтеграції залишаються ключовими прогалинами. Ефективність усієї системи залежить від синергії між державними заходами, муніципальними діями та індивідуальною відповідальністю громадян.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Aandacht voor Veiligheid*. Vol 009/2008 / J. Aerts, T. Sprong, B. A. Bannink. Leven met Water, Klimaat voor Ruimte, DG Water, 2008.
2. *ABI*. The Financial Risk of Climate Change : Research Paper No. 19. London : Association of British Insurers, 2009.
3. Apel H., Aronica G. T., Kreibich H., Thielen A. H. Flood risk analyses-how detailed do we need to be? *Natural Hazards*. 2009. Vol. 49, no. 1. P. 79–98.
4. Apel H., Merz B., Thielen A. H. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*. 2008. Vol. 6, no. 2. P. 149–162.
5. Apel H., Thielen A. H., Merz B., Blöschl G. Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2004. Vol. 4. P. 295–308.
6. Apel H., Thielen A. H., Merz B., Blöschl G. A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*. 2006. Vol. 38, no. 1–2. P. 79–100.
7. Baan P. J. A., Klijn F. Flood risk perception and implications for flood risk management in the Netherlands. *International Journal of River Basin Management*. 2004. Vol. 2, no. 2. P. 1–10.
8. Blackbourn D. *The conquest of nature: water, landscape, and the making of modern Germany*. London, UK : Norton, 2006.
9. Botzen W. J. W., Aerts J. C. J. H., van den Bergh J. C. J. M. Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45.
10. Botzen W. J. W., Aerts J. C. J. H., van den Bergh J. C. J. M. Willingness of homeowners to mitigate climate risk through insurance. *Ecological Economics*. 2009. Vol. 68, no. 8–9. P. 2265–2277.
11. Bouwer L. M., Bubeck P., Aerts J. Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*. 2010. Vol. 20, no. 3. P. 463–471. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2010.04.002.

12. Bouwer L. M., Bubeck P., Wagtendonk A. J., Aerts J. C. J. H. Inundation scenarios for flood damage evaluation in polder areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 9, no. 6. P. 1995–2007.
13. Bouwer L. M. et al. Confronting Disaster Losses. *Science*. 2007. Vol. 318. P. 753.
14. Bubeck P. et al. Explaining differences in flood management approaches in Europe and the USA - A comparative analysis. Paper presented at the FLOODrisk 2012, Rotterdam, 2012.
15. Büchele B. et al. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2006. Vol. 6, no. 4. P. 485–503.
16. Cohen J. A power primer. *Psychological Bulletin*. 1994. Vol. 112, no. 1.
17. De Moel H., Aerts J. Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, no. 1. P. 407–425. DOI: 10.1007/s11069-010-9675-6.
18. De Moel H., van Alphen J., Aerts J. C. J. H. Flood maps in Europe - methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 9, no. 2. P. 289–301.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Забезпечення екологічної безпеки впливу повеней у регіоні Північний Рейн-Вестфалія

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,39 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.
(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Матусяк М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 

Кватернюк С. М.

Здобувач 

Фляжніков І. А.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Типові ризики повеней

Тип повені	Основна причина	Час попередження	Динаміка рівня води	Зачеплені райони	Типовий вплив
Повені у великих річках (наприклад, Рейн)	Тривалі регіональні опади над великими водозборами	Відносно тривалий (дні до тижнів)	Повільне підвищення, тривалі високі рівні, поступове зниження	Широкі річкові заплави, ширші долинні райони	Широкомасштабне затоплення, довгострокові порушення інфраструктури та сільського господарства
Раптові повені (Sturzfluten) у малих водотоках/міських районах	Локалізовані, інтенсивні зливи	Надзвичайно короткий (години до хвилин)	Швидке підвищення та зниження, раптовий початок	Менші річкові береги, урбанізовані райони, перевантажені дренажні та каналізаційні системи	Локалізовані серйозні структурні пошкодження, негайні руйнування, високий ризик для життя

ДОДАТОК В

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ ПОВЕНЕЙ У РЕГІОНІ
ПІВНІЧНИЙ РЕЙН-ВЕСТФАЛІЯ**



Рисунок В.1 – Долина Ару до та під час катастрофічної повені

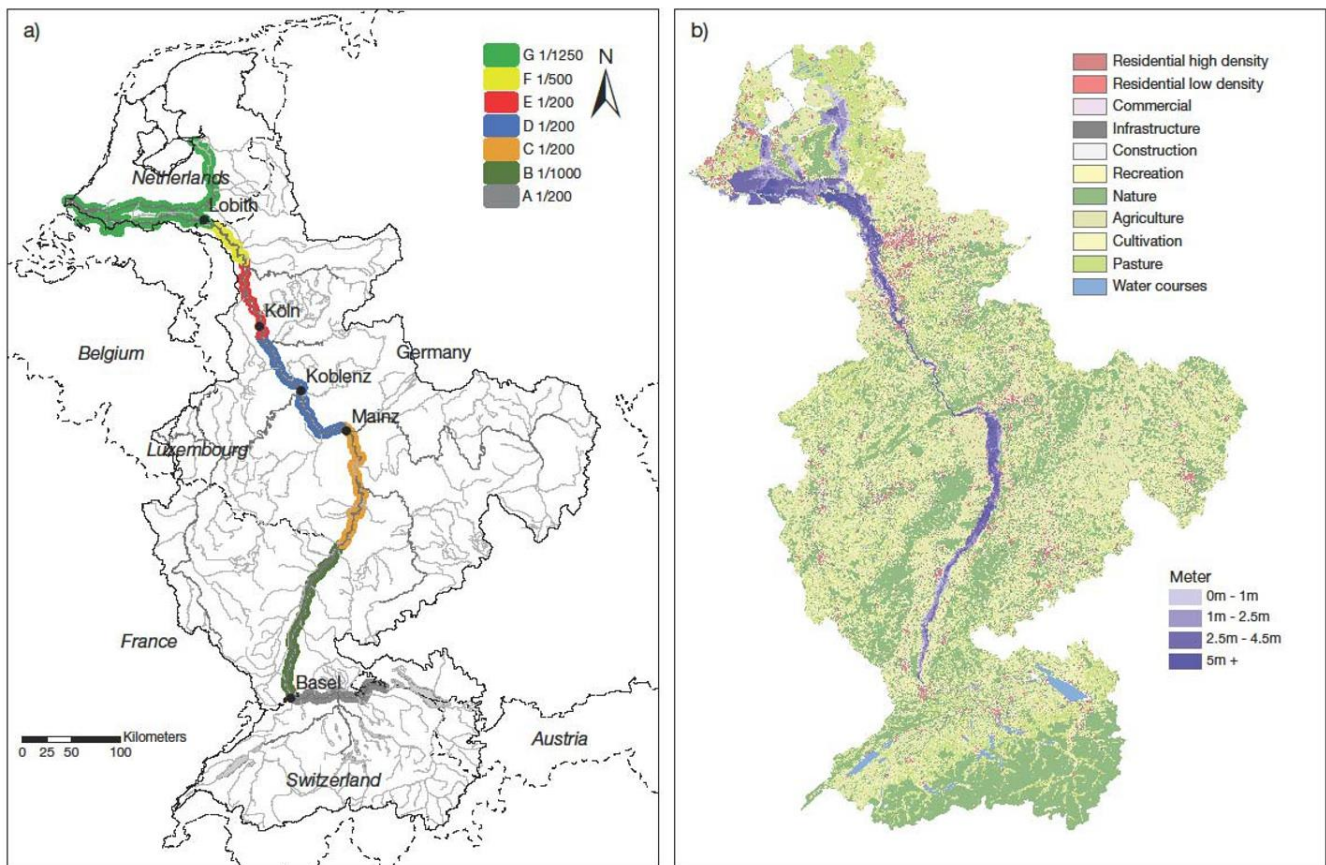


Рисунок В.2 – Карти басейну Рейну: орієнтовні рівні безпеки та потенційно затоплена територію внаслідок річкових затоплення

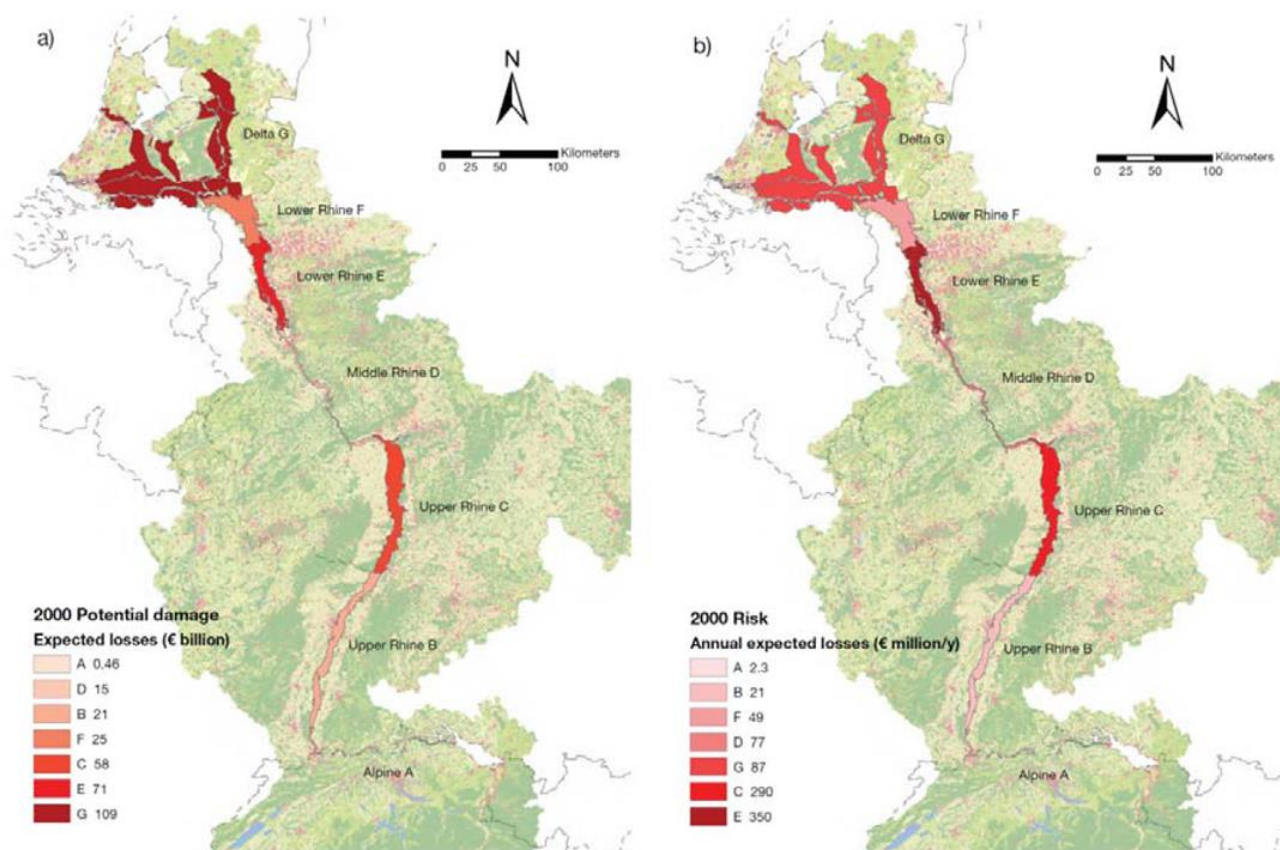


Рисунок В.3 – Потенціал пошкодження і ризик повені