

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

На правах рукопису

СЕМЕНКО ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 622.271

**«ГЛОБАЛЬНІ ТА РЕГІОНАЛЬНІ
АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ГІРНИЧОЇ НАУКИ»**

184 «Гірництво»
(відкриті гірничі роботи)

Випускна робота
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра

Виконав Семенко І.О. / _____ /

Керівник Жуков С.О. / _____ /

Завідувач кафедри Жуков С.О. / _____ /

Кривий Ріг
2024

Зміст

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	4
Розділ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ГІРНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РАЙОНУ LAUSITZ.....	5
1.1. Особливості району досліджень та породних відвалів	5
1.1.1. Проблема розрідження порід на внутрішніх відвалах в Lausitz	5
1.1.2. Цілі та підхід.....	8
1.2. Методичні основи	9
1.2.1. Оцінка ризиків і безпека	9
1.2.2. Розрідження гірських порід у відвалі.....	21
1.2.3. Фактори впливу.....	23
Висновки за розділом 1.....	31
Розділ 2	
ВИЗНАЧЕННЯ Й ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ РОЗРІДЖЕННЮ ПОРІД ВІДВАЛІВ.....	32
2.1. Процес і ефекти	32
2.2. Заходи щодо зменшення можливості розрідження гірських порід	35
2.3. Просторові особливості родовища Lausitz	36
2.3.1. Геологія Lausitz	36
2.3.2. Виймання розкривних порід і будівництво відвалів.....	40
2.3.3.Оздоровлення та рекультивация.....	48
Висновки за розділом 2	49
Розділ 3 АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВИЙ АСПЕКТ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВІДВАЛІВ.....	50
3.1. Доказ стабільності для розріджуваного відвалу.....	50
3.1.1. Доказ стабільності на окремих розрізах	50
3.1.2. Поверхні ковзання.....	52
3.2. Доказ стабільності для розріджуваного субстрату.....	54
3.2.1. Процес FEM	55
3.2.2. Метод за теорією другого порядку	57
3.3. Просторова оцінка безпеки	59
3.3.1. Визначення зон обмеженого доступу і комплексна оцінка (LMBV).....	59
3.3.2. Фактори небезпеки за Förster і Dennhardt	59
3.3.3. Похиле сканування (Vattenfall Europe Mining AG).....	60
3.4. ІКСВ (Beak Consultants GmbH)	62
3.5. Безпека з урахуванням впливу події розрідження порід.....	64
3.5.1. Концепція верифікації за Віттігом	64
3.5.2. Концепція доказів за Кудлою й ін.	67
3.5.3. Концепції поведінки осадження селевих потоків	73
Висновки за розділом 3	77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської роботи **Семенка Івана Олександровича** на тему: «Глобальні та регіональні аспекти розвитку гірничої науки».

«Випускна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2024 р.».

Актуальність теми. Глобалізація – головна ознака сучасного світу. Для України вона особливо актуалізувалася зі стратегією входження в ЄС. А так як Україна є найпотужнішим продуцентом мінеральної продукції в Європі, то це й зумовило тему даної роботи в аспекті аналізу найгостріших проблем гірництва. Серед безлічі таких проблем, однією з найскладніших є глибока деградація антропогенних утворень в зонах колишніх кар’єрних полів, особливо – різного роду відвалів (як зовнішніх, так і внутрішніх), які, внаслідок здатності поглинати і накопичувати в собі величезні об’єми води, з часом стають все більш небезпечними в результаті розм’якнення просоченого водою власного субстрату: несуча здатність останнього невпинно падає, кути природного відкосу – знижуються і зрештою такі утворення перетворюються на справжні, надзвичайно небезпечні болота. Дана проблема починалась як регіональна, початково – в Німеччині, яка на той час була головною сировинною базою Європи і тому накопичила за століття найбільше в світі територій, порушених колишніми кар’єрами.

Але зараз усі негаразди, пов’язані з даною проблемою, набули глобального масштабу. Не є виключенням й Україна, що і стало **лейтмотивом при виборі теми** роботи та її спрямованості саме на досвід Німеччини – лідера в європейському регіоні взагалі та стосовно наукового вирішення проблем гірництва.

Мета роботи – аналіз наукових підходів щодо дослідження геомеханічної та гідрологічної еволюції покинутих відвалів та інших насипів, для запобігання можливих катастрофічних наслідків, зумовлених їх деградацією.

Основні завдання роботи спрямовані на аналіз наукового обґрунтування технічних рішень щодо забезпечення перезволожених породних відвалів.

Предмет дослідження – відвалоутворення й осушення породних насипів при формуванні відвалів та рекультивації порушених кар’єрами земель.

Об’єктом дослідження є кар’єр району Лаузіц – одного з найважливіших регіонів видобутку вугільної енергетичної сировини в Німеччині та Європі.

Методи дослідження полягають в аналізі особливостей застосування провідними вченими-гірниками теоретичних досягнень сучасної гірничої науки, до методологічного арсеналу якої входять теорії геотехнічної та гірничої механіки, інженерної та гідрогеології, які надійно підтверджені виробничою практикою.

Наукова складова роботи полягає у визначенні перспективності відібраної моделі відвалоутворення та наукового супроводу спостережень й забезпечення техногенних насипів, придатного для впровадження в Україні.

Структура й обсяг роботи: реферат, вступ, три розділи, загальні висновки, список використаних інформаційних джерел зі 131 найменування, викладені на 92 сторінках, які містять 28 рисунків та 11 таблиць.

Ключові слова: кар'єр, відвал, гірничі породи, водонасичення порід, розробка родовищ.

ВСТУП

Сьогодення усіх без винятку країн світу, як розвинутих, так і тих, що розвиваються, цілком залежить від забезпеченості їх мінеральними ресурсами та технологічної доступності останніх. Але родовища корисних копалин локалізовані надзвичайно нерівномірно [1-3] і відпрацьовуються в різних країнах упродовж різних історичних періодів [4]. Наймолодшими у цьому відношенні є американські континенти [5], а найстарішою – Європа [6], в якій більшість родовищ повністю вичерпані, кар'єри – покинуті, причому, в більшості випадків – без будь-якої рекультивації порушених гірничими розробками територій, так як обов'язковість останньої для розробників надр після повного вилучення покладів сировини стала неминучою відносно зовсім недавно.

Серед безлічі проблем, пов'язаних з гірничою діяльністю та її наслідками [7, 8], однією з найскладніших є глибока деградація антропогенних утворень в зонах колишніх кар'єрних полів, особливо – різного роду відвалів (як зовнішніх, так і внутрішніх), які, внаслідок своєї здатності поглинати і накопичувати в собі величезні об'єми води, з часом стають все більш небезпечними в результаті розм'якнення просоченого водою власного субстрату: несуча здатність останнього невпинно падає, кути природного відкосу – знижуються і зрештою такі утворення перетворюються на справжні, надзвичайно небезпечні болота. І практично всі негативні наслідки, пов'язані з гірничодобувною спадщиною, є прямим наслідком традиційних гірничих технологій, які протягом століть спотворювали й нищили родючі землі, унікальні ландшафти, біоценози тощо.

Тому актуальність тематичного спрямування даної роботи є очевидною.

Але зараз усі негаразди, пов'язані з колись цілком типово регіональною проблемою, набули вже дійсно глобального масштабу. Не є виключенням з цього й Україна [9, 10], що власне і стало **лейтмотивом при виборі теми** даної магістерської роботи та її спрямованості саме на досвід Німеччини – лідера в європейському регіоні взагалі, осередка зародження й розвтку світової гірничої науки та стосовно наукового вирішення означених проблем гірництва зокрема.

Мета роботи – аналіз наукових підходів щодо дослідження геомеханічної та гідрологічної еволюції покинутих відвалів та інших насипів, для запобігання можливих катастрофічних наслідків, зумовлених їх деградацією.

Основні завдання роботи спрямовані на аналіз наукового обґрунтування технічних рішень щодо забезпечення перезволожених породних відвалів.

Предмет дослідження – відвалоутворення й осушення породних насипів при формуванні відвалів та рекультивації порушених кар'єрами земель.

Об'єктом дослідження є кар'єр району Лаузіц – одного з найважливіших регіонів видобутку вугільної енергетичної сировини в Німеччині та Європі.

Методи дослідження полягають в аналізі особливостей застосування провідними вченими-гірниками теоретичних досягнень сучасної гірничої науки, до методологічного арсеналу якої входять теорії геотехнічної та гірничої механіки, інженерної та гідрогеології, які надійно підтверджені виробничою практикою.

Наукова складова роботи полягає у визначенні перспективності відібраної моделі відвалоутворення та наукового супроводу спостережень й забезпечення техногенни насипів, придатного для впровадження в Україні.

Розділ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ГІРНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РАЙОНУ LAUSITZ

1.1. Особливості району досліджень та породних відвалів

У районі Lausitz велика кількість відкритих розробок бурого вугілля була закрита та рекультивована. Приблизно з 2006 року, коли рівень ґрунтових вод піднявся, сталася значна кількість випадків розрідження ґрунту на відвалах з пухкими і переважно піщаними породами. Такі відвали становлять небезпеку для людей і тому спричиняють закриття утворених на їх місці сміттєзвалищ.

Метою розпочатих в даному регіоні наукових досліджень було визначити ризик травмування людей внаслідок розрідження ґрунту на внутрішніх відвалах в районі видобутку бурого вугілля. Результати дають можливість спланувати заходи для покращення безпеки на відвалах і таким чином, враховуючи схожість проблем та умов тамтешніх з українськими, зумовлюється доцільність аналізу суті досліджень та визначення ступеня придатності застосування їх організації та результатів в умовах Кривбасу.

У роботі використовуються приклади, щоб показати, як можна визначити та представити ступінь зниження стійкості відвалів за допомогою різних процесів. Прості фізичні або емпіричні залежності формують основу для визначення рівня деградації відвалу, які враховують ймовірність виникнення та ступінь шкоди від розрідження порід, закладених у них. Тому описано процес самовільного розрідження порід та показано, що наслідки їх розрідження суттєво залежать від форми поверхні місцевості та положення рівня ґрунтових вод відносно поверхні. Для морфології місцевості вирішальний фактор використовується як параметр, щоб встановити емпіричну залежність ефектів події розрідження ґрунту разом із відстанню до підземних вод. На основі цих результатів створюється карта небезпек на базі цифрової моделі рельєфу та моделі ґрунтових вод.

Коллективний ризик травмування розраховується шляхом просторової оцінки карти небезпек і припущеної кількості людей на основі запланованого

використання техногенних звалищ. Розрахунок також включає ймовірність виникнення подій розрідження, яка була визначена для відкритих гірничих робіт на основі оцінок цифрових моделей рельєфу в період з 2006 по 2018 рік.

Виявлений ефект від розрідження заскладованої гірничої маси порівнюється з повсякденними ризиками. Виходячи з цього, пропонується граничний показник. Результати – інтерпретуються та даються рекомендації щодо того, як боротися зі зниженням стійкості техногенних насипних утворень кар'єрів.

1.1.1. Проблема розрідження порід на внутрішніх відвалах в Lausitz

З видобутком до 200 мільйонів тон бурого вугілля на рік район видобутку бурого вугілля Lausitz є одним із найважливіших районів видобутку цієї енергетичної сировини в Німеччині та Європі. Зараз приблизно третина бурого вугілля в Німеччині видобувається в регіоні Lausitz, приблизно 50 мільйонів тон на рік. Зокрема, в епоху НДР буре вугілля видобували у великій кількості з відкритих виробок і використовували великі площі [11]. Після політичних і соціальних змін у 1989/1990 роках багато відкритих розробок було закрито, що знайшло відображення у різкому спаді виробництва (див. рис. 1.1). Зокрема, в останні роки існування НДР, через економічні труднощі, видобутку вугілля надавався пріоритет над повторним використанням землі. Разом із закриттям відкритих розробок з 1990 року виникла велика потреба в рекультиватії та оновленні використовуваних територій [11].



Рис. 1.1. Видобуток бурого вугілля в 1000 т/рік у 1840-2017 роках (дані для району Lausitz) (база даних: [177])

Для вирішення завдань реабілітації гірничих робіт було засновано гірничодобувну компанію Lausitzer und Mitteldeutsche mbH (LMBV) як федеральну компанію [12]. Відкриті кар'єри, які продовжували працювати, були передані

Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG), а пізніше були передані Vattenfall. З 2016 року рештою кар'єрів Jänschwalde, Welzow-Süd, Nochten і Reichwalde керує Lausitz Energie Eisenbahn AG (LEAG) [13].

Через минулі видобутки близько 1000 км² землі в Lausitz підлягають видобутку [11]. Подальше використання цих площ є заявленою метою. Станом на січень 2019 року LMBV все ще визначало 21 790 га (218 км²) звалища зоною обмеження доступу [12]. Причиною є геотехнічні небезпеки, переважно небезпеки, спричинені розрідженням порід. Ці цифри ясно показують, яке значення має і матиме відновлювальне гірниче виробництво. Ці завдання залишаються незалежними від будь-якого майбутнього припинення видобутку.

Відповідно до економічної важливості подальшого використання звалищ було виконано низку дослідницьких проектів, які стосувалися питань геотехнічної безпеки. Особливо варто відзначити роботу, яка виконується під керівництвом Проф. Wolfgang Förster, яким був створений у TU Bergakademie Freiberg. Результатом цього стала рекомендація LMBV («Зелений буклет» [14]), яка в основному стосувалася захисту від просідань на берегах залишкових озер. На рис. 1.2 схематично показано, як «прихована дамба» створюється на озері відкладень кар'єру для захисту від просідання. В той же час передбачається, що тиск суспензії може витримати розрідження ґрунту в глибині. За цією технологією було дуже успішно відремонтовано велику кількість берегів залишкових озер [15].

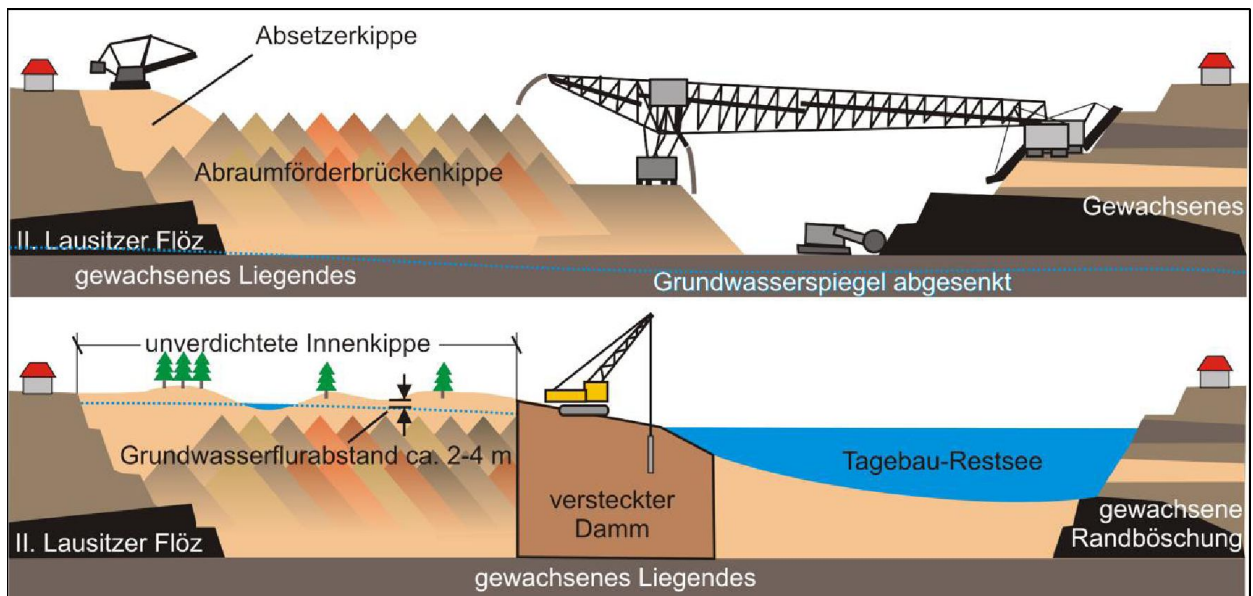


Рис. 1.2. Кар'єрні роботи та внутрішній відвал після підйому ґрунтових вод (схематично) [15]

Мало уваги в «Зеленому буклеті» було приділено внутрішнім зонам відвалу від залишкових озер кар'єрів [14]. Згідно з типовою для Lausitz технологією відкритих розробок, зазвичай це конвеєр, який можна перекрити розкидувачем або наконечником відвального плуга, щоб поверхня стала невеликою або зовсім не сформованою, так щоб після припинення видобутку ґрунтові води переважали на рівні, частково підтримуваному зовнішнім затопленням [11].

У кінцевому стані на частинах внутрішніх схилів з'являються невеликі відстані потоку ґрунтових вод (див. рис. 1.2 нижче).

Приблизно з 2006 року спостерігається збільшення випадків розрідження порід на внутрішніх відвалах у районі видобутку бурого вугілля Lausitz [16]. Це супроводжувалося відновленням підземних вод, які на деяких ділянках наближалися до кінцевого стану. Осередком подій розрідження порід є північна територія району Lausitz, особливо колишній відкритий рудник Schlabendorf-Süd [16, 17]. На рис. 1.3 вражаюче показаний приклад наслідків розрідження порід.

Щоб дослідити події розрідження порід, компанія Vattenfall Europe Mining AG (з 2016 року Lausitz Energie mining AG – LEAG) замовила дослідницький проект для TU Bergakademie Freiberg, Інститут гірничої справи та цивільного будівництва в 2010 році, який був завершений у 2017 році з остаточним звітом [18]. Робота виконувалася в тісній координації між клієнтом, партнером по співпраці LMBV і TU Bergakademie Freiberg. У рамках цього дослідницького проекту виконувалися дослідження [19], які стали основою цієї роботи.

У 2013 році LMBV замовив проект «Науково-технічні дослідження для забезпечення безпеки розм'якшення порід: Додаткові науково-технічні дослідження проблеми розрідження внутрішнього відвалу Lausitz», введеного в експлуатацію у 2018 р. [20]. Крім того, результати проекту «Розробка комплексної системи сейсмічного, гідравлічного та геотехнічного моніторингу для раннього виявлення ризику розрідження порід на прикладі внутрішніх відвалів Lusatian Revier (SHGM)» також були враховані в роботі LMBV.

1.1.2. Цілі та підхід

У ході вищевказаного в рамках дослідницьких проектів систематично реєструвалися та «вимірювалися» події розрідження порід [21]. Це дозволяє статистичну оцінку для різних, рівномірно зареєстрованих параметрів. З іншого боку, розрідження відбувалося частіше, тому оцінка подій розрідження дає змогу розрізняти різні типи та робити заяви про ризик для людей від подій розрідження, який відрізняється, залежно від типу.

Різні автори (наприклад, Klose [22] і Ruff [23]) описували, як можна визначити ризик масових переміщень. Автори зазначають, що ризик моделювання значною мірою залежить від того, чи доступні геопросторові дані та чи розуміються відповідні процеси. Оскільки ці вимоги задовольняються широкою та однаковою оцінкою подій розрідження, метою стає кількісна оцінка ризику, спричиненого подіями розрідження на внутрішніх відвалах у районі видобутку бурого вугілля Lausitz. Таким чином, робиться внесок у можливість справлятися з геотехнічними небезпеками на місцях руйнувань відповідним та економічно розумним способом. Крім того, слід запропонувати підходи для цілісного розгляду ризиків у закритих місцях скидання порід.

Робота [24] рекомендує спосіб «кількісної оцінки ризику розрідження або потоку осідання» за допомогою методу, заснованого «на теорії ймовірності». Мета полягає в тому, щоб довести, «що інші ризики відповідають тим, які

зазвичай присутні в житті поза видобутком корисних копалин» (Cramer et. al. [25]).

Для досягнення даної мети ця робота спочатку представляє основи, необхідні для оцінки ризику. Також включено поширений у геотехніці термін безпеки. Пояснюється процес розрідження та згадуються фактори впливу, які відповідають за те, чи може відбуватися спонтанне розрідження в елементі породи. Крім того, описано типові властивості внутрішніх відвалів району видобутку бурого вугілля Lausitz, які виникають через геологічні та технологічні граничні умови. Іншою основою роботи є розуміння методів, які використовуються для демонстрації безпеки внутрішніх відвалів по відношенню до розрідження порід. Представлено різні концепції та показано обмеження методів. Зокрема, необхідно знати стан порід на території, що розглядається, щоб надати докази стабільності відвалів, що вимагає широких досліджень.

На основі результатів дослідницьких проєктів, згаданих вище, розроблено модель процесів, пов'язаних із розрідженням порід. Спочатку досліджується елемент порід, а потім весь процес їх розрідження, включаючи явища, які відбуваються. З точки зору розуміння процесу, ця модель є основою для визначення ризику мимовільного розрідження порід на внутрішніх відвалах.

На основі концепції моделі можна описати різні типи подій розрідження порід, які відрізняються, залежно від їх тяжкості на поверхні місцевості та, отже, становлять різні ризики для людей. Встановлено емпіричні зв'язки з геоморфологічними параметрами виникнення цих типів подій розрідження порід. Це дає можливість оцінити, яка небезпека існує на ділянці відносно місця розташування, якщо взагалі відбудеться подія розрідження порід.

Щоб визначити ризик розрідження на закритих звалищах, необхідно знати ймовірність виникнення подій розрідження на конкретній території. Ця ймовірність виникнення визначається співвіднесенням площі розрідження, які фактично відбулися за досліджуваний період щодо території, в якій розрідження могли відбутися згідно з емпіричною оцінкою геоморфологічних параметрів. Визначена відносна частота прирівнюється до ймовірності настання подій і відноситься до кар'єру.

Об'єднавши припущену ймовірність присутності людей з ймовірністю виникнення подій розрідження, ризик травмування можна визначити кількісно. Враховується залежність ризику від типу події. Кількісно оцінюючи ризик розрідження, його можна порівняти з ризиками в інших сферах та запропонувати граничний ризик. Запропонований ліміт ризику дозволяє вирішити, чи необхідні заходи для зниження ризику від розрідження порід.

Описану тут оцінку ризику розрідження порід на внутрішніх відвалах в районі видобутку бурого вугілля слід розглядати як допоміжний засіб, і результати можуть бути використані там, де розрахунок стабільності з граничною рівновагою призводить до соціально неприйнятних результатів. Це може бути у випадку, коли безпеку неможливо довести через недостатнє знання стану гірських порід, але заходи з відновлення вважаються безглуздими з економічних та екологічних причин.

1.2. Методичні основи

Даний підрозділ пояснює основи, необхідні для цієї роботи. Терміни та методи, пов'язані з безпекою та ризиком, – важливі. Крім того, представлено процес розрідження порід та обговорено особливості району видобутку бурого вугілля, які пов'язані з ним. Представлено методи, які допомагають оцінити ризик розрідження ґрунту.

1.2.1. Оцінка ризиків і безпека

Терміни у сфері безпеки та ризику вимагають чіткого визначення, оскільки в розмовній мові часто вживаються неточно [26]. Незважаючи на те, що зазвичай існує єдине визначення та використання термінів у спеціалізованій галузі, непорозуміння можуть виникати в різних дисциплінах [26].

Основні терміни визначаються на міжнародному рівні, оскільки ці терміни мають велике значення для безпеки праці та виробничих процесів (ISO/IEC GUIDE 51:2014 [27]). Тут слід використовувати ці уніфіковані визначення (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Використані визначення
(в джерелі [27] переклади визначень)

Німецька	Англійська	Визначення
Schaden	harm	Травми або шкода здоров'ю людей, можливо матеріальна шкода чи шкода навколишньому середовищу [27]
Gefährdung	hazard	Небезпека. Потенційне джерело пошкодження [27]
Gefahr	danger	Ситуація, в якій ризик перевищує граничний ризик небезпеки [DIN VDE 31000-2], цитується в [28]
Risiko	risk	Поєднання ймовірності заподіяння шкоди та тяжкості цієї шкоди [27]
Restrisiko	residual risk	Ризик, який залишається, вимірює залишковий ризик після вимірювання [27]
Grenzrisiko	tolerable risk	Ризик, який приймається в певному контексті, виходячи з поточних соціальних цінностей буде [27]
Sicherheit	safety	Безпека. Відсутність неприйняттого ризику [27]
Vulnerabilität	vulnerability	Характеристика ступеня пошкодження об'єкта. У випадку смертельних тілесних ушкоджень це – летальність [29].
Risikoanalyse	risk analysis	Систематичне застосування наявної інформації, аналіз ризиків для визначення небезпек і оцінок ризику [27]
Risikobewertung	risk evaluation	Процедура на основі аналізу ризиків перевіряється, чи було перевищено граничний ризик [27]
Risikobeurteilung	risk assessment	Загальний процес, що складається з аналізу ризику та оцінки ризику [27]



Рис. 1.3. Ілюстрація суттєвих термінів ризику [30]

Крім того, [31] говорить про географічно-просторове формулювання ризику, яке використовується переважно у зв'язку з природними небезпеками.

Розподіл предметних галузей призводить до відмінностей у літературі щодо напрямків, методів і термінів. Тут неможливо все перерахувати та порівняти. Таким чином, цей підрозділ обмежується основами, які є важливими в контексті оцінки ризику подій розрідження порід відвалів. Ризик подій розрідження оцінюється з точки зору природних і технічних аспектів. Враховується географічний і просторовий розподіл ризику.

Відповідно до [29] ризик складається з:

- «частота або щорічність небезпечної події
- масштаб збитку, який визначається кількістю людей і майна, які зазнали впливу небезпечної події в момент її фактичного виникнення, а також чутливістю постраждалих людей і активів до збитків» [29]

Термін «щорічність» пояснюється на рис. 1.4, а). б). Показано кілька сценаріїв. Тоді розмір події лежить в інтервалі між T^* і T^1 [29].

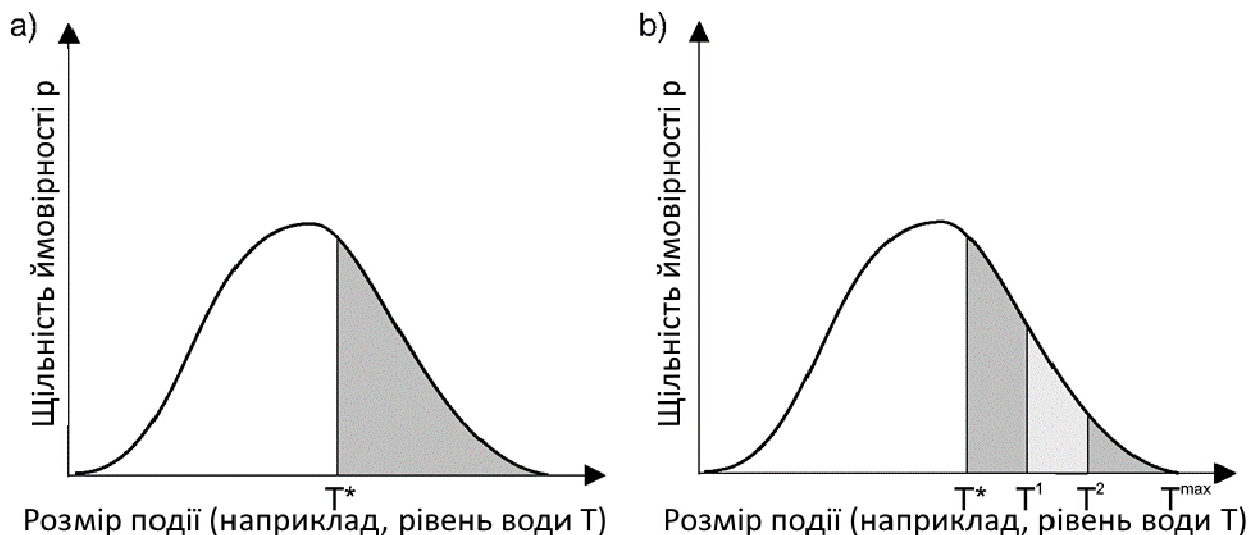


Рис. 1.4. Відображення щорічності а) та частоти б) події [29]

Визначення сценарію у функції щільності ймовірності [29]

Якщо частота або щорічність події, що спричиняє шкоду, відома, і ступінь збитку, пов'язаного з подією, що спричиняє шкоду, можна визначити кількісно, можна розрахувати ризик (рівняння 1–3 згідно з [29]).

$$R_{S,O} = P(S) \cdot P(O|S) \cdot G_O \cdot v_{S,O} \quad (1)$$

$$R_S = \sum_O R_{S,O} \quad (2)$$

$$R = \sum_S R_S \quad (3)$$

де:

R – ризик;
 S – сценарії;
 O – об'єкт;
 P – ймовірність
 G – значення;
 v – вразливість.

Рівняння сформульовані в загальному вигляді. Не всі компоненти застосовуються в конкретному випадку або підтверджуються даними [29].

Загальний ризик складається з ризиків усіх сценаріїв. Для кожного сценарію можна враховувати різні об'єкти, які можуть зазнати пошкоджень. Наприклад, В. Пошкодження майна та тілесні ушкодження враховуються окремо. Об'єднання окремих ризиків у загальний ризик має назву «агрегування». Слід зазначити, що окремі ризики можуть впливати один на одного [29, 32]:

- ймовірність сценарію $P(S)$
- ймовірність того, що об'єкт піддається сценарію $P(O|S)$
- вартість об'єкта G_O , виражена в грошовій (наприклад, у разі пошкодження будівель) або в негрошовій (наприклад, у випадку тілесних ушкоджень або пошкодження культурних цінностей)
- вразливість або чутливість до пошкоджень об'єкта, залежно від сценарію проти.

Відповідно до [33] ймовірність того, що об'єкт піддається сценарію, можна розділити на просторову та часову ймовірності.

Ризик, розрахований в аналізі ризику, необхідно порівняти з лімітним ризиком (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Фактори, що впливають на сприйняття ризику (згідно з [31])

Фактор	Високе сприйняття ризику	Низьке сприйняття ризику
Добровільність	Мимовільно прийняті ризики	Добровільно прийняті ризики
Контрольованість ризиків	під контролем інших ризиків	під власним контролем
Розподіл	нерівномірно розподілених ризиків	рівномірно розподілених
Переваги	незрозумілі переваги	явні переваги
Зрозумілість	важко зрозуміти	чітко зрозуміло
Невизначеність	невідомі ризики	відомі ризики

Страх	Ризики, що викликають страх	Ризики, які не викликають сильних емоцій
Довіра	Ризики, пов'язані з людьми чи установами, які користуються низькою довірою	Ризики, пов'язані з людьми чи установами, які користуються високою репутацією
Зворотність	незворотні ефекти	відсутні незворотні ефекти
Залучення	особистих ризиків	безособових ризиків
Походження	технічні ризики	природні ризики
Жертви	Ідентифіковані або відомі жертви	Жертви як частина статистики
Потенціал катастрофи	просторово чи часово зосереджена кількість жертв	просторово та часово розсіяні ризики

Це важливо у випадку отримання тілесних ушкоджень

Коли справа доходить до тілесних ушкоджень, найважливішим є те, чи люди добровільно наражаються на ризик [29]. Значення, запропоновані в таблиці 1.3, показують, наскільки сильною є мета захисту і, отже, граничний ризик залежать від добровільного фактора, який відрізняється більше, ніж на три порядки величини.

Таблиця 1.3

Пропозиція щодо обмеження ризику для індивідуальних особистих ризиків у Швейцарії (пов'язані з природними небезпеками, згідно [29])

Категорія ризику	Максимальне значення ймовірності смерті для прикладу рік	Приклад
Категорія 1 100% добровільно	$10^{-2} - 10^{-3}$	Люди, які свідомо нехтують бар'єрами під час підвищеної небезпеки
Категорія 2 висока особиста відповідальність	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	Люди, які вміють оцінювати небезпечні ситуації та свідомо приймати небезпеку
Категорія 3 низька особиста відповідальність	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$	в основному до повної незаангажованості, ризики більші
Категорія 4 100% мимовільний	$3 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$	люди, які свідомо ігнорують бар'єри під час підвищеної небезпеки

Ризики часто представлені в матриці ризиків. Ілюстративний приклад показано на рис. 1.5. Для матриці ризику ступінь збитку показано класифіковано по осі абсцис, а ймовірність виникнення – по осі ординат, таким чином створюються чіткі поля. Класифікація класів і відповідне ранжування ризиків повинні проводитися ретельно з урахуванням цілей оцінки ризику [34].

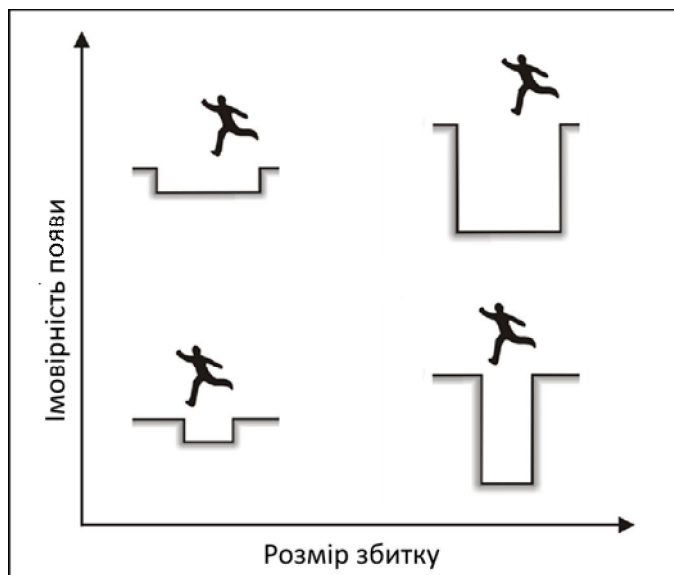


Рис. 1.5. Ілюстрація матриці ризиків (pf [34])

Коли справа доходить до роботи з ризиком, Sieber [35] висунув наступні тези, які загалом справедливі:

- Абсолютна безпека неможлива.
- Розглядаючи ризик, мова йде не про виключення ризику, а про зменшення ризику.
- У разі необхідності потрібно вжити надзвичайних запобіжних заходів.
- Залишковий ризик, який зрештою є прийнятним і прийнятим суспільством, залишається.

У [36] пропагується встановлення «культури ризику» та відхід від чистого мислення безпеки. Важливими є такі аспекти:

- Культура ризику вимагає міждисциплінарного підходу та дозволяє встановити пріоритети в загальному вигляді.
- Впровадження культури ризику забезпечує сталу безпеку.
- Культура ризику вимагає «конструктивного публічного інформування про ризики та розкриття ризиків» [36].
- Фокус на контрольованості ризиків замінюється стратегіями боротьби з ризиками. Суб'єкти, залучені до запобігання збитку та усунення шкоди, мають бути ті самі.
- При впровадженні культури ризику всі ризики мають бути пов'язані.

Оцінка ризику у разі травмування

Визначення в попередніх розділах і рівняннях 1-3 зазвичай включають тілесні ушкодження. Однак є особливості, про які йтиметься нижче.

Відповідно до [29], розмір шкоди визначається «кількістю людей і майна, які зазнали впливу небезпечної події в момент її фактичного виникнення, а також чутливістю до шкоди постраждалих людей і активів» ([29] ч. А, стор. 3). Після аргументу одиниця значення G_0 у рівнянні 1 має бути визначена для об'єктів у грошовій вартості (наприклад, € або \$), а для людей – у «кількості людей».

Klingmüller і Bourgund [37] зазначають, що при розгляді ризику тілесні ушкодження іноді замінюються грошовими еквівалентами. Вони розраховуються на основі витрат на лікування у разі травми, пенсії по інвалідності чи пенсії у зв'язку з втратою годувальника або відповідають сумі, яку постраждала особа більше не може вносити у валовий національний продукт. Автори вбачають проблему такого підходу в етичному конфлікті, який виникає через те, що вищезгадані Розміри залежать від соціального становища людини.

Концепція боротьби зі стихійними лихами в Швейцарії [29] стверджує, що захист людського життя є пріоритетом, а захист власності – другорядним. Тим не менш, тут також слід показати загальний ризик. З цією метою позовам про відшкодування тілесних ушкоджень призначається грошова одиниця. Однак це визначається «готовністю суспільства платити за запобігання смертей». Грошову одиницю, призначену для особистих травм, не слід ототожнювати з «цінністю» людського життя, а скоріше це «гранична вартість заходів безпеки» [29]. Ця величина називається «цінністю статистичного життя (VOSL)» [33]. 5 мільйонів швейцарських франків наведено в [29] як орієнтир щодо граничних витрат на запобігання смерті. Додаткову інформацію про значення VOSL можна знайти в [33].

При оцінці ризику отримання тілесних ушкоджень є два аспекти, які необхідно брати до уваги. Це індивідуальний ризик r , який оцінюється на основі однієї або кількох осіб, і колективний ризик R , який розглядає загальну кількість людей [29]. При індивідуальному ризику r приймається точка зору особи, яка може контролювати свої дії, тоді як при колективному ризику R нейтральний спостерігач не впливає на кількість або дії людей.

Рис. 1.6 ілюструє різницю в перспективі. Хоча колективний ризик R однаковий у випадках а) і б), індивідуальний ризик r у випадку а) значно більший, ніж у випадку б). Різна оцінка ризиків у випадках а) і б) може виникнути через те, що фактори впливу з таблиці 1.2 відрізняються.

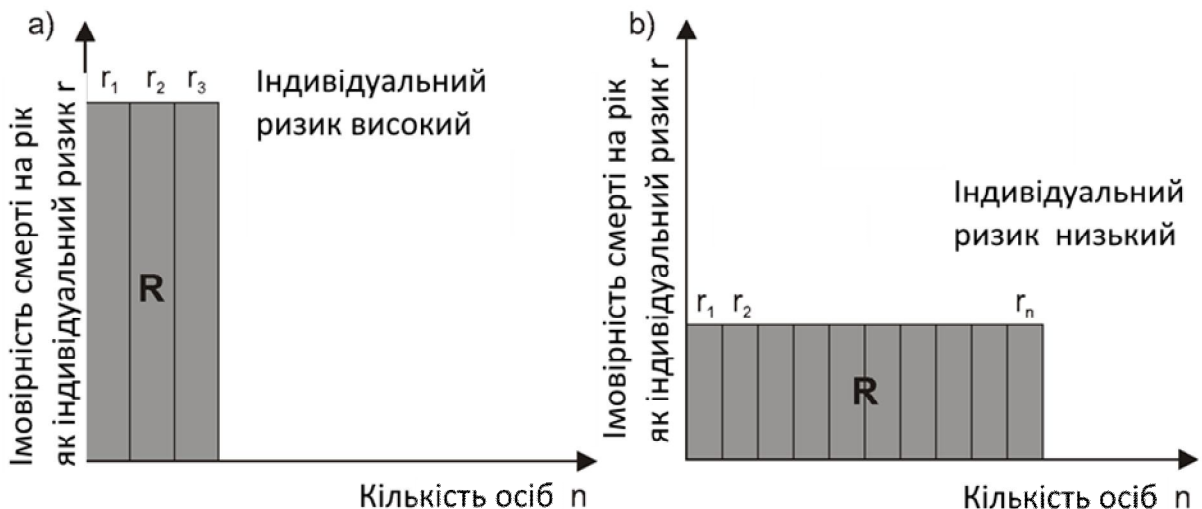


Рис. 1.6. Ілюстрація індивідуального та колективного ризику (за [29])

Люди — це мобільні «об'єкти». Тому при розгляді ризику вирішальним фактором є те, наскільки велика ймовірність того, що «об'єкт» (людина) піддається сценарію, який завдає шкоди (член $P(0|S)$ у рівнянні 1). У швейцарсь-

кій концепції ризику природних небезпек [29] проводиться різниця між середньою заповненістю та ймовірністю присутності (або ймовірністю перебування) людей. Якщо ймовірність присутності різна в різний час, то в [29] говорять про різні ситуації щодо тривалості впливу шкідливого фактору на людину. Беручи до уваги ці різні ситуації, можна охарактеризувати їх внесок у ризик, що може мати переваги при плануванні заходів [29].

Вразливість або чутливість до пошкоджень наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

**Приклад залежності летальності від
обсягу зсуву та від опромінення людей (згідно [33])**

Обсяг зсуву [м ³]	Летальність А для людей в будівлі [-]	Летальність А для людей на відкритому повітрі [-]
50	0,0002	0,03
100	0,006	0,054
500	0,011	0,078
1.000	0,026	0,11
2.500	0,04	0,15
5.000	0,17	0,48

Етапи оцінки ризику. Єдиного підходу до оцінки ризику в літературі ще не встановлено. Наступні твердження базуються на швейцарській концепції ризику природних небезпек [29].

Першим кроком в оцінці ризику є аналіз ризику. Аналіз ризику поділяється на аналіз небезпеки, аналіз впливу та аналіз наслідків (див. Рис. 1.7).



Рис. 1.7. Процес оцінки ризику (відповідно до [29])

У рамках аналізу ризиків записи про загрози спочатку оцінюються в аналізі подій. Визначаються відповідні загрози та створюються сценарії. Це означає, що місце, час і масштаб подій в За допомогою цих даних можна оцінити минуле і відповісти на запитання «Що може статися?» [29].

Другий крок аналізу ризику називається аналізом впливу. Інтенсивність призначається сценаріям, розробленим під час аналізу подій, тобто ч. Названі параметри та їх граничні значення, які відмежовують різні рівні інтенсивності

один від одного. За допомогою просторового призначення рівнів інтенсивності отримують зони інтенсивності на картах небезпек.

Об'єкти або люди включені в аналіз впливу. Визначається, де і в якій кількості знаходяться предмети або люди. Об'єктам присвоюється значення. Ситуації експозиції описують, коли та скільки людей або рухомих об'єктів знаходиться в певній зоні.

Метою аналізу наслідків є визначення ступеня шкоди об'єктам або людям у разі події для всіх розглянутих сценаріїв і ситуацій опромінення.

Наприкінці аналізу ризику ризик визначається шляхом застосування рівнянь 1–3. Ризик розраховується на основі ймовірності сценарію, ймовірності того, що об'єкт буде підданий сценарію, цінності об'єкта та вразливості об'єкта (або, відповідно, травмування). При поданні ризику травмування людей слід розрізняти колективний та індивідуальний ризик [29].

Оцінка ризику, яка слідує за аналізом ризику, перевіряє, чи ризики, визначені в аналізі ризику, допустимі компанією, чи необхідні вжиття заходів. Головне завдання – знайти розумні цілі захисту [29]. У [29] крок оцінки ризику проілюстровано запитанням «Що може статися?»

У випадку, якщо оцінка ризику показує необхідність заходів, слідує планування дій та оцінка («Що потрібно зробити?» [29], в якому слідує ефективність у сенсі зниження ризику), враховуються витрати на заходи [29, 38].

Для окремого випадку оцінки ризику через рух схилу Ruff запропонував блок-схему, показану на рис. 1.8 [23]. На основі оцінки факторів, що викликають (наприклад, кількість опадів) і підготовчих факторів (наприклад, градієнт схилу), а також знання попередніх подій, місце можливого виникнення (вразливість) і ймовірність виникнення в певний час стають просторовими підсумками ризику. Основою вразливості є землекористування. Ризик визначається на основі розташування на основі небезпеки та вразливості. Виходячи з цього, пропонуються заходи, які необхідно оцінити за співвідношенням витрат і вигод.

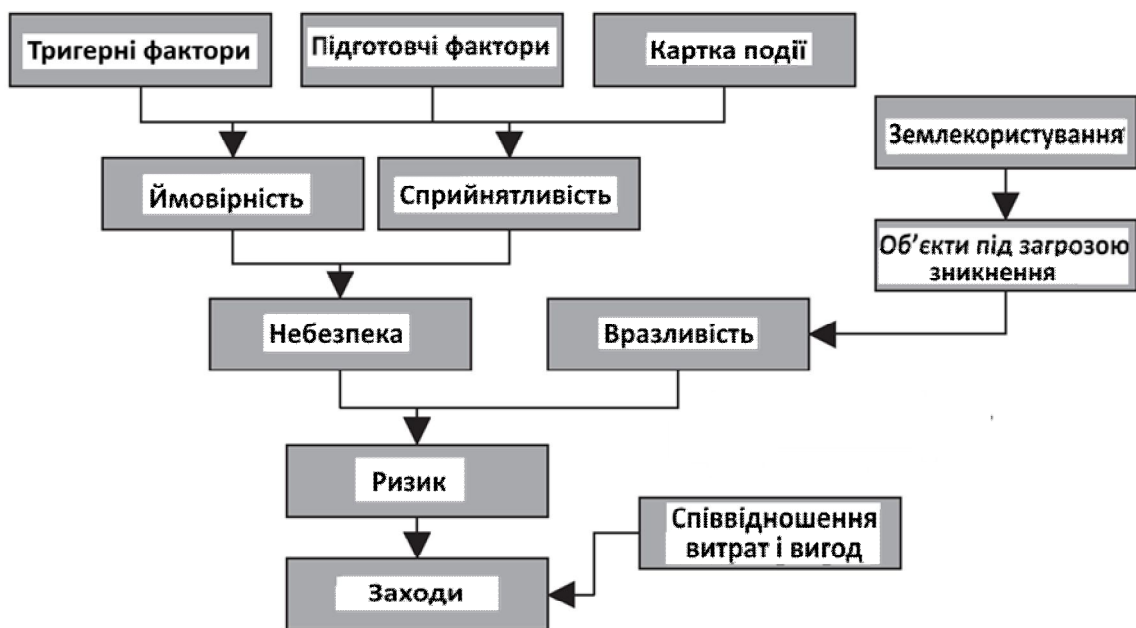


Рис. 1.8. Концепція оцінки ризику для рухів на схилах [23]

Реалізація вищезазначених етапів оцінки ризиків у компаніях і організаціях є предметом управління ризиками. DIN ISO 31000:2018-10 описує, як контролювати ризики безпечного динамічного процесу.

На наступному етапі обговорюється безпека в будівництві. Процедура підтвердження безпеки насипів у деталях відрізняється при видобутку корисних копалин - особливо при активному видобутку корисних копалин - але базується на методах будівництва [11].

Проектування в будівництві регулюється Єврокодами (скорочено ЕС). Це гармонізовані на європейському рівні стандарти, які базуються на імовірній концепції безпеки [37]. ЕС 7 (DIN EN 1997) застосовується до геотехніки. Проектування конструкцій у Єврокодах базується на концепції часткової безпеки [39]. З 1 червня 2012 р. до будівельних норм введено Єврокоди [40].

Відповідно до DIN EN 1997-1:2014-03, безпека геотехнічних конструкцій підтверджується відповідно до рівняння 4, якщо розрахункове значення напруги E_d менше або дорівнює розрахунковому значенню опору R_d .

$$E_d \leq R_d \quad (4)$$

Для розрахункового значення напруги E_d спочатку визначається розрахункове значення ефектів F_d (Рівняння 5, DIN EN 1997-1:2014-03).

$$E_d = Y_F \cdot E_{rep}, \quad \text{де } E_{rep} = \psi \cdot F_k \quad (5)$$

де: Y_F – частковий коефіцієнт безпеки для дій;

ψ – коефіцієнт поєднання;

F_k – характерне значення дії;

E_{rep} – репрезентативне значення дії.

Комбінація

$$F_d = Y_F \cdot F_k \quad (6)$$

Якщо розрахункові значення для геотехнічних параметрів визначаються безпосередньо і не потрібно брати до уваги розрахункові значення для геометричних специфікацій, тоді застосовується наступне

$$E_d = F_d \quad (7)$$

До номінального значення опору R відноситься наступне

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (8)$$

Відповідно до [37], напруження E і опір R можна описати щільністю ймовірності на основі теорії ймовірностей. Забезпечення надається, коли:

$$p_f = P(R < E) < p_{f0} \quad (9)$$

де p_f – ймовірність відмови;

R – опір;

E – стрес;

p_{f0} – допустима ймовірність відмови.

У будівництві допустима ймовірність відмови p_{f0} по суті виражається через часткові коефіцієнти безпеки Y_F і Y_R (див. рівняння 6-8). Вони викладені в стандартах Єврокодів. Щоб визначити розмір часткових коефіцієнтів безпеки, Єврокод 0 (DIN EN 1990:2010-12) містить пропозиції, які відтворюються нижче.

По-перше, вводяться класи наслідків пошкоджень (див. табл. 1.5).

Таблиця 1.5

Класи наслідків пошкодження (DIN EN 1990:2010-12)

Клас	Характеристики	Приклади інженерних споруд
СС 3	Важкі наслідки для життя людини або дуже значні економічні, соціальні чи екологічні наслідки	Трибуни, громадські будівлі з серйозними наслідками через аварію (наприклад, концертний зал)
СС 2	Середні наслідки для життя людини, значні економічні, соціальні чи екологічні наслідки	Житлові та офісні будівлі, громадські будівлі з середніми наслідками аварії (наприклад, офісна будівля)
СС 1	Низький вплив на життя людини та невеликий або незначний економічний, соціальний або екологічний вплив	Сільськогосподарські будівлі без регулярного руху людей (наприклад, сараї, теплиці)

Класи наслідків пошкодження в таблиці 1.5 можуть бути пов'язані з класами надійності на основі індексу надійності β (див. таблицю 1.6).

Для визначення показника надійності β виконують наступне. По-перше, дії E та опори R вважаються нормально розподіленими, причому середнє значення μ_R опорів більше, ніж середнє значення μ_E дій. Виходячи з цього, функція граничного стану g розраховується відповідно до рівняння 10. Функція граничного стану g також є нормально розподіленою випадковою величиною.

$$G = R - E, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (11)$$

Згідно з рівнянням 11, індекс надійності β є часткою середнього значення та стандартного відхилення функції граничного стану g .

Зв'язки між рівняннями 10 і 11 показані на рис. 1.9.

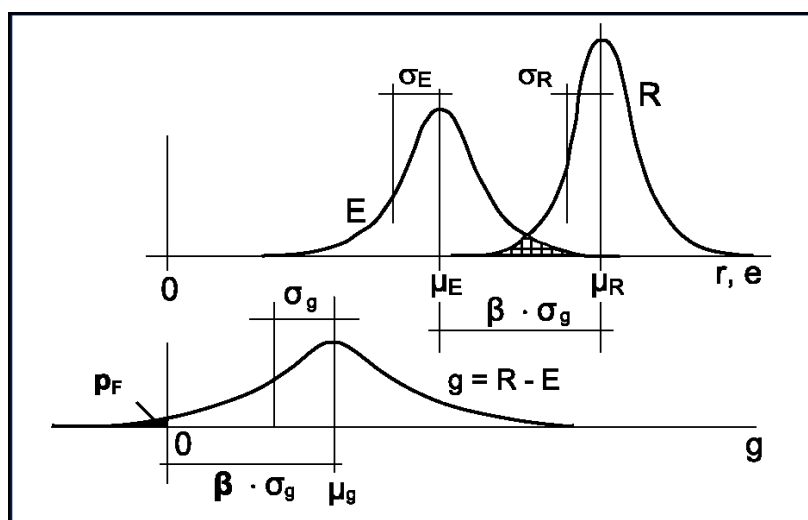


Рис. 1.9. Визначення ймовірності відмови p_F та індексу надійності β (за [41])

DIN EN 1990:2010-12 пропонує мінімальні значення для індексу надійності β та пов'язує їх із класами пошкоджень із таблиці 1.5 (див. табл. 1.6).

Рекомендації щодо мінімальних значень індексу надійності β
(DIN EN 1990:2010-12)

Клас	Клас надійності	Мінімальне значення індексу надійності β	
		Звітний період 1 рік	Звітний період 50 років
СС 3	RC 3	5,2	4,3
СС 2	RC 2	4,7	3,8
СС 1	RC 1	4,2	3,3

Рівняння 12 із DIN EN 1990:2010-12 показує зв'язок між індексом надійності β та ймовірністю відмови p_f . Оскільки кумулятивна функція розподілу для стандартизованого нормального розподілу Φ не має замкнутого рішення, використовуються табличні значення (табл. 1.7, інші табличні значення також можна знайти – [37]).

$$p_f = \Phi(-\beta), \quad (12)$$

де Φ – кумулятивною функцією розподілу для стандартизованого нормального розподілу

Таблиця 1.7

Зв'язок між індексом надійності β та ймовірністю відмови p_f

p_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Залежність від мінімального показника надійності пошкодження f_0 наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Порівняння мінімального значення індексу надійності β з DIN EN 1990:2010-12 та ймовірність відмови p_f

Мінімальне значення індексу надійності β		призначеної ймовірності відмови p_f	
Звітний період 1 рік	Звітний період 50 років	Звітний період 1 рік	Звітний період 50 років
5,2	4,3	$1 \cdot 10^{-7}$	$8,54 \cdot 10^{-6}$
4,7	3,8	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
4,2	3,3	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 1.8 дає уявлення про цільові значення ймовірностей відмови, з якими працює Єврокод. При інтерпретації значень слід зазначити, що ця ймовірність відмови застосовується на верифікації і, отже, зазвичай на рівні компонентів [37]. Щоб визначити ймовірність відмови на системному рівні, можливі комбінації та послідовності відмов компонентів необхідно перевірити за

допомогою аналізу дерева відмов [37]. Не кожна поломка компонента призводить до відмови всієї системи і, таким чином, до небезпеки для людей [37]

На прикладі мостів Proske порівнював цільові значення ймовірностей відмови від проекту з фактичною частотою відмов [42, 43]. Провал визначили як обвал мосту. Це кінематичний ланцюг, який веде до руйнування. Крім того, передбачалося, що доречним є лише доказ балансу або вантажопідйомності, і що ймовірність відмови мосту пов'язана з ймовірністю відмови цього доказу.

Спостережувана частота руйнувань мостів становить від 10^{-4} до 10^{-5} на рік [42]. Відповідно до Proske, ці результати добре узгоджуються з цільовими значеннями ймовірностей відмови порядку 10^{-6} , оскільки вони застосовуються до нових конструкцій. Однак фактична поломка зазвичай відбувається в застарілих конструкціях, які, швидше за все, вийдуть з ладу. Крім того, людська помилка враховується лише в спостережуваній частоті відмов [42].

Наведена вище концепція Єврокоду базується на процесі розробки, який бере свій початок у 1970-х роках

- Статистично підтвержені характеристики надр навряд чи можна отримати на практиці
- розкид характерних значень – більше, ніж в інших областях будівництва;
- частини «структури» не видно;
- статистичні розподіли без нижніх і верхніх меж не є практичними для геотехнічної інженерії;
- людські помилки під час планування та виробництва не враховуються, навіть якщо вони є значною причиною пошкодження.

Існує також проблема, що в деяких геотехнічних перевірках ефекти та опір не можуть бути чітко розділені [40].

Із зазначених причин глобальні коефіцієнти безпеки були переведені в часткові коефіцієнти безпеки. Рівняння 13 показує з'єднання як приклад для методу виявлення GEO-2 згідно з DIN 1054:2010-12 [40]

$$\gamma_R = \frac{\eta_{global}}{\gamma_{G,Q}} \quad (13)$$

де η_{global} – глобальний фактор безпеки; $\gamma_{G,Q}$ – зважений і усереднений частковий коефіцієнт міцності для постійного і зміна стресів

Шляхом перетворення глобальних коефіцієнтів безпеки в часткові коефіцієнти безпеки слід підтримувати попередній рівень безпеки, який, виходячи з досвіду, привів до безпечних і економічних конструкцій, а також пробачив «незначні» людські помилки [40]. Наприклад, розміри фундаментних конструкцій повинен залишатися приблизно таким же [40]. Ця мета розглядалася в ряді публікацій на основі зразкових доказів і, якщо необхідно, були зроблені пропозиції щодо коригування часткових коефіцієнтів безпеки [40], який дотримується тієї самої концепції проектування, що й в інших сферах, і, таким чином, враховує політичну мету європейської гармонізації. «модифікована глобальна концепція безпеки» [40].

1.2.2. Розрідження гірських порід у відвалі

Поняття про розрідження порід у відвалі. Розрідження ґрунту — це процес, при якому ґрунт за певних умов втрачає міцність на зсув і набуває властивостей рідини. Зрідження ґрунту зазвичай визначається його вимогами та проявами.

Термін «зрідження» узагальнює різні процеси в літературі, тому Casagrande [25] розрізняє «фактичне зрідження» і «циклічне зрідження» [44], розрідження породи можна розділити на «потік», «розрідження» та «циклічне розм'якшення». У той час як «поточне розрідження» або «фактичне розрідження» вимагає монотонного або циклічного збудження та призводить до повного розм'якшення, при «циклічному розм'якшенні» або «циклічному розрідженні» деформації зсуву накопичуються при циклічному збудженні, а розм'якшення відбувається лише при безперервному збудженні. Останній процес, «циклічна рухливість» [45, 46], відіграє важливу роль насамперед у сейсмотехніці та фундаменті циклічно напружених конструкцій у піску (офшорні вітрові турбіни) тут не в центрі уваги.

Karl Von Terzaghi [47] описав цей процес. Він говорить про раптове падіння міцності на зсув від нормального значення до нуля і називає це «спонтанним розрідженням», за словами Terzaghi, причиною цього є руйнування структури насиченого водою піску в поєднанні з раптовим розрідженням, але тимчасове підвищення тиску порової води перетворюється на суспензію, яка після завершення рухів знову осідає і може утворювати більш щільну структуру [47].

Terzaghi називає граничні умови спонтанного розрідження ґрунту [47]:

- водонасичений ґрунт;
- вільне зберігання (вміст пор $n > 44\%$);
- ефективний розмір зерна $d = 10-0,1$ мм;
- число нерівномірності $c_u < 5$.

За цих умов можливе розрідження ґрунту навіть без зовнішнього подразника. При сильному подразнику («раптовий і сильний шок» [47]) ґрунти, які не відповідають вищевказаним критеріям, також можуть бути зрідженими.

Концепція ефективних напружень, яку він описує як одне з найважливіших рівнянь у механіці ґрунту, також сходиться до Terzaghi [47].

$$\sigma = \sigma' + u \quad (14)$$

де σ – загальна напруга; σ' – ефективна або ефективна напруга; u – нейтральний натяг (поровий тиск води).

Förster [48] вказує на те, що недреновані умови є необхідною умовою для зрідження. Крім того, тенденція до зменшення об'єму під час зсуву є передумовою розрідження ґрунту.

$$e > e_{krit} \quad (15)$$

де e – число пор; e_{krit} – критичне число пор.

Нерівність 15 не слід розглядати як єдиний критерій [48].

Згідно з [14], розрідження викликають досить швидкі та сильні механічні збурення, які називають початковими. Розрідження є спонтанним, якщо початкове – як завгодно мале. Стосовно ґрунту згадуються такі критерії [14]:

- велика водонасиченість;
- нещільне зберігання, в якому будь-який зсув є скорочувальним;

- невелике злипання зерен;
- поганий дренаж, пов'язаний з поровою водою та повітрям.

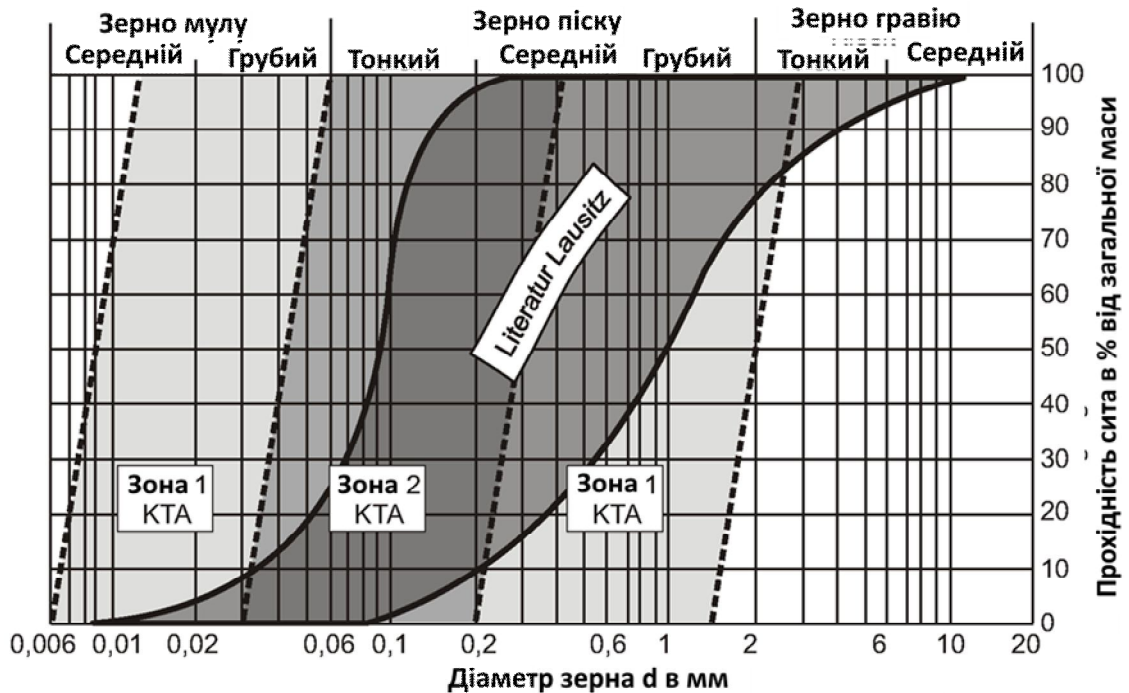


Рис. 1.10. Смуга зернистості змішаних гірських порід, чутливих до розрідження (відповідно до [49, 50])

Від Kessler [51] також згадують критерії, які є передумовою розрідження. На додаток до вищезазначеного точки також демонструють округлу форму зерен і низький когезійний зв'язок (низька частка дрібних зерен). Наявність (заповнених газом) макропор згадується як сприяння зрідженню.

У [52] змінні гірських порід, які впливають на виникнення їх розрідження, узагальнено таким чином:

- лінія зернистості лежить у смузі зернистості змішаних гірських порід, чутливих до розрідження, згідно з рис. 1.10;
- поведінка стискаючого матеріалу при зсуві;
- майже водонасичений матеріал і, отже, високе число насичення S_r ;
- майже недреновані умови (швидкість зростання тиску порової води в зоні зсуву більша, ніж швидкість зниження тиску порової води внаслідок відтоку).

У літературі існують різні обмеження для діапазону розміру зерна гірських порід, чутливого до розрідження. На рис. 1.10 показано критерій «рожевого буклету» [49], який часто цитується в літературі про район видобутку бурого вугілля. Крім того, на рис. 1.10 міститься критерій згідно з КТА 2201.2 [50]. Тут обговорюється можливість розрідження гірських порід в зонах 1 і 2, причому розрідження ґрунту більш імовірно в зоні 2.

1.2.3. Фактори впливу

У [52] зроблено різницю між змінними впливу, які впливають на виникнення розрідження гірських порід, і змінними впливу, які впливають на повер-

хню місцевості після того, як відбулося розрідження гірських порід. Тут обговорюються фактори, що впливають на виникнення розрідження.

У той час як межу зернистості гірських порід можна визначити відносно легко, і також можна стверджувати про водонасиченість, багато факторів, що впливають на розрідження, залежать від умов і тому їх важко визначити [53]. Це змінні, які змінюються з розподілом фаз у гірських породах, тобто число пор e або частка пор n , вміст води w і число насичення Sr [48]. Критична частка пор n_{krit} , як величина, що залежить від напруги, також залежить від стану [54].

Кількість пор, що залежить від напруги, або частка пор, що залежить від напруги.

Кількість пор e і частка пор n описують частку об'єму пор у гірських породах, але відрізняються за своїм еталонним значенням (див. рівняння 16 і 17 [48]). Частку пор і кількість пор можна перетворити одна на одну (рівняння 18 [48]).

$$e = \frac{V_P}{V_K} \quad (16)$$

$$n = \frac{V_P}{V} \quad (17)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad (18)$$

де V_P – об'єм пор, V_K – об'єм зерен, V загальний об'єм.

Якщо інше не зазначено, тут переважно використовують вміст пор.

Частка пор у ґрунті залежить від його генезису. Початкова частка пор виникає під час заповнення або осадження. Розмір початкової частки пор залежить в основному від вмісту води (вологий чи сухий) [55, 56, 57].

У міру прогресування генезису гірських порід на частку пор впливають осідання та спади. Розрахунки відбуваються через збільшення стресу [58]. Осідання відбуваються через незалежні від напруги перегрупування зерен, наприклад, через втрату капілярної когезії при підвищенні рівня ґрунтових вод [57]. Через згадані процеси частка пор, присутніх *in situ*, менша, ніж початкова частка пор [59].

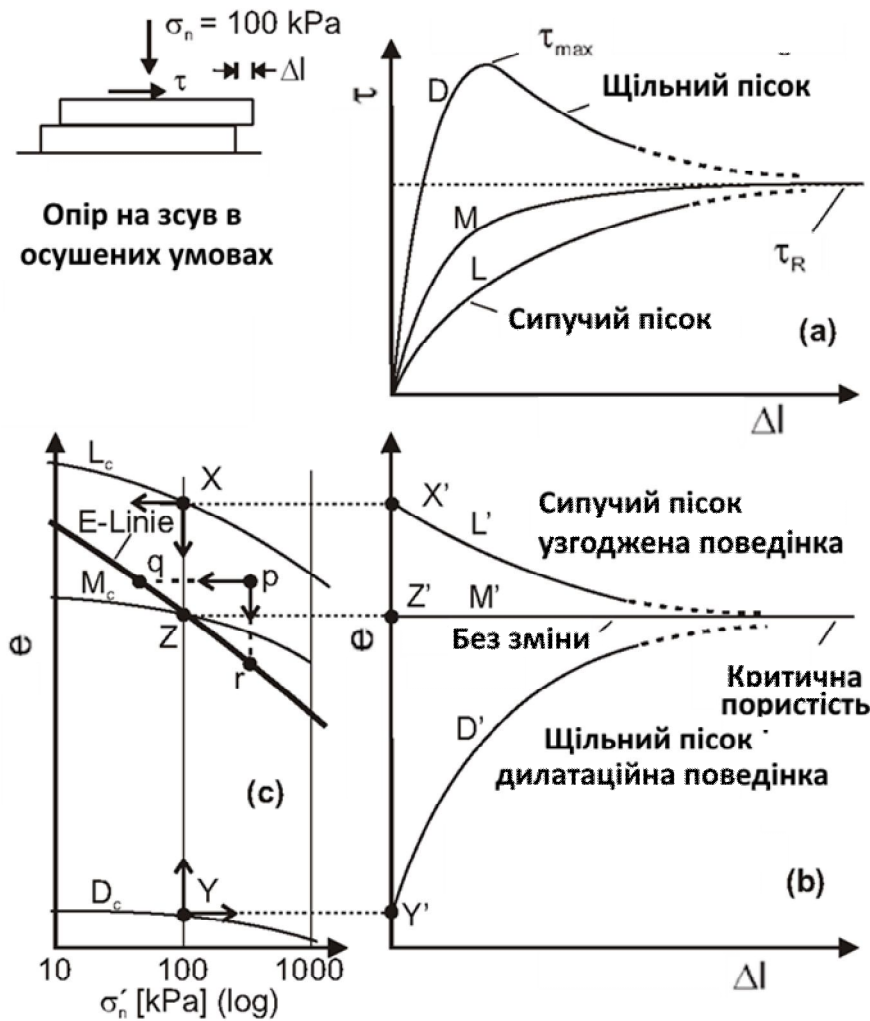


Рис. 1.11. Отримання критичного числа пор із випробувань на зсув (відповідно до Casagrande [60])

На рис. 1.11 показано визначення критичного числа пор e_{krit} за результатами випробувань на зсув. Це залежний від напруги стан, який виникає після великих шляхів зсуву в зрізаному матеріалі та не залежить від початкового стану [60, 56]. Лінія L' на рис. (b) показує, як об'єм пухкого піску зменшується зі збільшенням деформації зсуву та наближається до граничного значення. Лінія D' для щільно упакованого піску показує дилатантну поведінку. Об'єм збільшується зі зсувом, але наближається до тієї самої межі. Ця межа відповідає критичному числу пор e_{crit} . Лінія M' показує, що субстрат, який уже зберігається з критичною кількістю пор, не зазнає подальших змін в об'ємі.

На рис. 1.11 (a) лінія D представляє щільний пісок. Напруга зсуву різко зростає зі збільшенням шляху зсуву і досягає максимуму, перш ніж впасти до постійного значення з подальшою деформацією зсуву. Casagrande називає це значення залишковою міцністю. Лінії L і M також наближаються до залишкової міцності. Однак це значення не перевищується під час обробки.

Криві L_c , M_c і D_c на рис. 1.11 (c) представляють консолідацію в одометрі для заданої кількості вбудованих пор. Кількість пор при нарузі 100 кПа позначено крапками на рис. 1.11 (c) і перенесено на рис. 1.11 (b) як початкове число пор (вільний X-X'; щільний Y-Y', з критичним числом пор Z-Z'). Якщо кілька випробувань на зсув проводяться за різних нормальних напруг, то, за-

лежно від нормальної напруги, виникають критичні числа пор, які лежать на лінії E.

Casagrande зазначає, що його експерименти проводилися в дренажних умовах без насичення водою. Коли пісок насичений водою і існують недренувані умови, зміни об'єму впливають на поровий тиск води. Цей ефект можна розуміти, якщо ми припустимо, що ґрунт укріплений у точці p на рис. 1.11 (с). Під час зсуву в дренажних умовах критична кількість пор встановлюється на лінії E (точка r), а напруга залишається постійною. Однак, якщо переважають недренувані умови, об'єм залишається постійним при зсуві. Це призводить до зменшення ефективного напруження та збільшення тиску порової води. Випробування на зсув за цих умов призводить до стану, позначеного точкою q на лінії E. Над лінією E (умови скорочення) завжди є зміна зсуву, що включає зменшення об'єму та/або зменшення ефективного напруження (позначене стрілками в точці X). Нижче лінії E (умови розширення) об'єм збільшується при зсуві та/або ефективне напруження збільшується (вказано стрілками в точці Y).

На основі критичного числа пор, знайденого Casagrande, Been і Jefferies, визначили критичний стан [53], який характеризується параметром ψ (Рівняння 19, це стан, в якому різниця між числом пор e , що виникає на місці, і) критичне число пор e_{krit} , яке залежить від ефективного головного напруження σ_1 , наближається до нуля.

$$\psi = e - e_{krit} \quad e_{krit} = f(\sigma_1') \quad (19)$$

Для стисливої поведінки матеріалу застосовується $\psi > 0$, для дилатантної поведінки матеріалу застосовується $\psi < 0$ [53].

Число насичення.

Повне насичення рідко зустрічається в цій області [61]. Рис. 1.12 показує, що бульбашки газу залишаються в пастці навіть нижче рівня ґрунтових вод (визначається як напір, при якому поровий тиск води дорівнює атмосферному тиску). Макропори – важливі, оскільки газ залишається в них під час насичення через капілярний натяг між зернами [62].

Зміна об'єму порід, яка призводить до зміни ефективних напруг, впливає на нейтральні напруги згідно з рівнянням 14, тобто – через поровий тиск. Зменшення ефективних напружень σ призводить до збільшення порового тиску u , тоді як загальні напруги σ_1 є постійними. Хоча вода є приблизно нестисливою, зміна тиску в газовій фазі призводить до зміни об'єму відповідно закону Бойля-Маріотта (рівняння 20). Це призводить до зменшення об'єму ґрунту, що стягується, у недренуваному зсуві.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}, \text{ де } T = const \quad (20)$$

Рис. 1.12 показує, що ця зміна об'єму впливає не лише на частку пор у ґрунті n , а й на критичну частку пор, яку називають n_R . Це означає, що залишкова міцність ґрунту залежить від числа насичення Sr . Рис. 1.13 показує це з'єднання. Важливо, що існують ґрунти з початковими числами пор, у яких залишкова міцність дорівнює нулю в діапазоні $Sr = 0,9 \dots 1,0$.

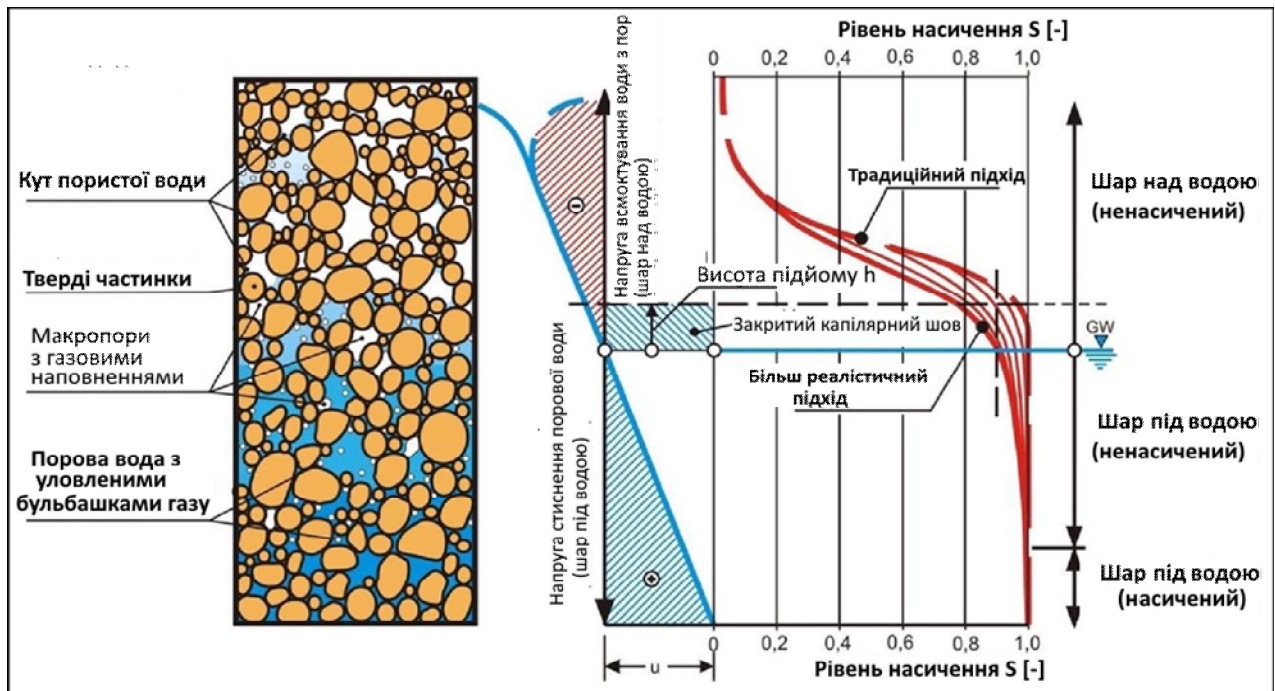


Рис. 1.12. Вплив зміни об'єму на частку пор у ґрунті n , та на критичну її частку n_R [63]

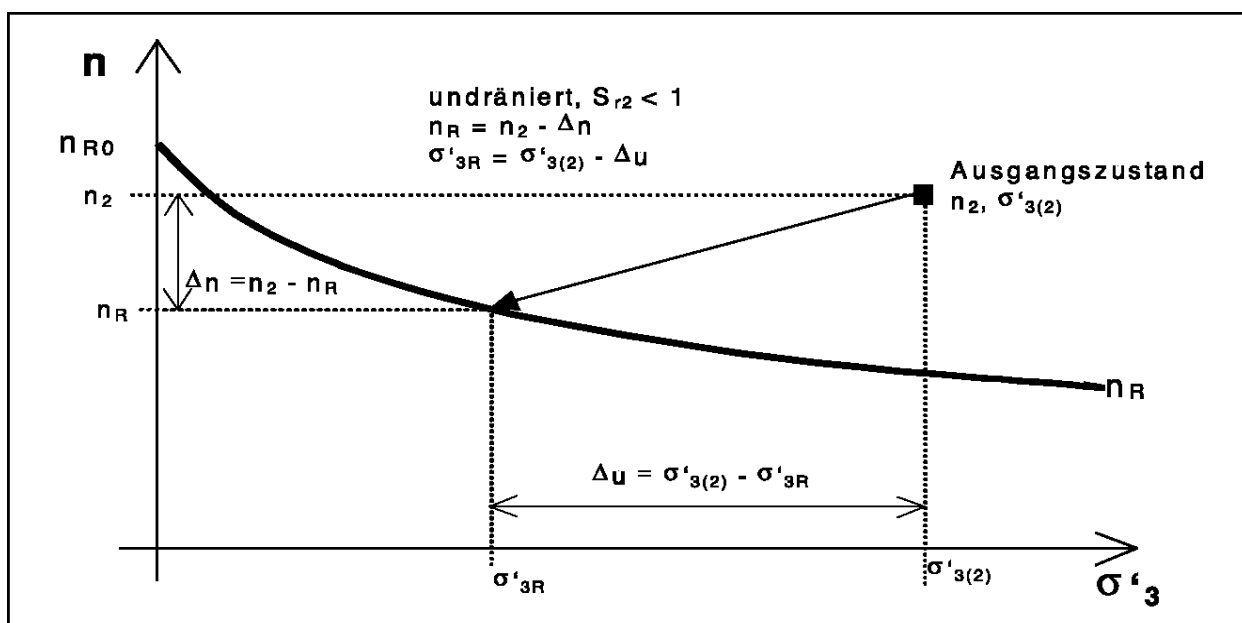


Рис. 1.13. З'єднання показників, наведених на рис. 1.12 [63]

Поровий газ, захоплений гірською породою, забезпечує еластичність ґрунту та діє як буфер для поширення тиску порової води [61, 64]. Однак зміна об'єму та збільшення тиску порової води під час зрідження також викликає нестационарні процеси течії, які можуть бути відповідальними за розширення зрідженої області [61]. Процеси течії, у свою чергу, залежать від частково насиченої проникності для водної фази, яка змінюється зі збільшенням показника насичення S_r (рис. 1.14) [59].

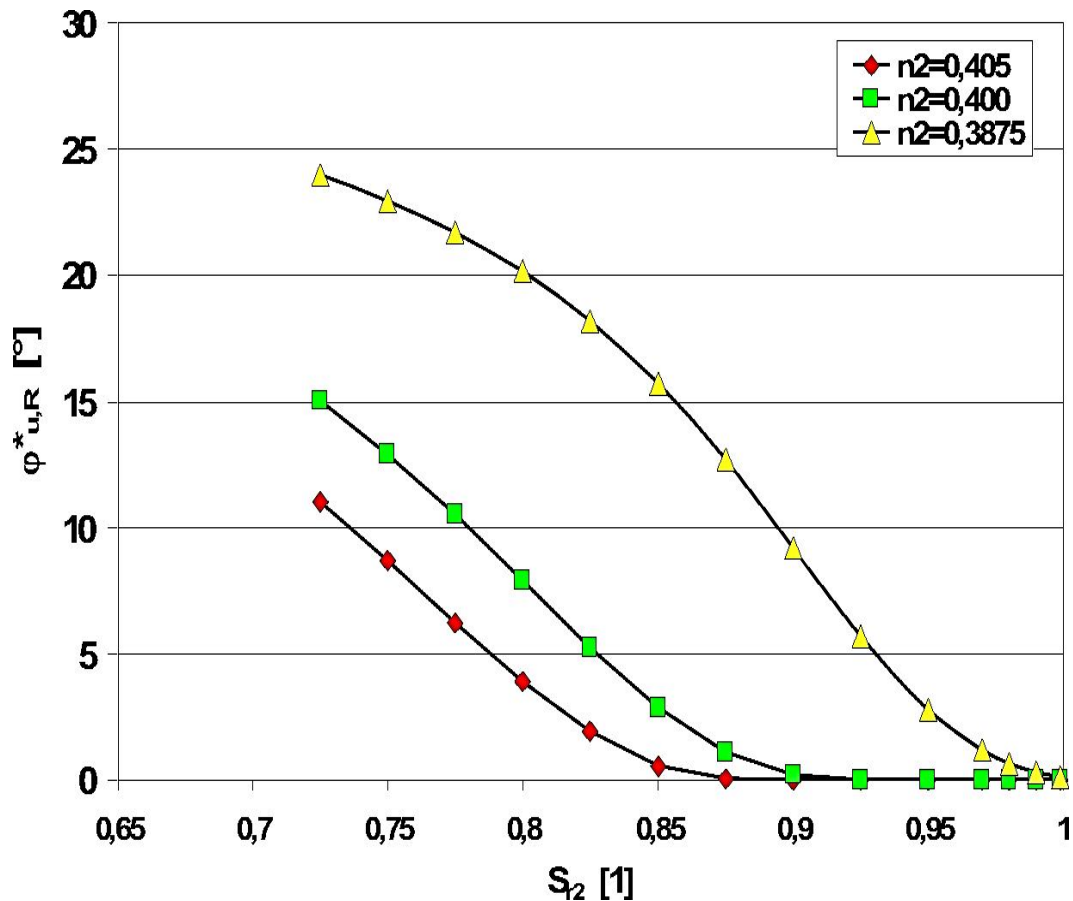


Рис 1.14. Залишкова міцність (виражена як недренована, напружена, залишковий кут тертя (PuR) в залежності від насичення [59]

За даними Gudehus, заповнені газом макропори у насиченому водою ґрунті призводять до більшої чутливості до розрідження ґрунту [62]. Gudehus виправдовує це тим, що коли тиск змінюється, термодинамічна поведінка в макропорі та навколишньому ґрунті відрізняється, і в результаті міцність ґрунту зменшується більше за наявності макропор [62]. Gudehus описує цей ефект на основі уявного експерименту, оскільки його важко відтворити в лабораторних експериментах і ще не можна змоделювати обчислювальним способом [65]. Крім того, він пояснює сипучість зрідженого піску («піщаний шлам») газовими включеннями та порівнює поведінку зі свіжим бетоном [66].

Шляхи стресу та сила.

Зв'язок між напругою консолідації та часткою пор вже був зрозумілий на рис. 1.11. Щоб вивчити напруженість, яка виникає, наведено відповідні дані в табл 1.9 та на рис. 1.15.

Таблиця 1.9

Граничні умови статичного тривісного випробування для визначення характеристик матеріалу, чутливого до розрідження [55]

Позначення	Значення
C	Консолідований тест, надлишковий тиск порової води, що виникає під час консолідації, можна зменшити
A	Анізотропна консолідація, $a_1 - a_3$

U	У недренованих умовах можливий розвиток тиску порової води
p	P пасивний, деформації вносяться ззовні
S	Стиснення, деформація зменшує висоту зразка

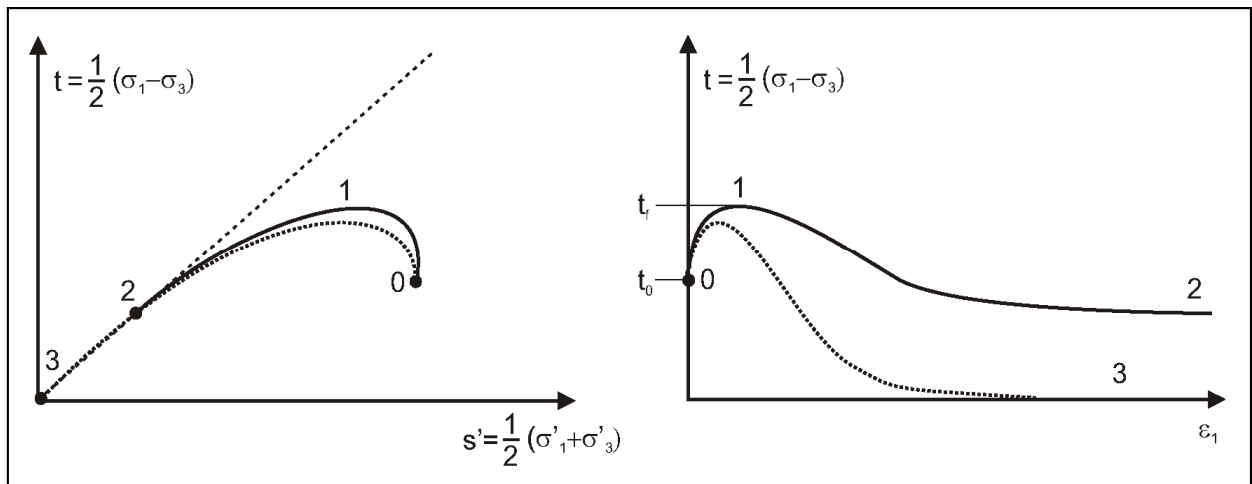


Рис. 1.15. Приклад шляху напруги та робочої лінії двох тривісних випробувань CAU-pS матеріалу, чутливого до розрідження (схема) (згідно [52])

На рис. 1.15 схематично показані траєкторії напруги ліворуч і робочі лінії двох тривісних випробувань праворуч. На початку випробування зразок був анізотропно консолідованим (точка 0), а потім недренованим стиснутим (стиск $\epsilon_1 T$). Тиск у клітині a_3 підтримувався постійним. Напруга девіатора t зростає до моменту його розриву (точка 1). Середня ефективна напруга падає, тому що нейтральна напруга збільшується з розривом і після нього. Суцільною лінією позначено породу із залишковою міцністю $t_R > 0$ (точка 2). Це називається частковим зрідженням. У випробуванні, представленому пунктирною лінією, залишкова міцність падає до відхилення $t = t_R = 0$. (Точка 3 – повне зрідження) [52].

Тривісні випробування, схематично показані на рис. 1.15, починаються в анізотропному напруженому стані. Це відповідає умовам наповненого та насиченого ґрунту [59]. При обрушенні ґрунту у вологому ґрунті капілярний натяг є приблизно ізотропним, тоді як натяг у структурі зерна є анізотропним. Після насичення ізотропний капілярний натяг втрачається, і анізотропія ґрунту може ще більше збільшуватися ($K > K^*$ у рівнянні 21 [67, 59]).

$$K^* = \frac{\sigma'_{h,0} + p_k}{\sigma'_{v,0} + p_k} \quad \text{та} \quad \frac{\sigma'_{h,0}}{\sigma'_{v,0}} \quad (21)$$

де: K^* – коефіцієнт горизонтального напруження породно-вологого краю;
 K – відношення горизонтальних напружень насиченого вістря;
 p_k – ізотропний капілярний натяг (негативний тиск порової води);
 $\sigma'_{h,0}$ – ефективне горизонтальне напруження для $p_k = 0$;
 $\sigma'_{v,0}$ – ефективне вертикальне напруження для $p_k = 0$.

Відповідно до Робертсона, анізотропно консолідовані піски можуть розріджуватися після дуже малих деформацій [44]. Reichel досліджував цей ефект більш детально і виявив сильну залежність енергії, необхідної для розрідження, від співвідношення горизонтальних напружень [68].

На рис. 1.16 показана робоча лінія тесту CAU-pS. Девіатор t_2 , присутній після консолідації та насичення, збільшується під час зсуву до руйнування (t_f), а потім знову зменшується. Припускається, що коли початковий девіатор t_2 при ε_b падає нижче, девіатор падає далі до залишкової міцності t_R . Якщо тепер розглядати стиснення ε як відстань s , а девіатор t як силу F , ми можемо вказати початкову енергію E_t , яка відповідає сірій області $t > t_2$ [68].

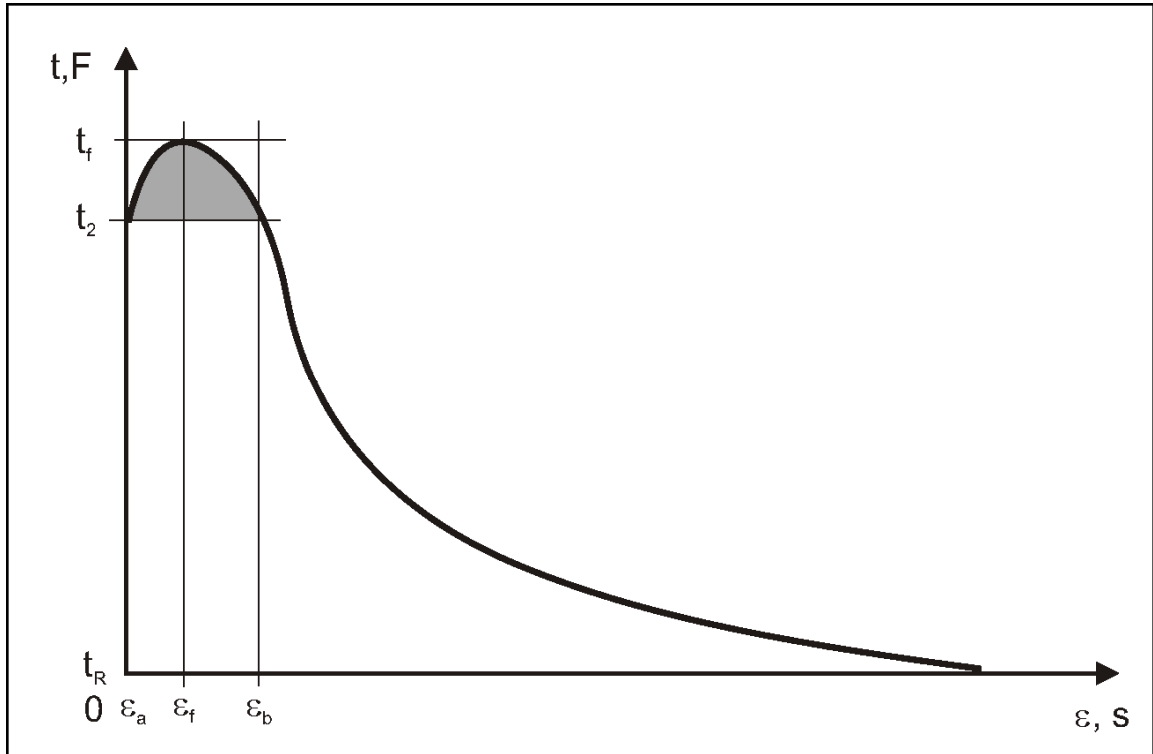


Рис. 1.16. Принцип виведення

Reichel апроксимував форму кривої на рис. 1.16 за допомогою функції та визначив початкову енергію E_t або щільність енергії початкової згідно з рівнянням 22 [68].

$$E_i = \int_{\varepsilon_a}^{\varepsilon_b} (t - t_2) dt \cdot V \quad \text{bzw.} \quad \omega_i = \int_{\varepsilon_a}^{\varepsilon_b} (t - t_2) dt \quad (22)$$

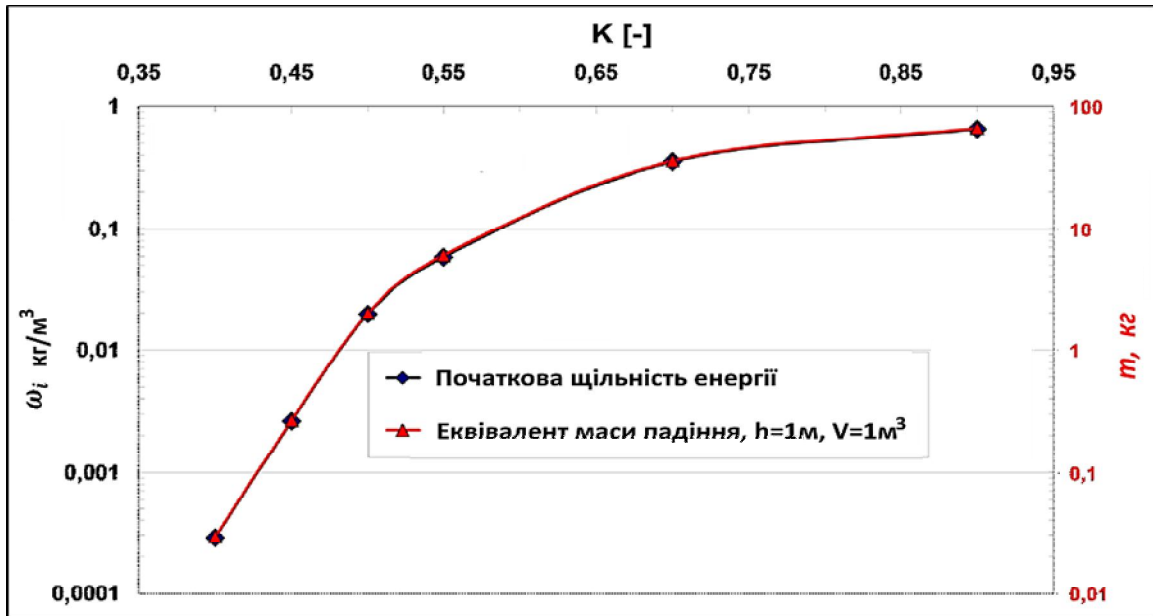


Рис. 1.17. Вплив анізотропії на щільність енергії вихідного (згідно з [68])

Для серії тривісних випробувань (кожен сипучий пісок, $Sr = 1$, $\sigma_1 = 100$ кПа) початкові густини енергії наведені на рис. 1.18, залежно від співвідношення горизонтальних напружень. Для порівняння також порівнювали еквівалент маси падіння. Поділ логарифмічної шкали щільності енергії початкового показує, що відношення головного напруження має сильний вплив на енергію, яка повинна бути прикладена до виходу з ладу в тривісному випробуванні на водонасиченому та нещільно встановленому піску. Зокрема, коли коефіцієнти основних напружень $K < 0,5$, для руйнування потрібно дуже мало енергії.

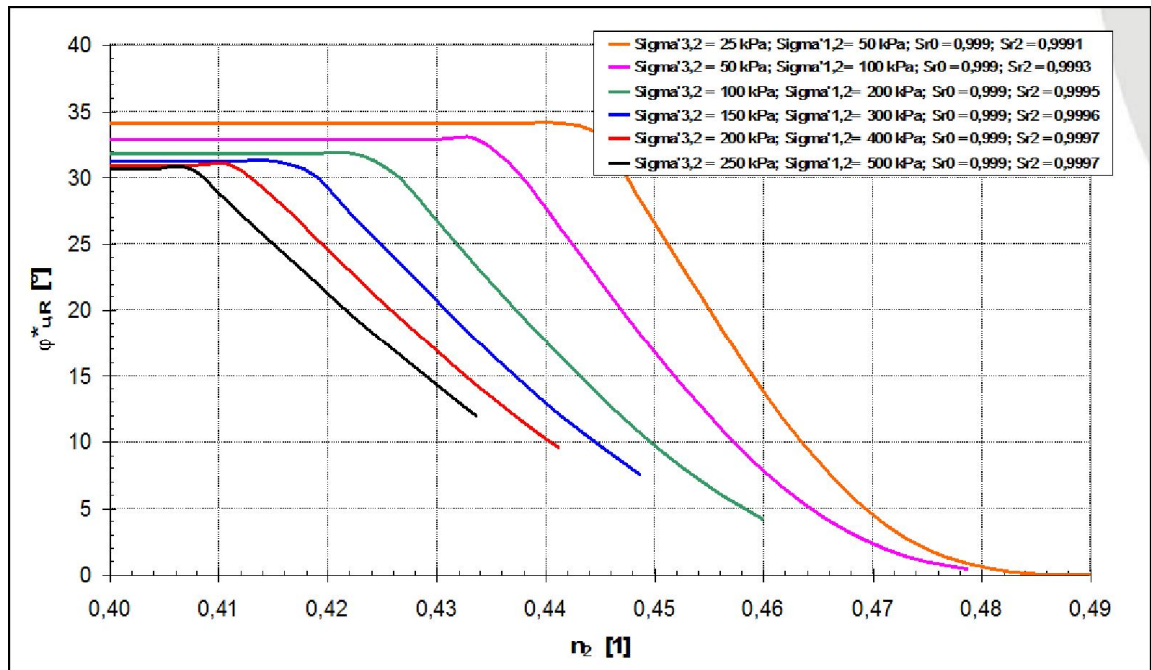


Рис. 1.18. Залишкова міцність (виражена як недренована, напружена залишкова міцність [63])

Кут тертя залежить від частки пор після консолідації та насичення n_2 і рівня напруги ($K = \text{const}$) [69]

Залишкова міцність також може бути представлена як функція частки пор після консолідації та насичення, при цьому необхідно враховувати залежність від напруги критичної частки пор n_{krit} [63]. Рис. 1.18 показує, що, особливо при низькому рівні напруги, навіть невелика зміна частки пор $\Delta n < 0,03$ може призвести до повної втрати залишкової міцності [63, 69].

Той факт, що в пухких насичених водою пісках необхідно застосувати лише невелику кількість енергії і, отже, деформацію до руйнування, також називають крихкою поведінкою [14]. Перелом не виникає заздалегідь, а відбувається раптово і прогресуюче без будь-якої попередньої деформації [24]. Відповідно до DIN 1054:2010-12, для таких ґрунтів неможливо використовувати випробування з граничними станами на основі розробленого механізму руйнування. Для таких доказів передбачається поведінка пластичного матеріалу.

Висновки за розділом 1

В районі видобутку бурого вугілля Lausitz велика кількість відкритих розробок була закрита та рекультивована після 1990 року. Оскільки підземні води піднялися, приблизно з 2006 року сталася значна кількість подій розрідження заскладованих гірських порід, через що заплановане використання відвалів було поставлено під сумнів. До кінця 2018 року виявлено 125 подій, дані яких лягли в основу цієї роботи.

Метою оцінки ризику подій розрідження порід, за наявності в їх складі пухких різновидів на внутрішніх відвалах у Lausitz, було описати основний процес і, на основі цього, кількісно визначити ризику.

Щоб зрозуміти процес розрідження ґрунту, були розроблені моделі процесів, та враховані передумови, які повинні бути присутніми для запуску розрідження ґрунту.

Наслідки події розрідження гірських порід мають особливе значення при оцінці ризику. Встановлено, що ці ефекти суттєво залежать від морфології рельєфу та відстані до рівня ґрунтових вод: на майже рівнинній місцевості відбувається обвал рельєфу, тобто – горизонтальних зсувів на поверхні місцевості немає. На похилій місцевості просідання потоку може виникнути, якщо рух йому не перешкоджає.

Крім того, розглянуто причини явищ, які виникають у зв'язку з процесами розрідження гірських порід.

Також досліджено приклади з літератури, які стосуються класифікації небезпек та оцінки ризиків, з урахуванням того, щоб приклади охоплювали різні методи та застосовувалися в предметних областях, які технічно можна порівняти з розглянутою проблемою. У літературі широко описано, що для визначення ризику необхідним є глибоке розуміння процесу та що створення реєстру подій є важливою основою для оцінки ризику.

Розділ 2

ВИЗНАЧЕННЯ Й ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ РОЗРІДЖЕННЯ ПОРІД ВІДВАЛІВ

2.1. Процес і ефекти

Зсув у зв'язку з розрідженням ґрунту в літературі називається «просадочним потоком» [70]. У цьому контексті Terzaghi повідомляє про «піскопади» в прибережній зоні Нідерландів неподалік від гирла Шельди лише на злегка похилих ділянках узбережжя, де спостерігалися раптові «просідання» сипучого піску, що супроводжується глухим, схожим на грім шумом. Потім пісок ковзає горизонтально в бік моря (див. рис. 2.1). Найбільший задокументований зсув охопив об'єм $1\,600\,000\text{ м}^3$ [71]. Terzaghi підкреслив важливість «топографічних і гідрографічних місцевих умов» для розуміння явища просідних потоків [71].



Рис. 2.1. Вигляд у розрізі потоку просідання або «піскопаду» на узбережжі Нідерландів [71]

Vogt та ін. [24] пояснюють зсуви просідних потоків на насипах і провали гірських порід просідними потоками на ділянках, віддалених від насипу. В [24] процес зсуву розрахункового потоку описано так:

- Критичний стан напруги зазвичай виникає біля підніжжя відвалу, і в результаті відбувається локальне розрідження.
- Розрідження поширюється на сусідні ділянки, що призводить до регресивного розлому у глибину, в якому утворюються естафетні розломи.
- Через опір ґрунтово-вологісного покриву або посівних ділянок осідний потік припиняється.

Мацхак описує два потоки осідання під час відкритих гірничих робіт у Lausitz [72]. В обох випадках водонасичені старі відвали були засипані під час спрацьовування зсувів. Потоки просідань виникли раптово без будь-яких попередніх очевидних ознак і швидко стихли протягом кількох хвилин. Мацхак описує уражений ґрунт як пухкий дрібний пісок. Послідовно рухомі льоди, східчасті авульсії та піщані вулкани описані як їх прояви.

Casagrande розробив теорію про те, що зріджений пісок змінює свою структуру в процесі розрідження [60]. На відміну від статичного стану, зерна

можуть вільно рухатися відносно сусідніх зерен, обертатися і мати між собою дуже невелике тертя. Відповідно він поділяє процес розрідження ґрунту на фази:

- Розрідження ґрунту починається з ланцюгової реакції («ланцюгового читання» [60]) і певний об'єм ґрунту розріджується.
- Після цього відбувається рух потоку, при якому ґрунт має «структуру потоку».
- Після закінчення потоку зерна осідають і утворюють нову структуру. Зменшується надлишковий поровий тиск води. Нова структура має вищу щільність зберігання та більший захист від розрідження ґрунту.

Відповідно до Casagrande, рух потоку не є обов'язковим, оскільки зріджена ділянка в землі, яка не відчуває жодного навантаження, не може текти [60]. У такому випадку єдиним доказом розрідження є піщані вулкани, які утворюються внаслідок зниження надлишкового тиску порової води вгору [60].

Робота Robertson і Fear стосується зсувів, спричинених розрідженням ґрунту. Тому необхідна геометрія, яка допускає ковзання: «ковзання течії відбудеться лише в тому випадку, якщо може розвинути кінематично допустимий механізм» [44]. Отже, ковзання неможливе для майже плоскої поверхні [44].



Рис 2.2. Схема проблем, пов'язаних з розрідженням порід відвалів, які необхідно враховувати (згідно з [56])

Ishihara, який переважно займається розрідженням гірських порід, пов'язаним із землетрусами, запропонував блок-схему (рис. 2.2), яка узагальнює проблеми, пов'язані з розрідженням гірських порід. Тому на рівній місцевості важливо, чи може гірська порода розріджуватися. Якщо відповідь на це запитання ствердна, тоді необхідно оцінити вертикальне зміщення, оскільки це становить загрозу для лінійної інфраструктури, такої як трубопроводи. На схилій місцевості необхідно провести додаткові дослідження, щоб визначити, чи міг статися зсув. Відправною точкою для зрідження в Ishihara є збудження землетрусу [56].

Gudehus описує процес розрідження як ланцюгову реакцію [66]. При локальному перевищенні стабільності виникає хвиля зсуву в структурі зерен і хвиля тиску в поровому флюїді [66]. В результаті сусідні, майже критичні ділянки стають критичними і розрідження поширюється далі у вигляді фронту. Генерується сейсмічна енергія [66]. Ланцюгова реакція триває до досягнення стабільних ділянок. Розрідження може поширюватися від кількох метрів до кількох сотень метрів. Побічним ефектом, на який вказує Gudehus, є сегрегація в суспензії. Зокрема, бульбашки газу можуть підніматися й утворювати подушку під непроникними шарами, що забезпечує шар ковзання для блоків вище [66].

Як обов'язкову умову осідного потоку [14] вказує відсутність перешкод для бокового відхилення в зрідженій зоні (біля насипу). Цілком можливо, що подія просідання в озері відкритих рудничних залишків спричинить нагони, які, у свою чергу, спровокують просідання.

За даними Wittig [73], час, тривалість, розмір і прояв події розрідження ґрунту неможливо передбачити, якщо вона не спровокована навмисно.

Існують різні ініціатори, які можуть викликати розрідження. Оскільки неможливо визначити, який саме початковий тригер спровокував розрідження, поведінкові вимоги не можуть, навпаки, забезпечити будь-яку безпеку. Тому Wittig рекомендує враховувати наслідки розрідження гірських порід, яке вважається таким, що відбулося.

Згідно з [73], ефекти розрідження гірських порід залежать від утворення системи двох шарів, що складається із вологого та зрідженого, насиченого водою. Оскільки зріджений поводить себе як рідина, в ньому утворюється рівновага гідростатичного тиску, що впливає на плаваючий на ньому вологий ґрунт. Відповідно до [73], цю модель можна використовувати для проведення статичних спостережень Землі, які надають інформацію про можливі вертикальні та горизонтальні зсуви.

У [74] за допомогою моделей досліджено поведінку зрідженого ґрунту під час седиментації. Wittig розробив математичний опис процесу як ударну хвилю зміни щільності [74].

У [75], серед іншого, досліджено зв'язок між часткою пор і в'язкістю суспензії піску і води в процесі седиментації після зрідження. Динамічна в'язкість суспензії зростає зі зменшенням частки пор. Осадження починається, коли припиняється зсув і, отже, змішування. Суспензія заспокоюється і стає все більш щільною. Якщо відновленого збудження немає, то суспензія, що осіла, має меншу тенденцію до повторного розрідження, ніж у вихідному стані [75].

Крім того, було доведено, що суспензія піску і води має властивості рідини Бінгема.

Gehrisch та ін. повідомляють про великомасштабне раптове опускання з величиною опускання від 2,5 до 3,0 м [76]. Вони простягнулися в кар'єрі Шлабендорф-Норд вздовж відвалу розкривних конвеєрних мостів на довжину 300 м і вперше з'явилися в 1979 році, коли було насипано плужний відвал. Не завжди можна було призначити початкову точку «раптових просідань», однак не вдалося встановити зв'язок із сипучим піском у відвалі, який мав високий ризик розрідження та високий рівень ґрунтових вод.

2.2. Заходи щодо зменшення можливості розрідження гірських порід

Якщо ґрунт піддається ризику розрідження і не може бути замінений, то на появу розрідження гірських порід можна вплинути зміною стану. Зокрема, ущільнення має позитивний ефект, оскільки зменшує ймовірність розрідження за рахунок зменшення частки пор [14].

Під час ущільнення слід чітко розрізняти, у вологому стані чи у насиченому водою. У водонасиченому на успіх ущільнення суттєво впливає зниження надлишкового тиску порової води та осадження зріджених ділянок [77]. Місце розрідження, яке викликається заходом ущільнення [78], призводить до осадження зрідженого ґрунту:

- зменшена частка пор,
- знижена анізотропія в ґрунті [79],
- макропори розчиняються [65].

Ці процеси можна підтримувати шляхом руйнування та реорганізації структури зерна [80]. При ущільненні водонасичених відвалів в основному використовують ущільнення вибухом [81, 82]. Методи ущільнення, доступні на даний момент.

Таблиця 2.1

Методи практики рекультивациі пухких відвальних гірських порід LMBV (відповідно до [83])

Глибоке ущільнення	Приповерхневе ущільнення	Поверхневе ущільнення
Ущільнення вібраційним тиском	Ущільнення падінням ваги**	Ущільнення полігональним катком**
Вібраційне трамбування	Імпульсне ущільнення**	Ущільнення катком**
Струйне ущільнення*	Легке вібраційне ущільнення	Ущільнення гладким роликком**

Іншим варіантом рекультивациі є впровадження елементів, які прискорюють зниження надлишкового тиску порової води [24]. Це можуть бути колони з водопроникного ґрунту (гравію) [84] або дренаж із геосинтетики [85]. Прискорене зниження надлишкового тиску порової води покликане перервати ланцюгову реакцію розрідження гірських порід та прискорити седиментацію.

Перфораційні отвори мають подібний ефект при вибуховому ущільненні, що служить для рівномірного зниження порового тиску [82].

Спільним для всіх процесів ущільнення є складність доведення успішності ущільнення. Це вимагає високої щільності даних через неоднорідність кінчика [86, 87].

2.3. Просторові особливості родовища Lausitz

У цьому підрозділі досліджуються заблоковані відкриті розробки в буровугільному регіоні Lausitz, якими керує LMBV (див. рис. 2.3).

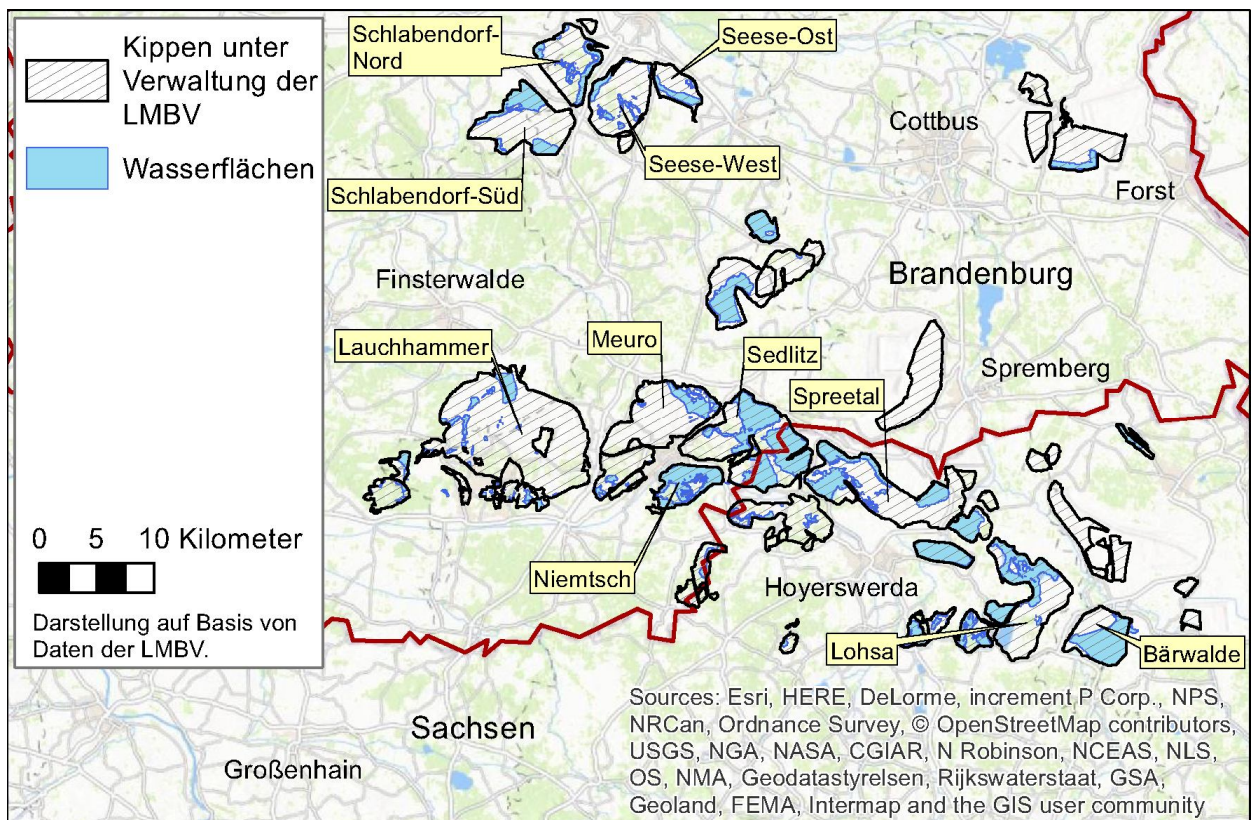


Рис. 2.3. Огляд ділянки, що розглядається, позначення важливих відкритих розробок (Джерела: Esri, HERE, DeLorme, increment P Corp., NPS, NRCan, Ordnance Survey, © OpenStr)

Територія, що розглядається, по суті поділяється на північну зону, яка включає кар'єри Schlabendorf-Süd, Schlabendorf-Nord, Seese-West і Seese-Ost, і південну область, яка простягається вздовж кордону між Саксонією та Бранденбургом у плейстоценовому льодовику. Гірничодобувні райони Требіц-Домсдорф, Берцдорф, територія на південь від Франкфурта (Одер) і менші гірничодобувні райони в південній частині округу не розглядаються далі через їхні особливі умови. Це також стосується акцій LMBV у діючих або нещодавно закритих відкритих розробках LEAG (Reichwalde, Nochten, Welzow-Süd, Cottbus-Nord і Jänschwalde).

2.3.1. Геологія Lausitz

Геологічні надра Lausitz можна стратиграфічно приблизно розділити на дотретинну основу, третинну та четвертинну формації. Оскільки інтерес тут представляють насамперед осади, з яких складаються відвали, важливе значення має геологічна класифікація вироблених пластів. У регіоні видобутку бурого вугілля Lausitz 1-й і 2-й міоценові пластові комплекси відобувалися відкритими кар'єрами [88], [89]. Два пластових комплекси були сформовані в міоцені (ділянка неогену, яка поєднується зі старшим палеогеном для формування третинного періоду) приблизно від 12 до 17 мільйонів років тому [88]. Відповідно, ухили виготовлені з матеріалу (молодшої) підвісної стіни. Це включає в себе верхню частину формації Бріске, формації Меуро і Рауно як третинний матеріал і четвертинний матеріал плейстоцену (рис. 2.4).

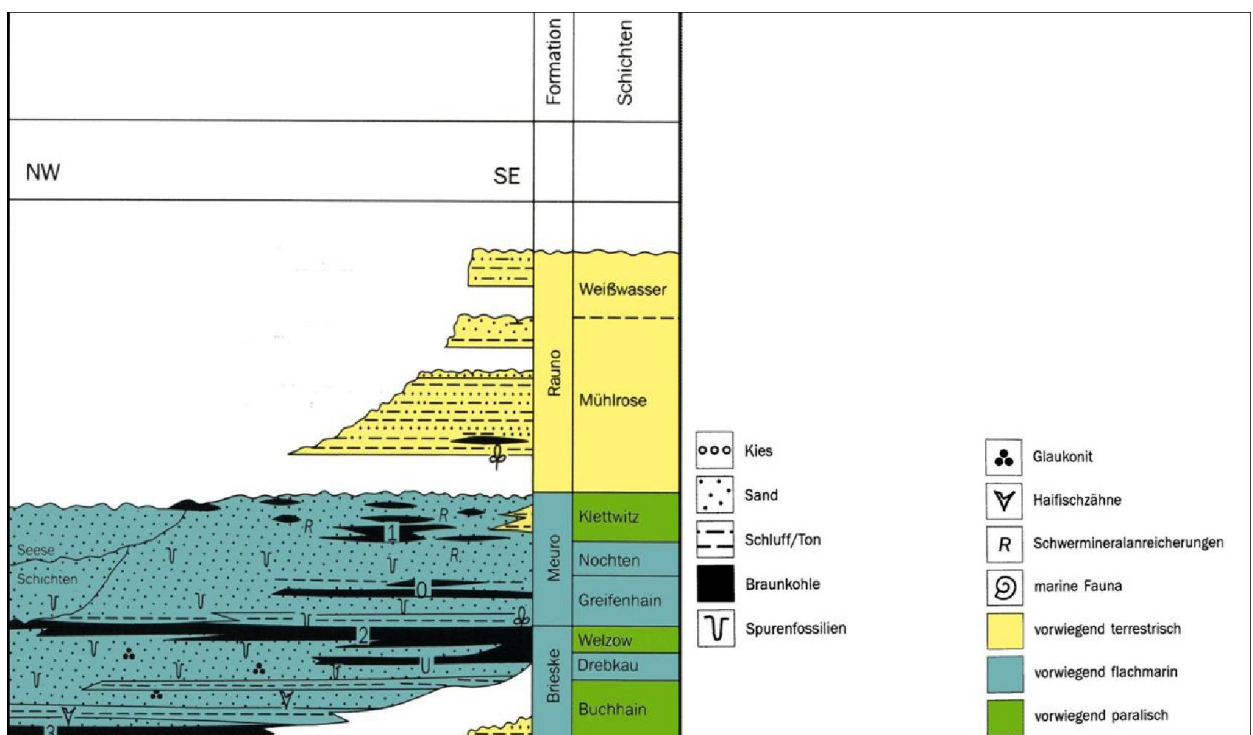


Рис. 2.4. Літофаціальний розвиток утворень у буровугільному регіоні Lausitz (Brieske, Meuro та Rauno (змінено з [88])

Формація Бріске

Умови осадження у формації Бріске характеризуються змінами рівня води попередника Північного моря [88]. Під час регресії моря виникли великі болота, в яких залишки рослин були ізольовані від повітря і тому не розкладалися. Це призвело до утворення бурого вугілля, яке в гірничих термінах називають 2-м лужицьким пластовим горизонтом (№ 2 на рис. 2.4) [89]. Це споконвічно компактний, поширений пласт потужністю 10-12 м, який є об'єктом усіх сучасних буровугільних кар'єрів [88]. У деяких випадках проміжні засоби були завезені через наступ моря з півночі.

Формація Мейро

Через деякий час формація Мейро починається трансгресивно безпосередньо над 2-м міоценовим пластовим комплексом [88]. Спочатку відкладався

морський мул, який у гірничій мові називається всячим мулом. Далі за всячою стіною йдуть морські піски, в які вкладені шари мулу та подальші шари бурого вугілля, особливо на південному сході («комплекс Обербеглейтера» [88] також є частиною формації Меуро (№ 1 на рис. 2-4). був об'єктом розробки, особливо на початку видобутку [89].

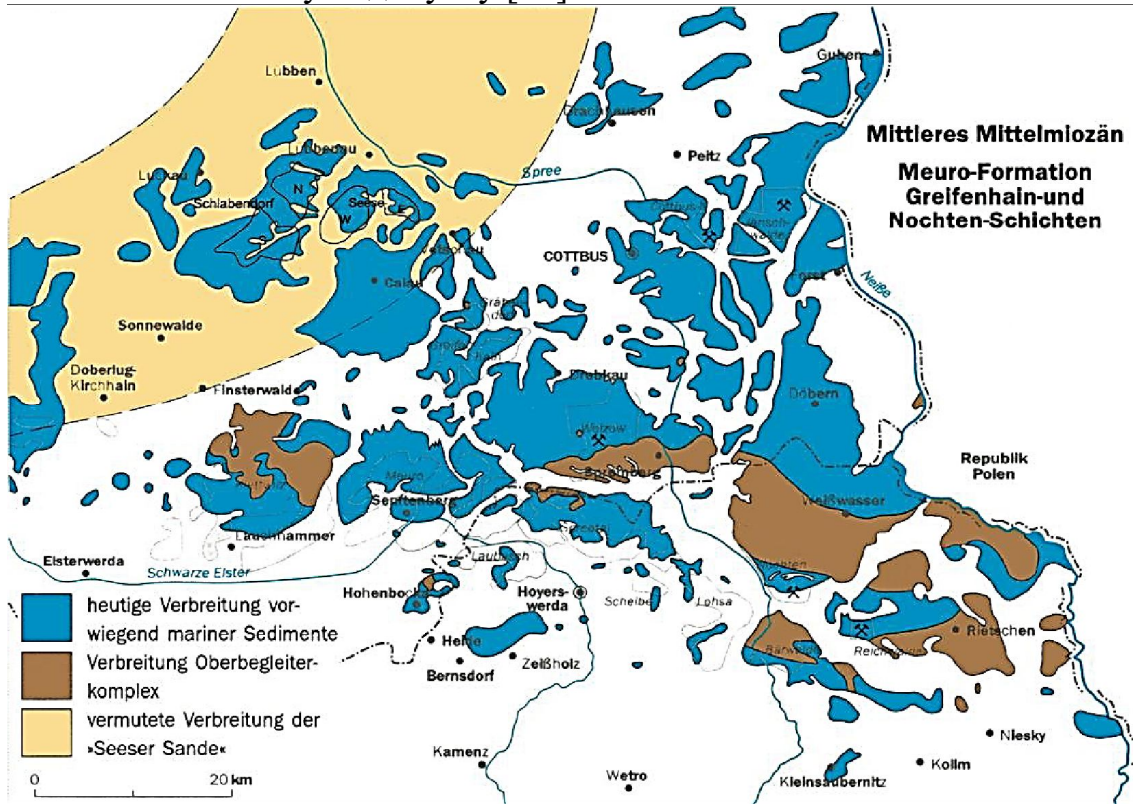


Рис. 2.5. Передбачуваний розподіл Seeser Sande [88]

Сізерські піски, які в останній літературі також віднесені до формації Мейро (див. рис. 2.5, [88]), мають особливе значення з точки зору розрідження ґрунту. Ці низькозерністі дрібні та середні піски залягають на всячому мулі та частково (в районі Шлабендорф-Південний) безпосередньо на пластовому комплексі 2-го міоцену [90], [91].

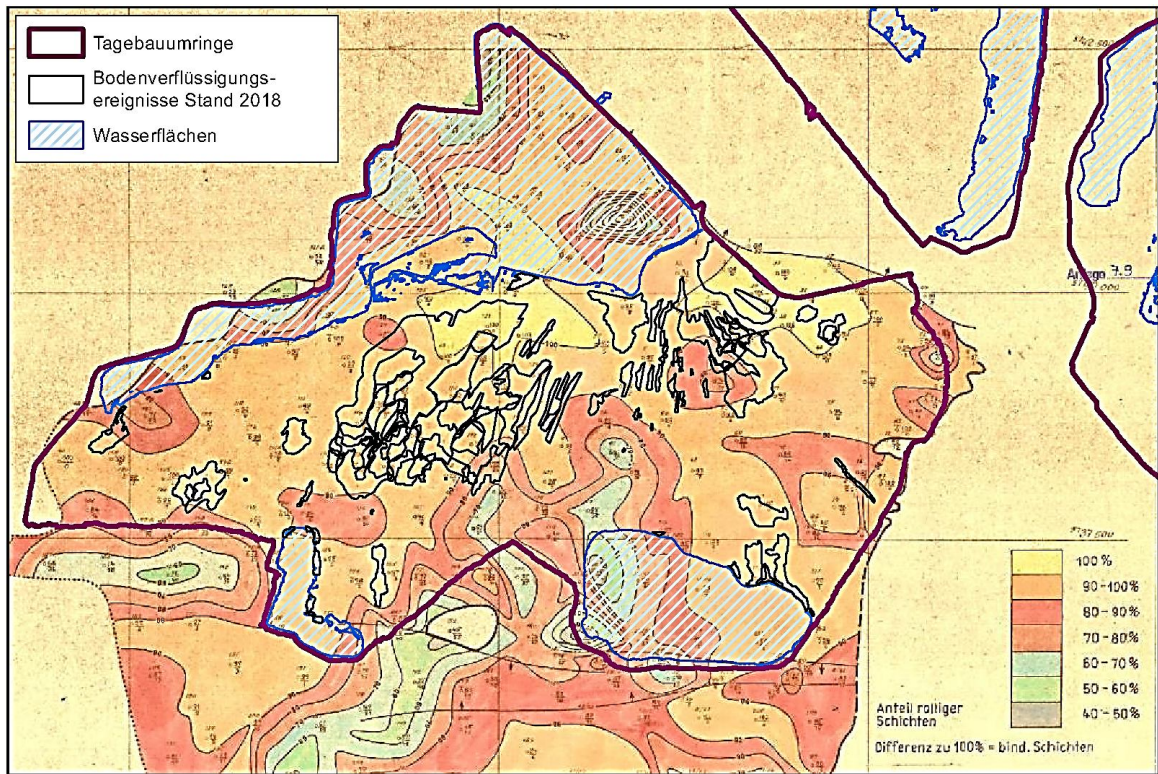


Рис 2.6. Анфейл товщини шарів, які вважалися крупнозернистими
Кільця відкритої розробки: □ Події розрідження порід, □ Акваторії [92]

На висячих шарах пластового комплексу 2-го міоцену (дані попередньої розвідки) та подій розрідження ґрунту доповнено за [92].

У [92] було вивчено попереднє дослідження кар'єру Шлабендорф-Зюд на предмет геологічних особливостей щодо наявності розріджуваного ґрунту. Стало зрозуміло, що розкривні породи у кар'єрі Шлабендорф-Зюд на деяких ділянках повністю складаються з чистих пісків Зезера, оскільки відсутні навислий мул і четвертинні утворення (рис. 2.6).

Формація Рауно

Шари формації Рауно – це наземні відкладення алювіального конуса колишньої Ельби, які відклалися в регресивній фазі [88], [89].

Це – здебільшого піски та гравій, але мули та глини («пляшкова глина») також залягають у відкладеннях формації, в основному, на півдні та південному заході Lausitz.

Четвертинний період

Четвертинні відкладення характеризуються перш за все своїм походженням льодовикового періоду. Було три основних просування льоду: Ельстерське, Заальське та Віслинське зледеніння [89]. Під час Ельстерського зледеніння внутрішній лід просунувся найдалі на південь, а за ним йшли Заальське та Віслинське зледеніння.

Внаслідок просування внутрішнього льоду третинні відкладення, частково включаючи шари бурого вугілля, були згорнуті та зсунуті. У фазі танення льодовика підльодовикові талі води утворювали балки [88], деякі з яких врізалися в дотретинні надра [89]. В результаті ці канали були заповнені відкладеннями талої води і, оскільки вони більше не містили пластів, були нецікаві для видобутку.

Четвертинні відкладення в області ґрунтових і кінцевих морен часто дуже неоднорідні, оскільки на них впливають зміни умов щодо внутрішнього льоду. Гравій, пісок, мул і глина могли бути відкладені. Крім того, тилли є четвертинним утворенням. Вони можуть містити валуни. Lusatian Urstomtal (належить до льодовикового періоду Заале), який охоплює територію колишніх кар'єрів Niemtsch до Lohsa та Bärwalde, має важливе значення з точки зору розрідження ґрунту.

У цій області відкладалися річково-долинні піски.

У нижній частині це крупнозернисті піски та дрібний гравій, у верхній – дрібні та крупні середні піски.

В районі поширеної льодовикової долини Lausitz ці долинні піски можуть становити значну частину висячої стінки 2-го лужицького пластового горизонту [92].

Дюнні піски також відкладені в частинах Лужицького Урстомталя [93]. На рис. 2.7 показано відкриті розробки в буровугільному регіоні Lausitz у зв'язку з геологічними структурами на поверхні землі, які мають переважно четвертинний характер.

Особливо важливі нижньолужицька прикордонна стіна та льодовикова долина Lausitz.

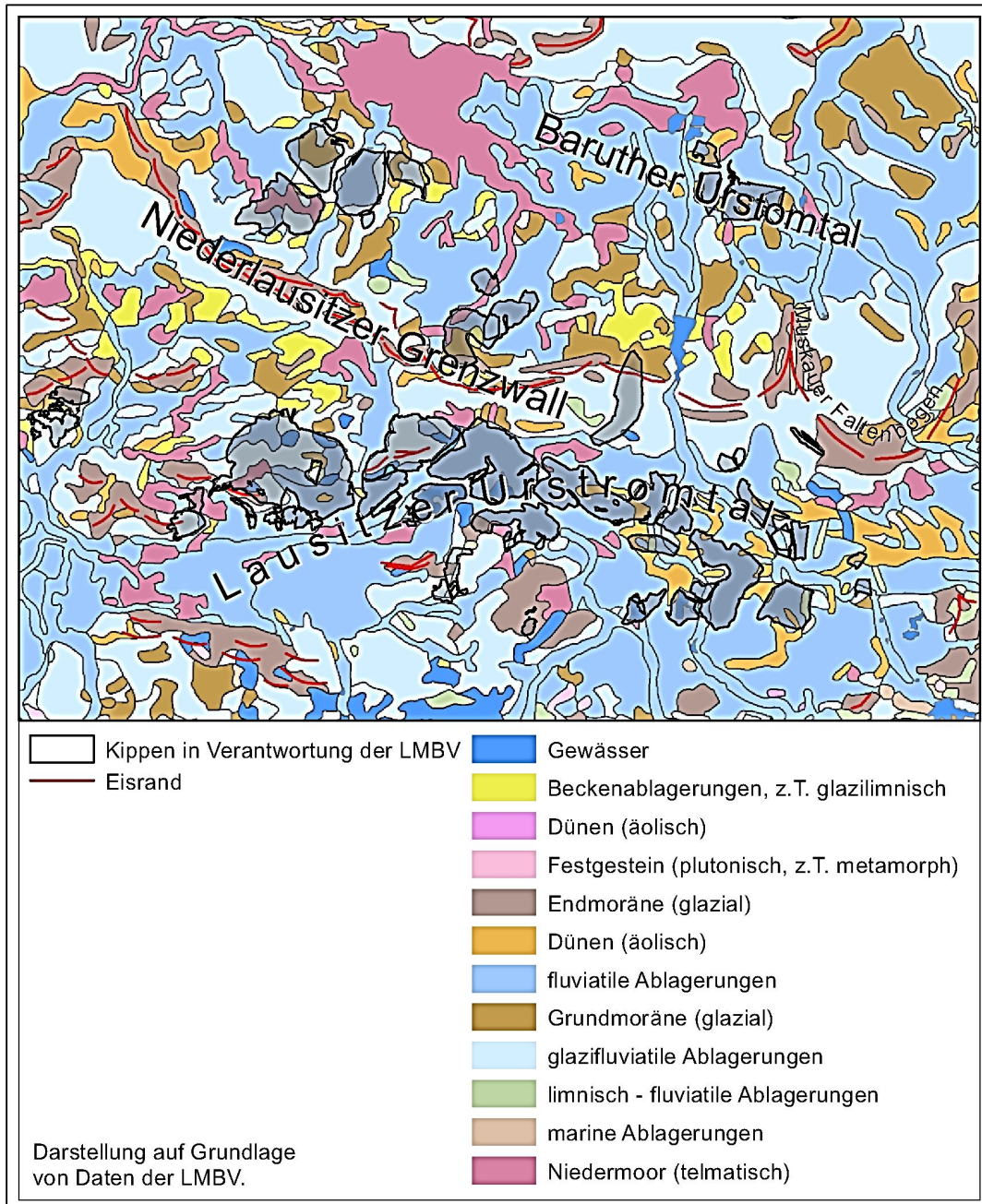


Рис 2.7. Геологічна карта району видобутку бурого вугілля Lausitz відповідно до генезису існуючі (сипкі) породи (на основі даних LMBV)

2.3.2. Виймання розкривних порід і будівництво відвалів

Видобуток бурого вугілля в Lausitz розпочався на початку XIX століття [89]. Спочатку оголені ділянки 1-го лужицького пластового горизонту були розроблені на плато або приповерхневих частинах 2-го лужицького пластового горизонту в складчастій дузі Мускау. Гірничодобувна промисловість все більше переходила до будівельних компаній.

Приблизно з 1886 року почалася рання індустріальна фаза, на якій дедалі частіше використовувалися машини [89]. Це дозволило перемістити розкривні породи і таким чином оголити вугілля. Відповідно, гірничодобувна діяльність перейшла з цивільного будівництва на відкриті розробки. Після подолання економічних наслідків Першої світової війни в 1925 році розпочалася промис-

лова фаза. Гірничі роботи були повністю механізовані та електрифіковані і незабаром проводилися виключно відкритим способом. Хоча на початку домінував екскаваторний потяг, конвеєрні мости та стрічкові операції також все частіше використовувалися.

У середині – наприкінці 1950-х рр. кар'єри були переведені на масову експлуатацію [89]. Це також видно з форми кривої доставки. У 1959 р. на кар'єрі Лохса був введений в експлуатацію перший розкривний конвеєрний міст (РМК) серії F34 [89]. Пізніше використовували ще більші розкривні конвеєрні мости (F45 1962, F60 1972 [89]).

Таблиця 2.2

**Основні технології видобутку розкривних порід
у кар'єрах районі бурого вугілля Lausitz [92]**

Відкриті розробки	Видобуток головних хвостів	Абзетцер
Cottbus-Nord	F34	-
Jänschwalde	F60	+
Nochten	F60	+
Reichwalde	F60	+
Welzow-Süd	F60	+
Werminghoff I u II	AFB без позначення типу	-
Kleinleipisch	AFB без позначення типу	-
Niemtsch	F25	-
Burghammer	F32	+
Skado	F32 2x	+
Sedlitz	F34	+
Bärwalde	F34 2x	+
Lohsa	F34 2x	+
Schlabendorf Nord	F34 2x	+
Schlabendorf Süd	F34 2x	-
Seese West	F34 2x	+
Seese Ost	F34 2x	+
Spreetal	F34 2x	+
Klettwitz	F45	-
Meuro	F45	+
Klettwitz-Nord	F60	+
Bluno	Смугова операція	+
Gräbendorf	Смугова операція	+
Koschen	Смугова операція	+
Scheibe	Смугова операція	+
Greifenhain	Смугова робота, раніше поїзна	+
Dreiweibern	Комбінація прямого згортання	-
Різні менші кар'єри	В період до 1945 р. (експлуатація поїздів, кабельні екскаватори тощо)	

Розкривні породи були частково розміщені у зовнішніх відвалах (або териконах) і частково у внутрішніх відвалах. Зовнішні відвали зазвичай створювали на базі природного ґрунту, тоді як закриті відвали створювали на території, де раніше видобували буре вугілля.

Район видобутку бурого вугілля Lausitz створив умови для використання розкривних конвеєрних мостів. Розкривні породи є переважно крупнозернистими і можуть бути легко дреновані, а умови зберігання є переважно горизонтальними [94]. У таблиці 2.2 наведено огляд основних технологій видобутку розкривних порід у найважливіших кар'єрах у буровугільному регіоні Lausitz. Більшість відкритих гірничих робіт експлуатувалася з АСБ. В основному використовувалися серійні АFB F34 і F60 (див. рис. 2.8).

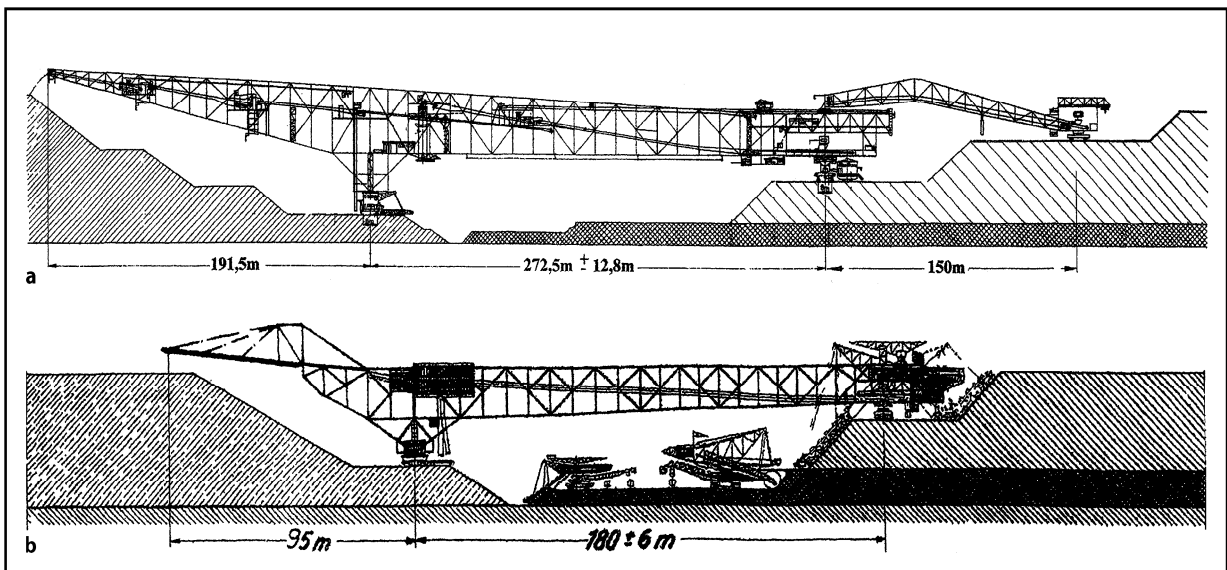


Рис. 2.8. Конвеєрні мости типу F60 (a) і F34 (b) [94]

Конвеєрний міст проходить разом з роторними екскаваторами на гусеничному шасі на упорі перпендикулярно напрямку виїмки. Вироблення ведеться фронтально при русі по фронту видобутку [95]. Екскаваторне шасі АFB рухається по гусеницях, які лежать на робочому рівні в розкривних породах. Два з'єднані одноковшові екскаватори можуть знімати з цього робочого рівня вгору (високий зріз, див. рис. 2.9) і вниз (низький зріз). Вугілля оголюється в глибокому розрізі. Якщо пропускна здатність двох ковшових екскаваторів недостатня, інший ковшовий екскаватор під'єднується до вищого рівня через живильний пристрій [94].

Гусеничне шасі АFB з боку відвантаження працює на платформі, яка називається попереднім перекидом. Це заливається самим АFB за допомогою бічних поворотних рук і вирівнюється за допомогою жолобів. Для попереднього відкидання використовується якомога крупнозернистий матеріал, оскільки це забезпечує стабільність роботи шахти навіть у вологу погоду.

Основний відвал, розташований над попереднім перекиданням, скидається через один або кілька жолобів, розташованих на консольній жорсткій стрілі. АFB F34 має одне падіння, тоді як АFB F60 має три падіння (див. рис. 2.10).



Рис. 2.9. Конвеєрний міст розкривних порід у кар'єрі Райхвальде (ковшовий ланцюговий екскаватор у Високий зріз, попереднє перекидання та точки 1 і 2 активні) [95]

На склад матеріалу наконечника АФВ впливають такі фактори:

- Послідовність шарів порід у висячій стінці вугілля.
- Розташування ковшових екскаваторів (як у високому, так і в низькому різанні, один екскаватор у високому та один екскаватор у низькому різанні).
- Форма різання роторного ланцюгового екскаватора (паралельний зріз у високому зрізі або вентиляторний зріз у низькому зрізі).
- Використання повітряного АФВ.

Одноковшові екскаватори переміщують викопані шари, оскільки видаляють стружку, яка, залежно від форми розрізу, покриває всі розрізані шари. Потім маси всіх зчеплених одноковшових бригадних екскаваторів зводяться разом на конвеєрі в АСБ [11]. Які точки використовувати, вирішується на основі експлуатаційних міркувань.

Конструкція та стиль керування конвеєрним мостом розкривних порід ускладнюють контроль місця відкладання розкривних порід у головному відвалі.

Викид можна контролювати лише в обмеженій мірі під час попереднього перекидання, оскільки тут потрібен робочий рівень.

Залежно від розвитку напряду видобутку (паралельна або поворотна розробка) можуть бути ділянки, в які з геометричних причин не можна вводити розкривні породи. В інших областях скупчення також може виникати з геометричних причин.

Залишкові ями виникають там, де необхідно вкоротити забій або в кінцевих положеннях кар'єру [94]. Робота з двома АФВ на одній зупинці, як напр. В., який використовувався в колишньому кар'єрі Шлабендорф-Зюд, вимагав координації стилю водіння (див. також рис. 2.11).

Згідно з [96], однак, це не призвело до будь-яких особливостей щодо наконечника.



Рис. 2.10. Одноковшовий ланцюговий екскаватор у кар'єрі Reichwalde (високий різ, без попереднього різання) [95]



Рис 2.11. Два AFB F34 у колишньому кар'єрі Seese-Ost під час роботи з двома мостами [95]

Після проходження демонтажу від 6 до 10 м знімають гусениці, по яких їздять АКБ і роторні екскаватори. Ця задня відстань в основному є результатом розмаху руху роторних екскаваторів [94]. На практиці частина виробки зазвичай переміщується, тоді як розкривні породи витягуються з іншої частини забою. Пересуваючи гусениці назад, забій переміщується також назад, а конвеєри переносять розкривні породи на відвал новою лінією. Це створює ребристу структуру наконечника, яка є типовою для розкривних конвеєрних мостів (див. рис. 2.12). У минулому, якщо матеріал наконечника АФВ дозволяв рекультивацию, деякі з цих ребер були лише вирівняні (див. рис. 2.13). В результаті виходить хвиляста структура поверхні.

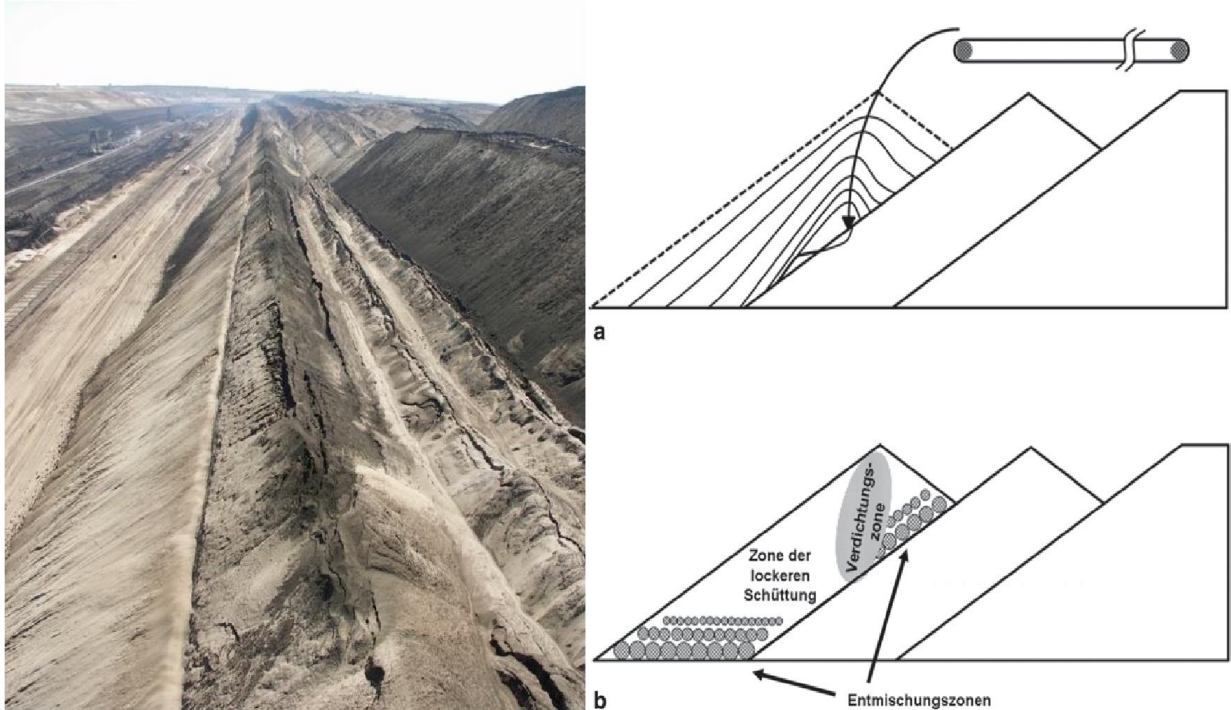


Рис. 2.12. Ліворуч: реберна структура наконечника АФВ паралельно забої (кар'єр Jänschwalde, АФВ F60 з трьома скиданнями для встановлення основного дампу); Праворуч: будова об'ємного ребра в розрізі (а) та зони різних властивостей (б) [11]

Через згадане вище перемішування гірничої маси на всячому боці вугільного пласта неможливо віднести відвальний матеріал до конкретних горизонтів.

Однак через те, як АФВ зазвичай працює на фіксованому забої, перпендикулярному до напрямку видобутку корисної копалини, походження матеріалу, що знаходиться у відвалі АФВ, можна визначити з певним ступенем невизначеності.

Відвальний матеріал розглядається комплексно по всіх шарах всячої стінки вугільного пласта.

У [97] це було зроблено для кар'єру Schlabendorf-Süd підхід до шару попередньої розвідки був «зміщений» на 330 м протилежно напрямку розробки та був віднесений інтегрально до відвалу АФВ.



Рис 2.13. Вирівняний відвал АФВ з хвилястою поверхнею [98]

У більшості кар'єрів, перерахованих у таблиці 2.2, крім розкривного конвеєрного мосту використовувалися інші технології транспортування розкривних порід. Відповідно до [94], верхню площу розкриву отримують в попередньому розрізі і за допомогою відстійників вносять у відвал АСБ. Це робиться за допомогою багатоковшових екскаваторів, які передають ґрунт до розкидача(ів) за допомогою підключених конвеєрних систем (див. рис. 2.14). За допомогою цих технологій маси можна використовувати цілеспрямовано для покращення рекультивації та покращення геотехнічних умов, оскільки обидві технології забезпечують вибірковий стиль водіння [94]. Наприклад, заповнюються низькі ділянки або крайові шланги. Розкидачі можуть працювати зі свого робочого рівня при високому або глибокому заповненні.



Рис. 2.14. Багатоковшевий екскаватор у попередньому розрізі (відкритий кар'єр Єншвальде) та розкидач у глибокі відвали через відвал АФВ (відкритий рудник Нохтен)

Іншим варіантом відсипання розкривних порід є використання тягових або плужних відвалів, які можна комбінувати з промивними [94].

Розкривні породи доставляються до точки скидання за допомогою потягового конвеєра та пересуваються через край насипу гусеничним або рельсовим плугом (рис. 2.15).

За цією технологією в якості рекультиваційного шару вносили також золу котлів [99].

Оскільки нахил відбувається з робочого рівня, по якому безперервно переміщуються гусениці, створюється рівна поверхня.



Рис 2.15. Структура плужного відвалу в колишньому кар'єрі Schlabendorf-Süd [100]

2.3.3. Оздоровлення та рекультивация

Подальше використання територій, які залучаються здебільшого для видобутку бурого вугілля, було соціальною метою, яка існувала з самого початку [100].

Через різке збільшення використання площ землі відкритими розробками після Другої світової війни та, зокрема, через закриття багатьох кар'єрів після політичних змін у 1990 році, повторне використання землі опинилося в центрі уваги.

Тільки в період з 1989 по 1994 рік було закрито 24 відкритих розробок (включаючи Mitteldeutsches Revier, [101]).

Особливу проблему для рекультивации становило закриття кар'єрів раніше запланованого терміну їх закінчення [11]. Це особливо стосувалося утилізації розкритих порід, оскільки вони більше не були доступні внаслідок поточних операцій.

У таблиці 2.3 наведено огляд кроків, які необхідно виконати в рамках повторного використання територій, що використовуються для видобутку (на основі [11]).

Слід зазначити, що між окремими кроками існує залежність і також необхідно враховувати суперечливі інтереси.

Повторне використання колишніх територій видобутку в Lausitz вже добре просунулося [102].

Передумовою успішного завершення реновації є встановлення геотехнічної безпеки [11].

Головною метою відновлювальних робіт є звільнення гірничих територій від гірничого нагляду [12].

Таблиця 2.3

Етапи роботи для повторного використання відкритих гірничих ділянок (згідно з [11])

Цілі	Критерії	Заходи
Створення геотехнічної безпеки (стійкість схилу та захист від осад)	Геометрія схилу, гранулометрія залежить від умов і механічних параметрів порід	Масове переселення Ущільнення
Створення безпеки від провалу ґрунту внаслідок розрідження	Мінімальний розмір земляно-вологого покриву	<ul style="list-style-type: none">Засипка низьких ділянокСтворення доповодкових систем

Висновки за розділом 2

В даному підрозділі розглядалося питання про те, які дані підходять для визначення ризику від подій розрідження гірських порід. Було встановлено, що наявної інформації про властивості гірських порід зазвичай недостатньо для того, щоб можна було надійно відрізнити зони під загрозою від безпечних. Це головним чином тому, що параметри, які можна використовувати для опису тенденції до розрідження, коливаються через короткі проміжки часу. Оскільки кожне родовище має власну геологічну структуру та техногенні відкладення, розвідка має бути набагато щільнішою, ніж зараз, через обмежений діапазон інформації про відслонення породних масивів.

Для оцінки ризику розрідження гірських порід в основному використовуються геометричні дані з тріщин. Особливе значення мають цифрові моделі рельєфу високої роздільної здатності, які періодично отримують за допомогою бортового лазерного сканування. Розрахувавши різницю між висотами рельєфу двох цифрових моделей рельєфу, можна визначити події розрідження гірських порід.

Щоб окреслити, як наслідки розрідження гірських порід залежать від морфології рельєфу, потрібен відповідний критерій. Тому були запропоновані методи просторової характеристики морфології місцевості. Енергетичний розгляд морфології місцевості у вигляді енергії рельєфу виявився менш придатним з точки зору відображення впливу ухилів. Рекомендовано використання вирішального фактора m_h як характеризуючої величини морфології рельєфу. Ця рекомендація заснована на розгляді горизонтальної рівноваги на земляно-вологодому покриві. На основі статистичної оцінки довжини відповідних ухилів подій розрідження гірських порід запропоновано значення 100 м як радіус огляду.

АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВИЙ АСПЕКТ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВІДВАЛІВ

3.1. Доказ стабільності для розріджуваного відвалу

Процедури, представлені нижче для підтвердження стабільності в розріджуваному ґрунті, в основному базуються на концепції безпеки, представленій у розділі 2.1.5. Проте, рівень безпеки, спрямований на видобуток корисних копалин та відновлення шахт, не можна порівняти з рівнем безпеки Єврокодів у будівництві, оскільки переслідуються різні цілі. Слід також зазначити, що Єврокод був запроваджений у будівельній галузі з 2012 року, але майнінг був чітко виключений [60].

Предметом розглядуваних доказів є руйнування насипу, що призводить до горизонтальних і вертикальних зсувів ґрунту в насипу. Вважається стан перед розломом, в якому не відбулося або відбулося дуже невелике деформування.

Перераховані верифікації стабільності поділяються на верифікації на основі розрахункових розділів (2D) і просторових оцінок. Просторові оцінки відносяться до координат розташування і також є двовимірними.

3.1.1. Доказ стабільності на окремих розрізах

Статичні докази.

Докази, представлені тут, відповідають доказам загальної стабільності відповідно до DIN 4084:2009-01 на основі умови руйнування MOHR-COULOMB. Щодо сфери застосування стандарту DIN 4084:2009-01, однак, сказано: «Порушення через розрідження ґрунту неможливо розрахувати за допомогою методів». Причини цього наведені не тут, а в DIN 1054:2010-12 зазначено, що процеси з розвиненим механізмом руйнування вимагають достатньої пластичності матеріалу.

У практиці гірничого виробництва та рекультивації гірничих робіт статичні випробування ґрунту все ж використовуються для ґрунтів, чутливих до розрідження [51, 103, 104, 14].

Вибір параметрів зсуву

Вибір параметрів зсуву насипних гірських порід має особливе значення, коли мова йде про статичний аналіз землі. Вони залежать не лише від гранулометрії, а й від наступних змінних:

- Стан стресу [14].
- Умови дренажу [105].
- Частка пор і критична частка пор [106].
- Деформація зсуву [106].

Відповідно до [14], для визначення розрахункових значень міцності на зсув (кута тертя та когезії) необхідно провести випробування, які приблизно відображають умови *in situ* перед початком зсуву. Для цього слід дослідити

матеріал і стан однорідних ділянок, які лежать в зоні можливих поверхонь ковзання. Тривісні випробування проводять з досліджуваним матеріалом і граничними умовами, що відповідають стану в однорідному діапазоні. Характеристики міцності на зсув є результатом тривісних випробувань.

Förster розрізняє такі типи міцності на зсув [105]:

- справжня міцність на зсув;
- ефективна міцність на зсув;
- уявна міцність на зсув;
- залишкова міцність на зсув.

У [14] також згадується модифікована міцність на зсув із параметрами зсуву *mod φ* і *mod c*. Мається на увазі напружений стан перед початком деформації зсуву.

Табл. 3.1 показує різні способи, якими можна визначити та повідомити про міцність ґрунту на зсув. Розрізняють міцність на зсув у стані руйнування і міцність на зсув після великих деформацій (залишкова міцність). Kolymbas описує, що залишкова міцність досягається після достатньо великої деформації зразка. Потім зразок більше не змінюється в об'ємі та присутній з критичною часткою пор. Згідно з Kolymbas, у тривісному випробуванні або випробуванні на зсув рами ця умова не досягається, принаймні з дилатантною поведінкою матеріалу, оскільки траєкторії зсуву надто малі [106]. Kudla вказує на той факт, що тривісні випробування та випробування на зсув зазвичай контролюються зміщенням, а не силою [107]. Якщо зразок ламається, випробувальний апарат не може слідкувати за швидкістю деформації, що призводить до характеристик, які не відповідають тим, що відбуваються в полі.

Таблиця 3.1

Типи міцності на зсув (відповідно до [14])

Показник	ефективний	ймовірний	змінений
в несправному стані	ефективні параметри руйнування	параметри видимого руйнування	модифіковані параметри руйнування
	$\varphi_f'; c_f'$	$\varphi_{u,f}; c_{u,f}$	<i>mod φ_f; mod c_f</i>
після великих деформацій	ефективні параметри залишкової міцності	параметри уявної залишкової міцності	змінені параметри залишкової міцності
	$\varphi_R'; c_R'$	$\varphi_{u,R}; c_{u,R}$	<i>mod φ_R; mod c_R</i>

Згідно з Förster [105], при виборі розрахункових параметрів важливо, як розвиваються нейтральні напруги (тиск порової води) після втручання в основу і як це можна визначити. Якщо поровий тиск води відомий, ефективні або очевидні параметри можна встановити відповідно до Förster.

Рекомендація LMBV [14] пропонує наступні підходи щодо міцності для перевірки (див. також табл. 2.4):

- водонасичена територія:
 - $\varphi_{u,f}; c_{u,f}$ bzw. *mod φ_f; mod c_f* oder
 - $\varphi_{u,R}; c_{u,R}$ bzw. *mod φ_R; mod c_R*
- земляно-волога зона:
 - $\varphi_f'; c_f'$

Слід зазначити, що при використанні параметрів руйнування у водонасиченому діапазоні та достатньої безпеки мало ймовірно, що точка руйнування буде досягнута або перевищена. Згідно з [51], за певних обставин у водонасичених районах φ_f' ; c_f' або φ_R' ; c_R' можна використовувати, якщо відомий поровий тиск води.

У [52] Kudla та Szczyrba рекомендують використовувати лише параметри залишкової міцності $\varphi_{u,R}$; $c_{u,R}$ у водонасиченій зоні; $\text{mod } \varphi_R$; $\text{mod } c_R$. Це підтверджено попередніми розрахунками подій розрідження ґрунту, які фактично відбулися, що призвело до характеристик міцності на зсув у порядку величини залишкової міцності. Таблиця 3.2 чітко показує різницю між кутами руйнування та залишкового тертя для зріджених відвальних ґрунтів.

Таблиця 3.2

Типові характеристики для напруженого, недренованого руйнування та залишкового тертя, кут та критичні пропорції пор (згідно [51])

Нахил кар'єрів	са. n_{crit}	са. $\varphi_{u,R}^*$	са. $\varphi_{u,f}^*$
Spreetal	0,36...0,38	0° ... 3°	18°
Lohsa	0,34...0,35	0° ... 4°	10°
Restlochkette	0,34...0,36	0° ... 5°	20°
Schlabendorf-Nord	0,34...0,38	0° ... 2°	18° ... 20°
Seese-Ost	0,36...0,37	0° ... 3°	20° ... 22°
Seese-West	0,38...0,39	0° ... 5°	20°
Schlabendorf-Süd	0,38...0,41	0° ... 7°	20° ... 30°

Гудехус виступає за використання критичного кута тертя для встановлення граничних рівноваг, які можна знайти за допомогою зворотного розрахунку або за допомогою адаптованих тривісних тестів [66].

3.1.2. Поверхні ковзання

Безпека під час статичної перевірки землі визначається на основі правила Фелленіуса [105].

$$\eta = \frac{\bar{\tau}_f}{\bar{\tau}} = \frac{\frac{1}{l} \int_A^B \tau_f(s) ds}{\frac{1}{l} \int_A^B \tau(s) ds} \quad (23)$$

де:

- η – коефіцієнт безпеки;
- τ – напруга зсуву;
- τ_f – міцність на зсув;
- s – шлях уздовж лінії розлому.

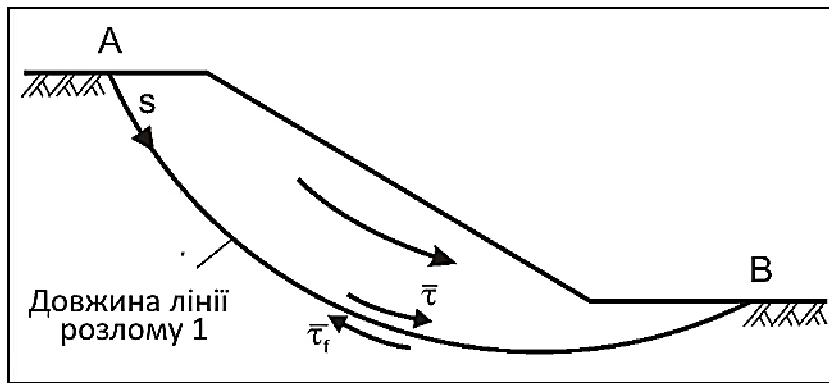


Рис 3.1. Ескіз визначення правила Фелленіуса (згідно з [105])

Міцність, виражена коефіцієнтом η , є відношенням середньої міцності на зсув до середньої напруги зсуву по лінії руйнування. Для матеріалу без когезії величина мобілізованої міцності на зсув задається як фактичний мобілізований кут тертя $\bar{\varphi}_{mob}$, що визначається згідно з рівнянням (24) [105].

$$\eta = \frac{\tan \varphi}{\tan \bar{\varphi}_{mob}} \quad (24)$$

Тіло ковзання обмежене лінією зламу. Відповідно до DIN 4084:2009-01 можливі такі випадки:

- розсувний корпус;
- пряма лінія зламу;
- кругова лінія розлому;
- лінія зламу, вигнута в одному напрямку;
- Композитні механізми руйнування з кількома тілами ковзання та прямими лініями руйнування.

Напруга зсуву та міцність на зсув не є постійними або неперервними вздовж лінії зламу, але, серед іншого, залежить від існуючого ґрунту, умов дренажу та напруги розкриву. Тому рівновагу сил або моментів можна встановити безпосередньо лише в простих випадках. При розрахунку стійкості на насипах у пухкій породі лінія розлому в багатьох випадках є приблизно круглою. Якщо навантаження переважно вертикальне, що також переважно має місце, поверхня ковзання може бути розділена на вертикальні ділянки, які називаються планками. Межі вибираються таким чином, щоб були включені геометричні розриви та межі шарів, був рівномірний розподіл по довжині лінії розлому, а лінія розлому відповідала нижній межі ламелі.

Потім на ламелях встановлюються умови рівноваги. Це робиться за допомогою припущень і спрощень і відрізняється в окремих процедурах. Рішення системи рівнянь для умов рівноваги на планках відповідає безпеці згідно з рівнянням (23) для передбачуваної поверхні ковзання. У подальшому мінімальну безпеку шукають шляхом зміни лінії розриву.

Процес розрахунку реалізовано в програмних продуктах, які вимагають від користувача лише інформації про геометрію та параметри розрахунку. З цієї причини вибір параметрів зсуву (див. вище) є вирішальним для результату.

3.2. Доказ стабільності для розріджуваного субстрату

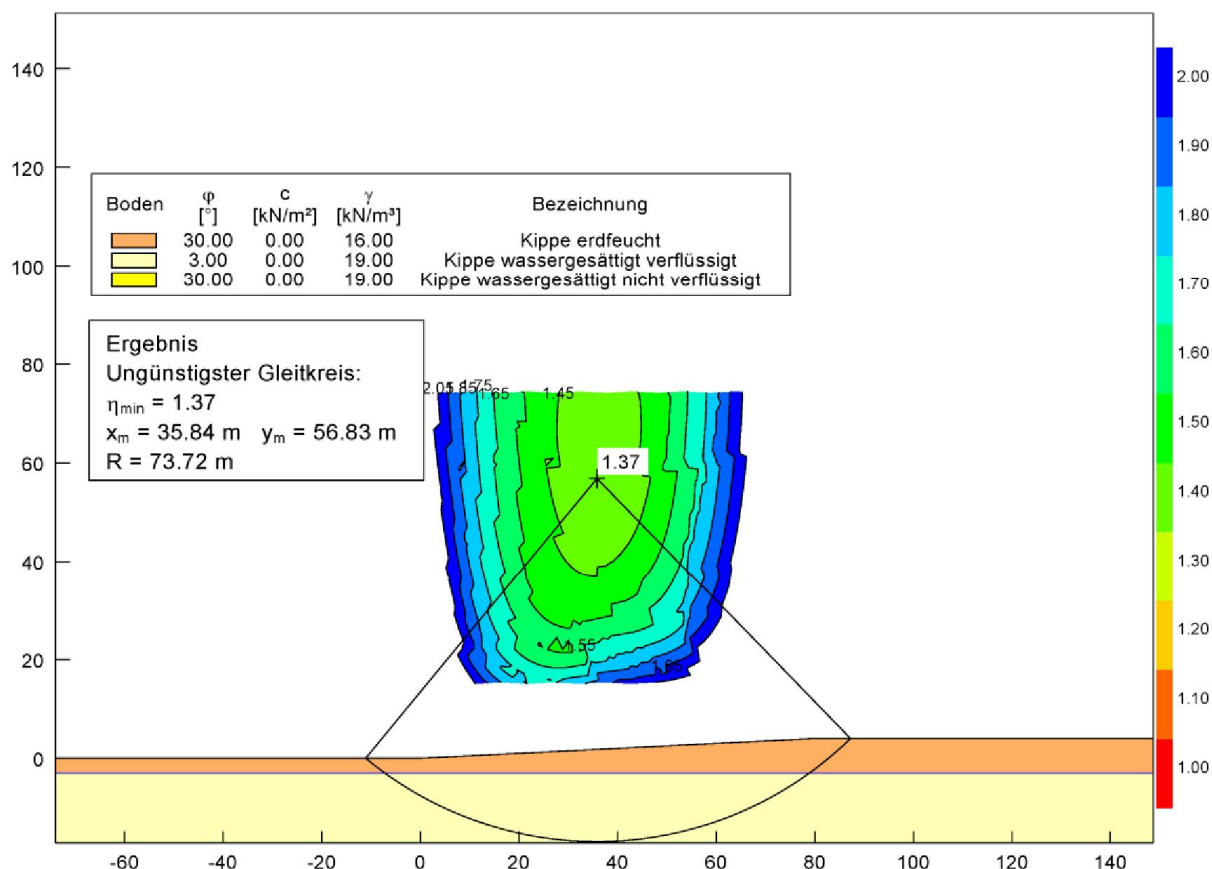


Рис. 3.2. Приклад дослідження стійкості берега методом рейки за Bishop (пакет програм GGU STAB/L/TY, коефіцієнт стійкості $q=1,37$) [52]

На рис. 3.2. показано приклад розрахунку стійкості для насипу на внутрішній вершині. Ефективні параметри руйнування використовуються для вологої зони. Насичений водою торець вважається зрідженим. Тут використовуються параметри недренованої залишкової міцності [52]. Поверхня ковзання відповідає сегменту кола.

Композиційні механізми зламу з прямими лініями зламу.

Слабку зону в області поверхні ґрунтових вод, що впливає з різних модельних концепцій, також можна інтерпретувати як задану поверхню ковзання [108]. Це приводить до можливості використання методів з прямими лініями руйнування та складних механізмів руйнування.

Приклад використання складних механізмів руйнування з прямими лініями руйнування в оцінках стійкості був представлений Tamaskovics [109] (див. рис. 3.3). Розглядається ділянка схилу, нахилена під кутом β . Вологий ґрунт лежить на поверхні ґрунтових вод, яка нахилена під кутом α . Безпека розраховується ітераційно шляхом застосування правила Фелленіуса на лінії розлому (що відповідає поверхні ґрунтових вод), за допомогою якого мобілізований активний і пасивний тиск землі у вологому ґрунті включаються в рівновагу. Спеціальною особливістю запропоновано використання міцності на зсув при терті шкіри, яка виходить із результатів зондування тиском [109].

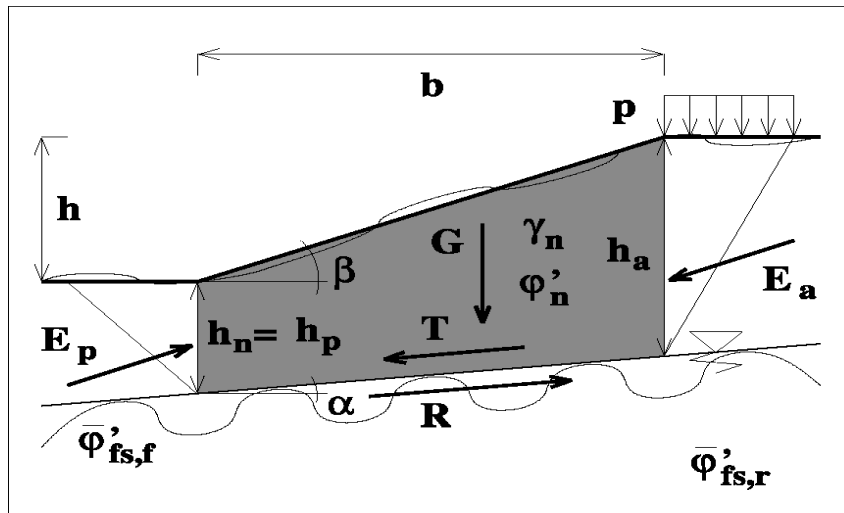


Рис. 3.3. Ескіз визначення для розрахунку стійкості для руйнування рельєфу. Блоковий метод [109]

3.2.1. Процес FEM

Розрахунки за допомогою методу скінченних елементів (FEM) зазвичай використовуються для вирішення задач, у яких існує зв'язок між напругами та деформаціями в континуумі. Цей зв'язок описується за допомогою матеріальних законів [110], представляє спосіб, у якому розрахунки стійкості можуть бути виконані за допомогою методів кінцевих елементів.

$$\eta = \frac{\tan \varphi_k}{\tan \varphi_{ult}} = \frac{c_k}{c_{ult}} \quad (25)$$

φ з індексом k – ряд характерних значень;

індекс ult – значення, за яких відбувається математичний розрив.

Рівняння (25) (відповідно до [110]) показує визначення безпеки. Коефіцієнт міцності η відповідає відношенню існуючих характерних параметрів зсуву до параметрів зсуву, за яких розраховується розрив. Цей стан руйнування визначається поступовим зменшенням тангенса кута тертя φ та когезії c у розрахунковій моделі в тому самому співвідношенні, доки рівновага більше не буде знайдена в чисельному розрахунку. Відсутність рівноваги виникає внаслідок великих деформацій і, отже, полонки. Відповідно до [110], рівняння (25) сумісне з правилом Фелленіуса. Якщо зазначена вище процедура виконується автоматично в програмі розрахунку, яка також називається φ - c -редукція.

Слід зазначити, чим є скорочення φ - c -редукція відповідно до вищесказаного Визначення може бути застосоване лише з конститутивним законом, який працює з пружно-ідеально пластичною граничною умовою згідно з MOHR-COULOMB. Відповідно до [110], цього достатньо для гарної узгодженості між результатами та коефіцієнтами стійкості методів земної статyki.

Перевага дослідження стабільності за допомогою кінцевих елементів полягає в тому, що відповідний механізм знаходиться в самому процесі. Це особливо вигідно в складних геометричних умовах, де існує невизначеність щодо фактичного механізму руйнування [51]. Якщо структурні елементи, які сприя-

ють опору, повинні бути включені в дослідження стабільності за допомогою методу кінцевих елементів, необхідно врахувати спеціальні міркування [111].

Інформація щодо застосованих параметрів зсуву також стосується досліджень стабільності за допомогою методів кінцевих елементів. У випадку зріджуваного ґрунту розрахована стійкість значною мірою залежить від міцності на зсув, яка передбачається у водонасиченій зоні.

Доказ стабільності для розріджуваного ґрунту

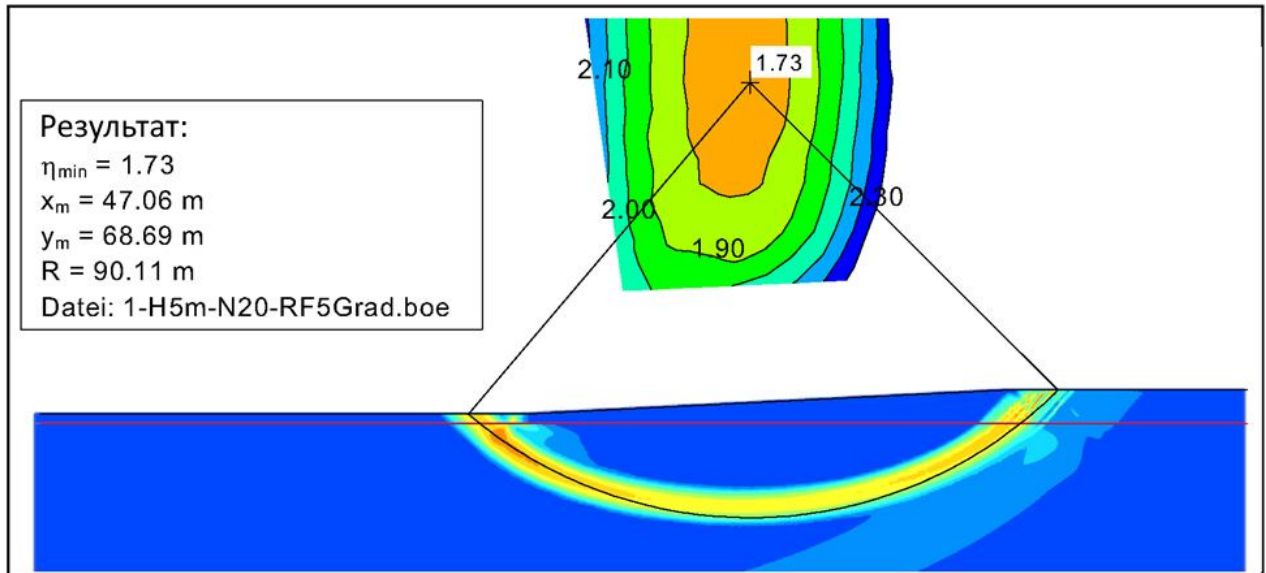


Рис. 3.4. Порівняння коефіцієнта безпеки з розрахунку FEM захисту від статичної електрики [112]

На рис 3.4 показані два результати розрахунків для того самого насипу в порівнянні (нахил насипу 1:20, висота насипу 5 м, ґрунтові води на 2 м нижче основи насипу, кут тертя земля-волога = 30°, кут тертя водонасичений = 5°, немає когезії). У першому випадку для розрахунків ламелярним методом BISHOP використовувалася програма GGU-STABILITY. Другий випадок — редукція ϕ - c за допомогою програми PLAXIS 2D. Найбільш несприятливе коло ковзання показано як результат розрахунку за допомогою GGU-STABILITY та деформації зсуву як частка зменшення ϕ - c у програмі PLAXIS 2D. В обох випадках був розрахований коефіцієнт безпеки 1,73. Лінії розлому також збігаються. Можна продемонструвати, що в розрахунках стійкості за допомогою методів кінцевих елементів можна досягти вірогідних результатів у порівнянні з методами статички землі.

Як пояснюється в розділі 2, пухкий, насичений водою пісок демонструє крихке руйнування. Немає помітних деформацій до моменту руйнування, а після початкового руйнування прогресивно відбуваються подальші процеси руйнування. Виникають великі деформації. Однак при розрахунку стійкості оцінюється лише відстань між умовою, що розглядається, та (початковою) умовою відмови. Подальші деформації виникають на основі змінених граничних умов, викликаних початковим руйнуванням, і на основі низької залишкової міцності в зрідженому матеріалі. Дослідження поведінки насипів після

розрідження можна знайти в літературі (наприклад, [113]). Для цього часто використовуються спеціальні числові формулювання і матеріальні закони, пов'язані з методами гідромеханіки. Це може бути, наприклад, формулювання Ейлера (рух континууму як функція координати місця та часу) або пов'язане формулювання Ейлера-Лагранжа [113].

Von Wolffersdorff і Henke відзначають, що все ще існує значна потреба в дослідженнях і розробках у застосуванні чисельних методів для оцінки стабільності у зв'язку з розрідженням порід відвала. З поточної точки зору, існують обмеження для методу, і жодних нормативних положень не передбачається [114].

3.2.2. Метод за теорією другого порядку

Відповідно до [14], «підтримання граничної рівноваги звичайними методами є лише необхідним, але не достатнім для стабільності рівноваги» [14], з чого випливає, що навіть, якщо гранична рівновага підтримується, ґрунтові умови і можливі механізми відмови призводять до відмови. Щоб довести стійкість, необхідно надати подвійний доказ: необхідний доказ граничної рівноваги та доказ того, що ця гранична рівновага достатня [115].

Raju [116] і Kudella [117] теорія другого порядку, відома з будівельної інженерії, була перенесена на проблеми стійкості насипів.

З цією метою передбачається гіпотетичне поле деформації, яке є кінематично можливим у зоні ґрунту в насипу. Ця процедура імітує невизначений ініціал.

Деформації викликають зміни компонентів напруги в кожній розглянутій точці (= швидкості напруги [14]). Добуток зміни напруги та зміни деформації називається енергією другого порядку. Якщо це від'ємне значення, то вивільняється кінетична енергія, і елементи ґрунту можуть прискорюватися. Якщо енергія другого порядку має додатний знак, то деформація уповільнюється і є стійкість [14].

Гіпопластичний матеріальний закон використовується для визначення енергії другого порядку в ґрунті. Наступні моменти згадуються в [14] як переваги цього матеріального закону:

- чітка математична структура;
- фізично засновані, легко визначити параметри матеріалу;
- відсутність поверхні текучості та правила течії (немає різниці між пружною та пластичною деформацією);
- стан ґрунту визначається виключно тензором напруги зерна та кількістю пор;
- розтягнення, скорочення та кут тертя руйнування є результатом стану ґрунту та напрямку деформації.

[14] представляє програму STABIL, яка дозволяє розрахувати енергію другого порядку в насипі в трьох різних випадках.

Наведено приклади параметрів гіпопластичного матеріалу, які необхідно використовувати, і надано інформацію про те, як їх визначити з експериментів.

При оцінці результатів розрахунку програми STABIL рекомендується інтерпретувати тільки знак енергії 2-го порядку.

Оскільки це може статися в одній точці та цілісно на більших площах, а досвіду оцінки нейтральних результатів бракує, рекомендується лише пробне застосування методу, описаного в [14].

Tamaskovics покращив дослідження стійкості відповідно до теорії другого порядку таким чином, що більше не потрібно припускати механізм відмови, а відстань до відмови можна вказати у формі коефіцієнта безпеки [109, 115]. Підхід реалізовано в програмі FEM PLAXIS і використовує можливість визначення коефіцієнта стійкості за допомогою редуції η -с.

Після моделювання початкового напруженого стану та розподілу тиску порової води критерій стійкості згідно з теорією другого порядку використовується для визначення того, чи відбувається зрідження в точці, що розглядається (граничний стан зрідження - LQF).

Потім вибирається, які параметри міцності на зсув використовуються в цій точці (згідно з [115]). Щоб визначити еквівалентну міцність на зсув, звертаються до [109].

$$\varphi', c' = \begin{cases} \delta^2 e_{min} \geq 0 : \varphi'_{eq,f}, c'_{eq,f} \\ \delta^2 e_{min} < 0 : \varphi'_{eq,R}, c'_{eq,R} \end{cases} \quad (26)$$

де: $\varphi^2 e_{min}$ – мінімумом 2-ї варіації потенціальної енергії;

Index eq,f – еквівалентна межа міцності на зсув;

Index eq,R – еквівалентна залишкова міцність на зсув.

Розрахунок завершується зменшенням φ -с з опором на міцність на зсув, призначеним для відповідного вузла розрахунку. Для цього параметри гіпопластичного матеріального закону перетворюються в параметри зсуву за MOHR-COULOMB.

Meier та ін. розробив аналітичний розрахунок критерію стійкості на основі підходу Tamaskovics, який дозволяє швидше розраховувати стійкість схилів згідно з теорією другого порядку і тому може бути використаний на практиці [118]. У варіаційних розрахунках вони досліджували різні впливи на поверхню ковзання та стабільність.

Що цікаво, історія навантажень сильно впливає на стабільність. Тому рекомендують відтворити історію навантажень у програмі FEM. Крім того, було показано, що опорне тіло перед основою насипу не приводить до збільшення стійкості, оскільки нестабільні ділянки можуть бути знайдені переважно під уступом насипу.

Загалом, для всіх методів, представлених для розрахунку стійкості згідно з теорією другого порядку, мають бути відомі наступні змінні [115]:

- специфічні для матеріалу параметри гіпопластичного конститутивного закону (обережна оцінка);
- просторовий розподіл щільності та ступеня водонасиченості (консервативна оцінка).

3.3. Просторова оцінка безпеки

3.3.1. Визначення зон обмеженого доступу та комплексна оцінка (LMBV)

Для територій звалищ у районі видобутку бурого вугілля в Lausitz вимоги регламенту Саксонського гірничого управління щодо операцій, діяльності та об'єктів, що підлягають нагляду за гірничим виробництвом (Саксонське гірниче регулювання – SächsBergVO) [104] або директиви Державного офісу для гірничої промисловості, геології та сировини Бранденбурзька геотехнічна безпека є (GeSi) [103].

Експерти з геотехніки (SfG, Саксонія) та експерти з насипів (SfB, Бранденбург) відповідають за перевірку вимог, зазначених у [104] та [103].

Після великомасштабного розрідження відвалу на колишньому кар'єрі Spreetal 12 жовтня 2010 року та на колишньому кар'єрі Lohsa у грудні 2010 року приблизно 17 000 гектарів внутрішньої зони звалищ було закрито для використання LMBV та гірничодобувними підприємствами. влади на основі оцінок SfG та SfB [51].

У результаті обсяг зон обмеженого доступу постійно коригувався, а зони обмеженого доступу були розділені на категорії [51].

Щоб підтримати оцінку внутрішніх відвалів, LMBV розробило основу для дій ([119], 1-е оновлення [51]), яку можна використовувати в рамках професійної незалежності та відповідальності SfG/SfB.

На основі методів, перелічених в основі дій [51], SfG/SfB постійно оцінює зони перекиду та робить оцінку щодо того, які області перекиду можна заблокувати, а які можна звільнити.

Наведені методи частково відповідають методам, наведеним для оцінки стабільності на окремих розрізах.

3.3.2. Фактори небезпеки за Förster і Dennhardt

Фактори небезпеки, розроблені Förster і Dennhardt, є мірою того, наскільки велика ймовірність у певному місці того, що розрідження відбудеться після початкової фази, а потім почнеться потік осідання [120].

Крім визначення місця можливого обвалення породних оголень, основною метою факторів небезпеки є усунення недоліків у рівні знань про потенційно загрозові території та можливість цілеспрямованого використання методів статичної землі.

Відповідно до [121] існує дві версії формулювання: рівняння (27) і рівняння (28).

У той час як рівняння (27) сформульоване на основі фракції пор, рівняння (28) відноситься до пікового опору зондування тиску [120].

Розрахунок факторів ризику технічно реалізований у програмі GFKIPPE [121].

$$Gf(x, y) = \left[(K_1 \cdot (n - n_{krit}))^{r_1} + \left(K_2 \cdot \left(1 - \frac{h_w}{h_{wg}} \right) \right)^{r_2} \right] \cdot \left[1 + (K_3 \cdot i)^{r_3} + (K_4 \cdot \tan\beta)^{r_4} + \left(K_5 \cdot \frac{\Delta h}{h_{wg}} \right)^{r_5} + \left(K_6 \cdot \left(\frac{p}{h_{wg} \cdot \gamma_n} \right) \right)^{r_6} \right] \quad (27)$$

$$Gf(x, y) = \left[\left(K_1 \cdot \left(1 - \frac{q_c}{q_{cg}} \right) \right)^{r_1} + \left(K_2 \cdot \left(1 - \frac{h_w}{h_{wg}} \right) \right)^{r_2} \right] \cdot \left[1 + (K_3 \cdot i)^{r_3} + (K_4 \cdot \tan\beta)^{r_4} + \left(K_5 \cdot \frac{\Delta h}{h_{wg}} \right)^{r_5} + \left(K_6 \cdot \frac{p}{q_{cg}} \right)^{r_6} \right] \quad (28)$$

де:

$Gf(x, y)$ – фактор небезпеки як функція розташування

n – фракція пор

n_{krit} – критична частка пор

h_w – відстань до рівня ґрунтових вод

h_{wg} – відстань між ґрунтовими водами

i – гідравлічний градієнт

β – кут нахилу насипу

Δh – різниця у висоті насипу

p – зовнішнє поверхнєве навантаження на поверхню місцевості

γ_n – вага вологої землі перекидної підлоги

q_c – піковий опір зондування тиском

q_{cg} – граничний піковий опір зондування тиску, в якому немає розрідження.

Обидва варіанти складаються з 6 n -факторів, які зважені за допомогою вагових коефіцієнтів K_i ($i = 1 \dots 6$) і вагових показників r_i ($i = 1 \dots 6$).

Велика кількість «ступенів свободи», спричинена ваговими коефіцієнтами та ваговими показниками, ускладнює калібрування вагових факторів для подій розрідження ґрунту, які фактично відбулися [122], є статистичною різницею між розрахованими факторами небезпеки в районах, в яких фактично відбулося розрідження відвалів, і немає різниці в незачеплених зонах перекидання. Причиною цього є те, що з рівнем ґрунтових вод h_w , нахилом насипу β і різницею висоти насипу Δh змінні, які впливають на розрідження, але не змінюють ймовірність його виникнення [92].

3.3.3. Похиле сканування (Vattenfall Europe Mining AG)

KIPPSCAN — це програма для впровадження перевірки стабільності в цій області, яка була розроблена в 2012 році компанією Vattenfall Europe

Mining AG (сьогодні Lausitz Energie Eisenbahn AG – LEAG). Мета полягала в тому, щоб мати можливість проводити оцінку великих внутрішніх поверхонь без необхідності робити численні надрізи вручну.

Це стає можливим лише з великими зусиллями через численні перевищення рельєфу, зміни нахилу та мінливий ґрунтово-вологій покрив на схилах [123].

Відправною точкою для програми є розрахунки ґрунтово-механічної моделі на ідеалізованому схилі.

Як описано, розрахунки стабільності проводилися з круговою лінією зламу за допомогою методу Vorowicka. Передбачалося, що у водонасиченій зоні відбулося розрідження, і можна було припустити лише залишкову міцність (недренований залишковий кут тертя γ_{uR}). Нахил рівня ґрунтових вод не враховувався [123].

Під час розрахунків змінювалися величина недренованого залишкового кута тертя γ_{uR} , відстань до ґрунтових вод у підосві насипу z_w , висота насипу h_B та ухил насипу.

Результатом є криві, які показують допустимий нахил схилу залежно від його висоти та були налаштовані для різних відстаней потоку ґрунтових вод і недренованих кутів залишкового тертя (рис 3.5).

Ці криві зберігаються як критерії прийняття рішення в програмі KIPPSCAN [123].

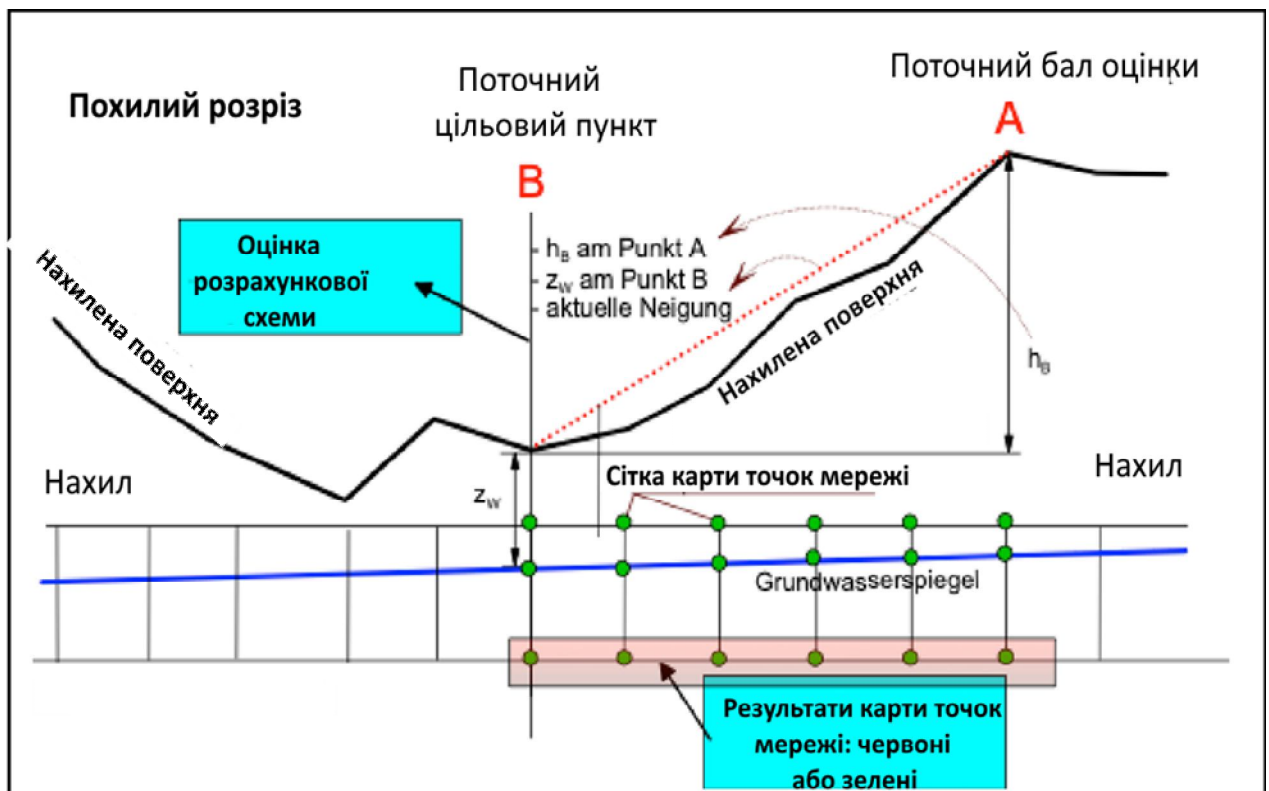


Рис 3.5. Принцип обчислення KIPPSCAN [123]

В якості вхідних значень для програми необхідні цифрова модель місцевості, модель поверхні ґрунтових вод та інформація по недренованому залишковому куту тертя водонасиченого ґрунту. Цифрова модель рельєфу та повер-

хня ґрунтових вод знаходяться у квадратній сітці. Для кожної точки сітки є інформація про висоту (див. рис. 3.5).

Алгоритм KIPPSCAN також показано на рис. 3.5. Починаючи з точки огляду *A*, промені розглядають у 16 напрямках з кроком у плані $22,5^\circ$ [124].

Під час обчислення кожна точка сітки стає початковою точкою *A* обчислення.

Розглянута точка сітки *B* є послідовно кожною точкою сітки до кінцевого критерію, який перетинається з променем, що розглядається. Для кожної точки спостереження *B* порівнюється відповідна крива «допустимий нахил схилу в залежності від висоти схилу».

Якщо критерій не виконується, то точка спостереження *B* забарвлюється червоним кольором, умови розрахункової діаграми вказані як показано червоною зоною на карті, та дають хороший огляд того, де очікуються потоки осідання на основі вхідних значень.

Метод не підходить для дослідження обвалів місцевості [112].

3.4. IKSБ (Beak Consultants GmbH)

У проєкті «Розробка інтегрованої системи безпеки та оцінки перекидання (IKSB)» компанія Beak Consultants GmbH випробувала процес з метою зменшення потенціалу ризику через події розрідження ґрунту шляхом використання штучних нейронних мереж для прогнозування.

Колишній відкритий рудник Schlabendorf-Süd слугував пілотною ділянкою [97].

На першому етапі було досліджено доступні просторові дані. У деяких випадках було необхідно підготувати рівні даних, витягнувши їх з інших даних й упорядкувавши їх [97].

Варто виділити два описані нижче способи підготовки даних.

По-перше, попередні буріння, тобто буріння, які були пробурені в непорушеній породі перед відкриттям кар'єру, були оцінені таким чином, щоб можна було зробити висновки щодо матеріалу у відвалі.

Для цього використано шари навісної стінки 2-го пластового горизонту Lausitz з попередньої розвідки та переведено в пропорції зернових фракцій за допомогою таблиці розподілу.

Процедуру проводили комплексно по всій глибині над пластом, що обґрунтовується реальністю перемішування розкривних порід на розкривному конвеєрному мосту.

На другому етапі просторове призначення отриманих значень було «зміщено» відповідно до напрямку транспортування та ширини мосту конвеєра розкриву (рис. 3.6).

Розподіл зернових фракцій у відвалі, які, однак, застосовуються лише в тому випадку, якщо відвал побудований за допомогою розкривного конвеєрного мосту [97].

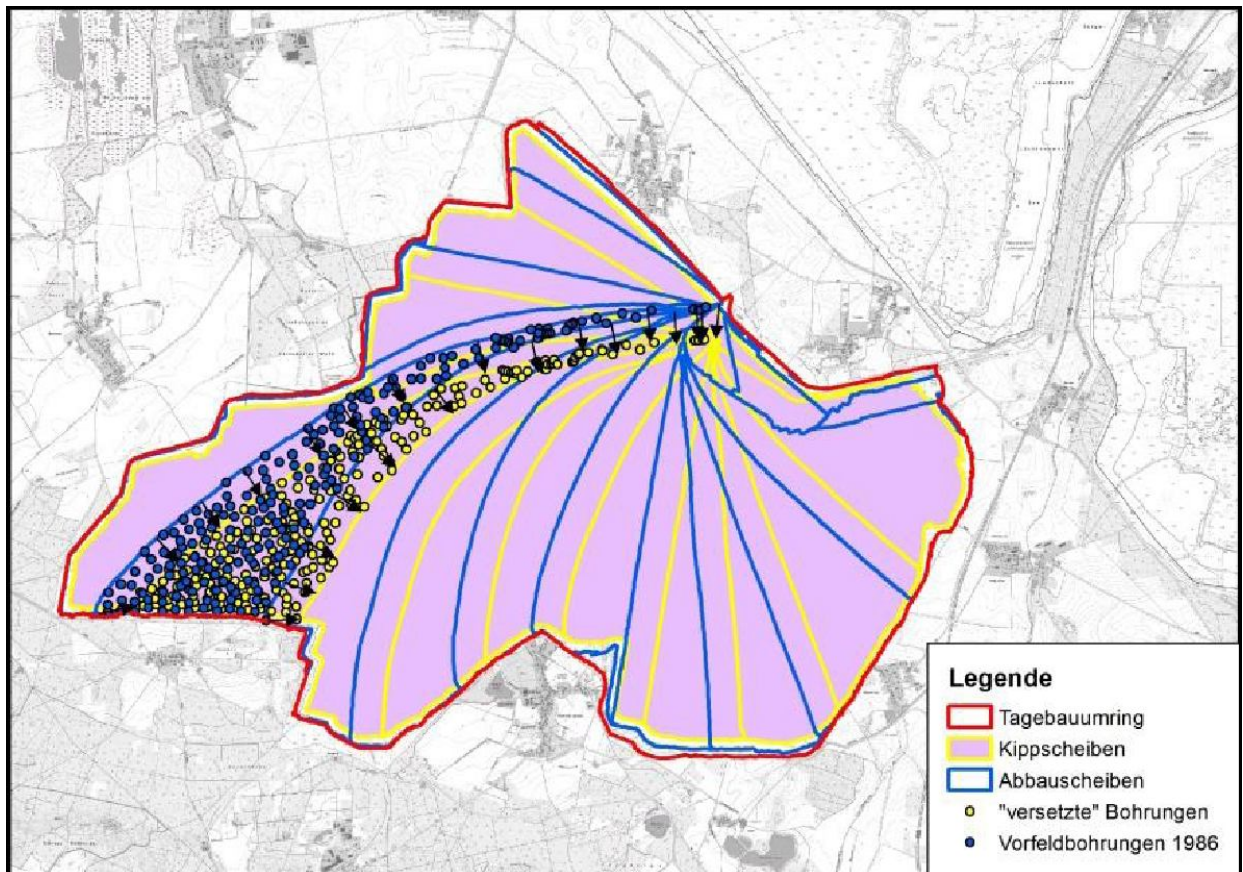


Рис. 3.6. Переміщення отворів фартуха в наконечник (замінована територія) [97]

Отримані просторові розподіли фракцій зерна використовувалися на наступному етапі для оцінки специфічних коефіцієнтів проникності відвалу.

Для цього використовували формули за Weyer і Kaubisch, залежно від вмісту дрібного зерна.

У місцях ущільнення відвалу (наприклад, в районі прихованих дамб) отриманий коефіцієнт проникності зменшувався в 10 разів [97].

Існуючі рівні даних були рівномірно передані на 25-метрову сітку та використані в загальній кількості 132 різних комбінацій у «програмному забезпеченні прогнозування ADVANGEO®».

Це програмне забезпечення використовує штучні нейронні мережі для встановлення зв'язків між «матеріями, які не можуть бути точно зрозумілими математично» [97].

Оскільки завдання включало прогнозування зон ризику, зони попередніх подій розрідження ґрунту, які могли бути класифіковані в часі, використовувалися як "навчальні зони" [97].

Результатом розрахунку є карти, на яких потенціал ризику щодо розрідження ґрунту оцінюється кольором (див. рис. 3.7).

Синій означає низький потенціал ризику, червоний – високий потенціал ризику.

Картка дійсна для певного року, оскільки граничні умови (зокрема, усі змінні, отримані від рівня ґрунтових вод) змінюються з кожним роком.

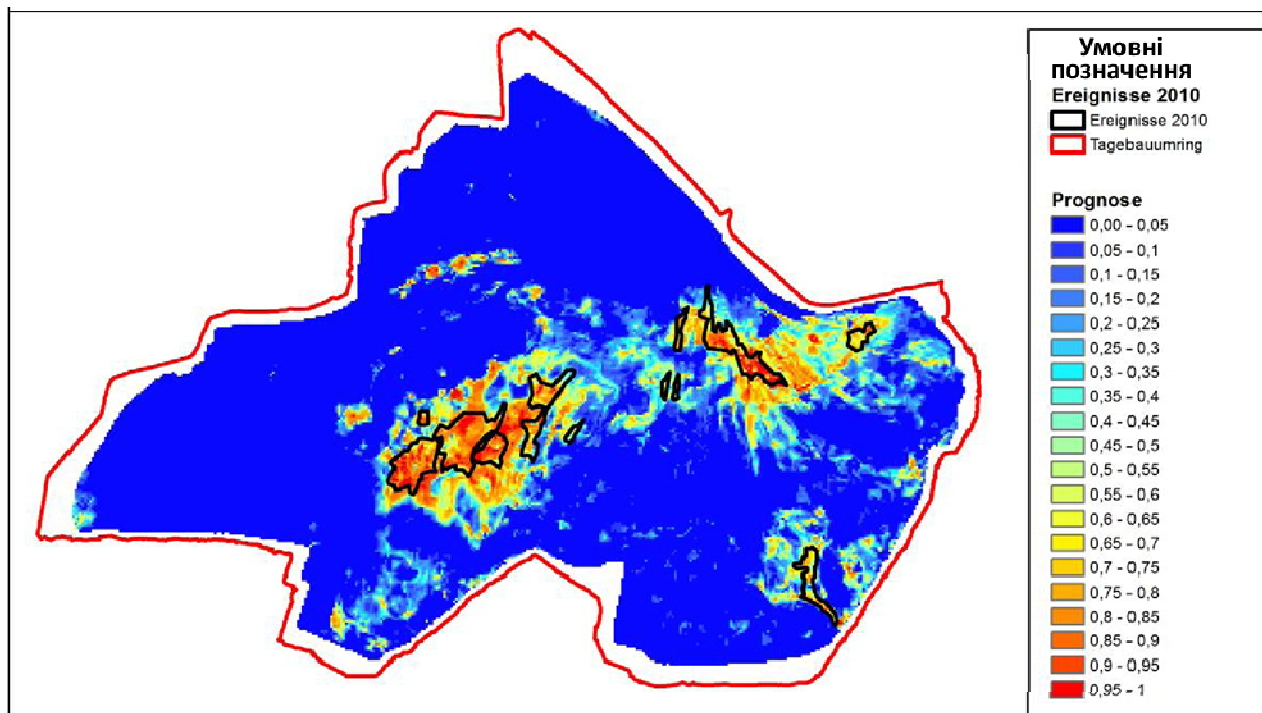


Рис. 3.7. Результат прогнозних розрахунків програмного забезпечення прогнозування ADVANGEO® та навчальні площі, використані за 2010 рік [97]

3.5. Безпека з урахуванням впливу події розрідження ґрунту

Методи, наведені вище, зазвичай спрямовані на демонстрацію стабільності схилу, що містить розріджуваний матеріал. Обчислюється відстань між поточним станом і станом, в якому відбувається розрив.

Інший підхід полягає в тому, щоб неявно припустити перерву та наслідки, напр. *Б.* у вигляді зсувів вологого покриву землі [73]. У кожному випадку слід передбачити розріджену область або поверхню ковзання. Концепції, представлені вище, стосуються двошарової системи твердого ґрунтово-вологого покриву і зрідженого водонасиченого ґрунту. Концепції передбачають рух маси з повністю розрідженим ґрунтом.

У рамках тестових розрахунків було досягнуто найкращого узгодження прогнозу з фактичними подіями розрідження за допомогою наступних параметрів: нахил поверхні, нахил верхнього краю АФВ, товщина наконечника, товщина наконечника АФВ, товщина наконечника плуга, товщина насиченого наконечника, відстань ґрунтових вод до ґрунту, гідравлічний градієнт, глина, мул, дрібний пісок, середній пісок, крупнозернистий вміст піску, d_{10} і \log_{10} (значення k_f) [97]. Щоб визначити причини, чому ця комбінація параметрів дає найкращі результати, необхідно розглянути окремі міркування. Метод штучної нейронної мережі не дає цьому доказів.

Розгляд впливу події є важливою передумовою для оцінки ризику.

3.5.1. Концепція верифікації за Віттігом

Wittig та інші [73] розрізняють 3 випадки або механізми, кожен з яких має різний вплив на поверхню місцевості:

1. Вертикальна рівновага на стовпах земляно-вологого покриття для пояснення вертикальних зсувів на поверхні місцевості (див. рис. 3.8)
2. Горизонтальна рівновага на тілі розлому у формі блоку для пояснення горизонтальних переміщень на поверхні місцевості (див. рис. 3.9)
3. Розрідження ґрунтового стовпа з подальшим осадженням для пояснення вертикальних зсувів на рівнинній місцевості (умови 1 і 2 повинні бути виконані)

Перший випадок, показаний на рис. 3.8, передбачає зрідження у водонасиченому ґрунті під насипом.

Це – повне розрідження, при якому не виникає залишкової міцності, а насичений водою ґрунт поводить себе як суспензія, як рідина. Це приводить до вирівнювання гідростатичного тиску в суспензії під дією сили тяжіння. Щоб спростити, Wittig вказує на те, що рівень тиску суспензії згодом приймає горизонтальне положення.

Таким чином, будь-які градієнти вільної поверхні ґрунтових вод зникають шляхом вирівнювання поверхні місцевості.

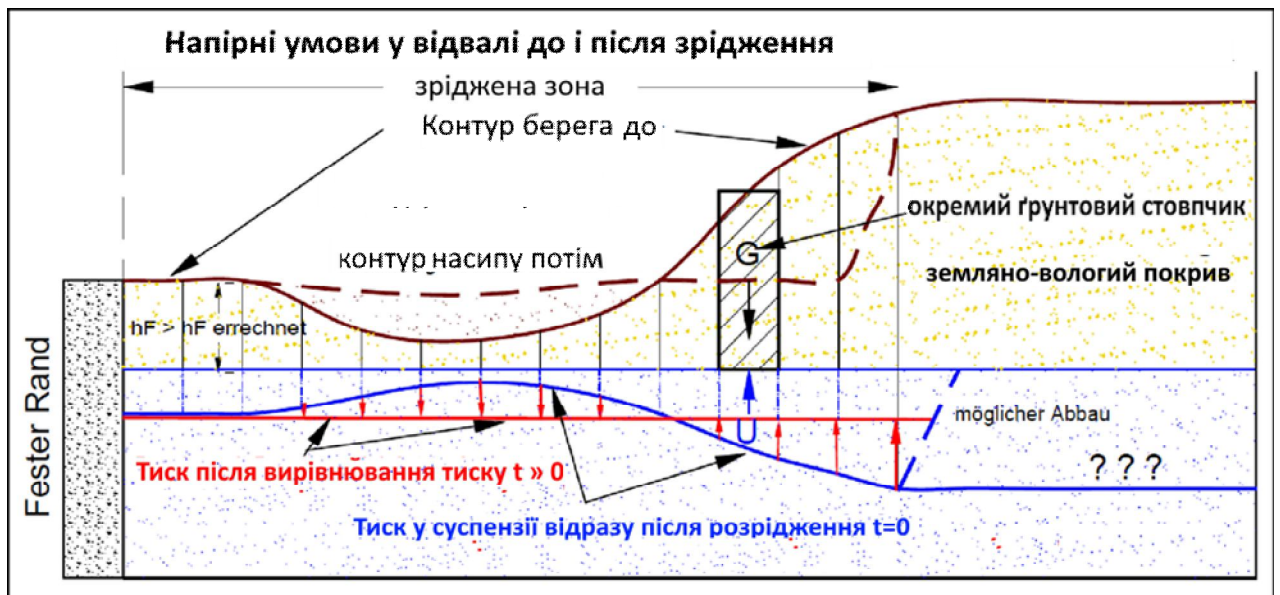


Рис. 3.8. Умови тиску в двофазній системі (вологий ґрунт – зріджений, водонасичений ґрунт) під час розрідження [125]

Внаслідок розрідження земляно-волого оболонка починає спливати на суспензію, оскільки має меншу щільність. У кожній ламелі підлоги утворюється вертикальна рівновага, при якій вага земляно-вологого покриття і виштовхувальна сила на земляно-вологе покриття в суспензії врівноважуються. Оскільки гідростатичний тиск у суспензії постійно вирівнюється, то ділянки з товстим земляно-вологим покривом опускаються, оскільки тут домінує сила тяжіння. Ділянки з невеликим вологим покривом піднімаються, оскільки переважає виштовхувальна сила [125]. Wittig й ін. [73] показують приклади, в яких контур кінцевого стану після розрідження можна було б добре передбачити в розрізі реальних подій розрідження ґрунту (рис. 3.9).

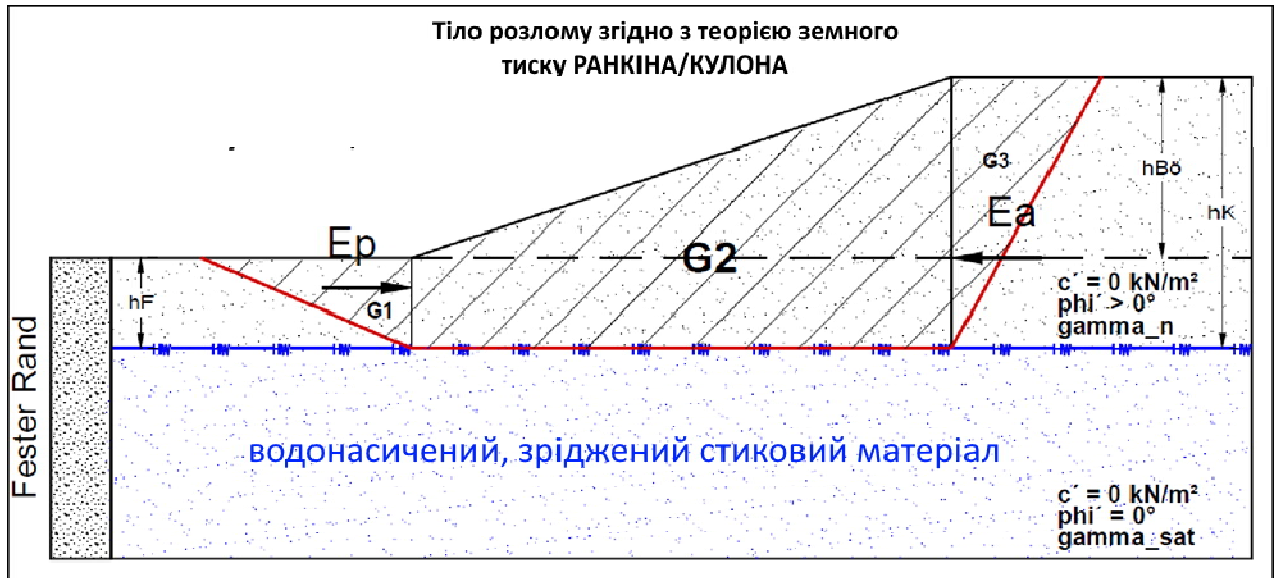


Рис. 3.9. Тіло розлому у формі блоку над горизонтальними ґрунтовими водами поверхні з наближенням активного і пасивного земного тиску [73]

На рис. 3.9 показано описаний Wittig випадок. Відправною точкою тут також є повне розрідження водонасиченого наконечника, в результаті чого суспензія гідростатично збалансована. Нижній край земляно-вологого покриву прийнято горизонтальним. Оскільки тертя на нижній кромці тіла тріщини, позначеного G_2 на малюнку, відсутнє або є незначним, лише пасивний тиск ґрунту E_p біля основи насипу та активний тиск ґрунту E_a біля уступу насипу входять до горизонтальної рівноваги. Розглянутий механізм відповідає складному механізму руйнування з кількома тілами ковзання та прямими лініями руйнування. Коефіцієнт безпеки можна розрахувати згідно з рівнянням (29) [73].

$$\eta = \frac{E_p}{E_a} = \frac{\frac{1}{2} \cdot K_p \cdot h_F^2 \cdot \gamma_k}{\frac{1}{2} \cdot K_a \cdot h_K^2 \cdot \gamma_k} \quad (29)$$

Коефіцієнт міцності η залежить від коефіцієнта пасивного ґрунтового тиску K_p , активного коефіцієнта ґрунтового тиску K_a , відстані від ґрунтових вод до підніжжя насипу h_F і відстані до ґрунтових вод від берега насипу h_K . Вага вологого кінчика γ_k скорочується з рівняння (29).

Якщо перетворити рівняння (29) на h_F , отримається рівняння (30). Коефіцієнти земного тиску K_a і K_p можна розрахувати за даних умов за допомогою рівняння (31) [105]. Припускаючи граничну рівновагу з $\lambda = 1$ і ефективний кут тертя 30° у земляно-вологому покриві, відстань ґрунтових вод від ґрунту біля підніжжя насипу h_F має становити щонайменше $1/3$ відстані від ґрунтових вод до уступу насипу h_K так, що виконується умова рівноваги (рівняння (32)).

$$h_F = \sqrt{\frac{K_a \cdot h_K^2 \cdot \eta}{K_p}} \quad (30)$$

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (31)$$

$$h_F = \frac{1}{3} \cdot h_k, \text{ де } \eta = 1; \varphi = 30^\circ. \quad (32)$$

Події розрідження ґрунту, які відбулися за Wittig, досліджувалися з використанням умови, сформульованої у рівнянні (32) [125].

Визначаючи рівень ґрунтових вод, критерій дав можливість зробити гарний прогноз щодо того, які події спричинять горизонтальні зсуви, а які ні.

Попередні підрозділ показує, як критерій у рівнянні (32) може бути оцінений і представлений просторово.

3.5.2. Концепція доказів за Кудлою й ін.

Kudla розробив концепцію перевірки внутрішнього перекидання, яка базується на:

Таблиця 3.3

Докази концепції дії згідно з Kudla (за [126])

Розрахунковий випадок	Benennung	Посилання на тип події
SF	Випадок розрахунку Дослідження стабільності SF для демонстрації проти осідного потоку (горизонтальні зсуви на поверхні місцевості)	Тип 2
AD	Випадок розрахунку AD Дослідження стійкості для надання доказів проти компенсаторних деформацій через різницю у висоті рельєфу (докази проти обвалення рельєфу з підйомами)	Тип 1b
VGB	Випадок розрахунку Дослідження стабільності VGB для підтвердження відсутності руйнування землі через розрідження під зовнішніми навантаженнями	-
GT	Розрахунковий випадок GT підтвердження придатності (захист від обвалення ґрунту без підйомів)	Тип 1a

Відповідно до [126], докази повинні оброблятися в їх порядку, причому проходження кожного доказу є необхідною умовою наступного доказу. Випадки розрахунку SF і AD потрібно перевіряти, лише якщо застосовуються такі критерії:

- Висота схилу $\Delta h > 1$ м.
- Релевантний коефіцієнт $m_h > 0,05$ м.

Для відповідної ділянки водонасиченого та зрідженого відвалу параметри уявної залишкової міцності на зсув у недренованих умовах можна застосовувати рівняння (33) [126].

$$\tau_{u,R} = c_{u,R} = t_R = f(n) = f(\sigma'_v, n_0) \text{ und } \varphi_{u,R} = 0 \quad (33)$$

В роботі [126] порівняльні розрахунки проводились за такими підходами:

- Підхід 1: $c_{u,R} = 0$ і β (можливе збільшення залежно від напруги)
- Підхід 2: $\varphi_{u,R} = 0$ і $c_{u,R}$ (можливе збільшення в залежності від напруги)

У розрахунках рекомендовано використовувати підхід 2 [126]. Підхід 2 підходить для вираження залежності міцності на зсув від напруги через зміну частки пор n .

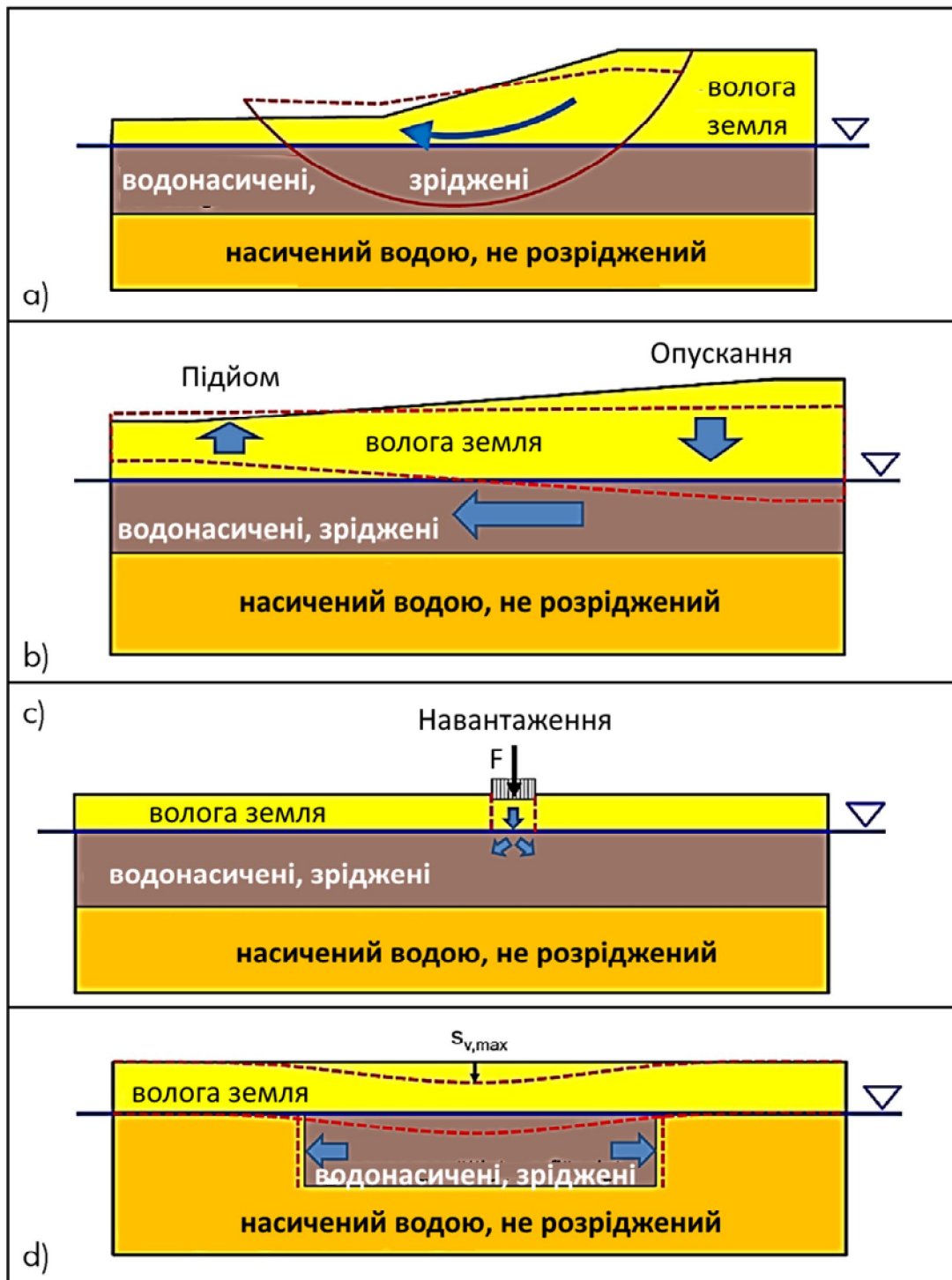


Рис. 3.10. Схематичне зображення доказів згідно з концепцією Kudla й ін. (за [126])

а) Тести на стабільність для надання доказів проти потоку розрахунків (випадок розрахунку SF)

б) Дослідження стійкості для отримання доказів проти компенсаційних деформацій, спричинених різницею у висоті місцевості (випадок розрахунку AD)

с) Випробування на стійкість для надання доказів проти руйнування землі через розрідження під зовнішніми навантаженнями (випадок розрахунку VGB)

d) Підтвердження придатності (випадок розрахунку GT)

По-перше, для досліджуваної території проводяться тести на стабільність, щоб надати докази проти осідного потоку (випадок розрахунку SF) [52]. Параметри залишкової міцності на зсув застосовуються в області нижче рівня ґрунтових вод. Тому передбачається, що розрідження відбулося в цій області кінцевої глибини.

Другим доказом є розрахунковий випадок AD (дослідження стійкості для захисту від компенсаційних деформацій через різницю у висоті місцевості).

Розрахунок передбачає, що сценарій розрахунку SF забезпечив достатній захист від потоку розрахунків. Це означає, що земляно-вологий покрив є горизонтально нерухомим і на поверхні ґрунту можливі лише вертикальні переміщення [52]. Однак передбачуване зрідження в шарі нижче рівня ґрунтових вод може призвести до горизонтальних зсувів у цьому шарі, що впливає на вертикальні зсуви на поверхні землі. Зокрема, підвищення рівня вологості землі можна пояснити за допомогою моделі, на якій базується розрахунковий випадок AD (тип події 2b).

Для підтвердження у випадку розрахунку AD досліджується (частково) зріджена однорідна область нижче рівня ґрунтових вод (див. рис. 3.11). Для цього враховується горизонтально вирівняний баланс сил.

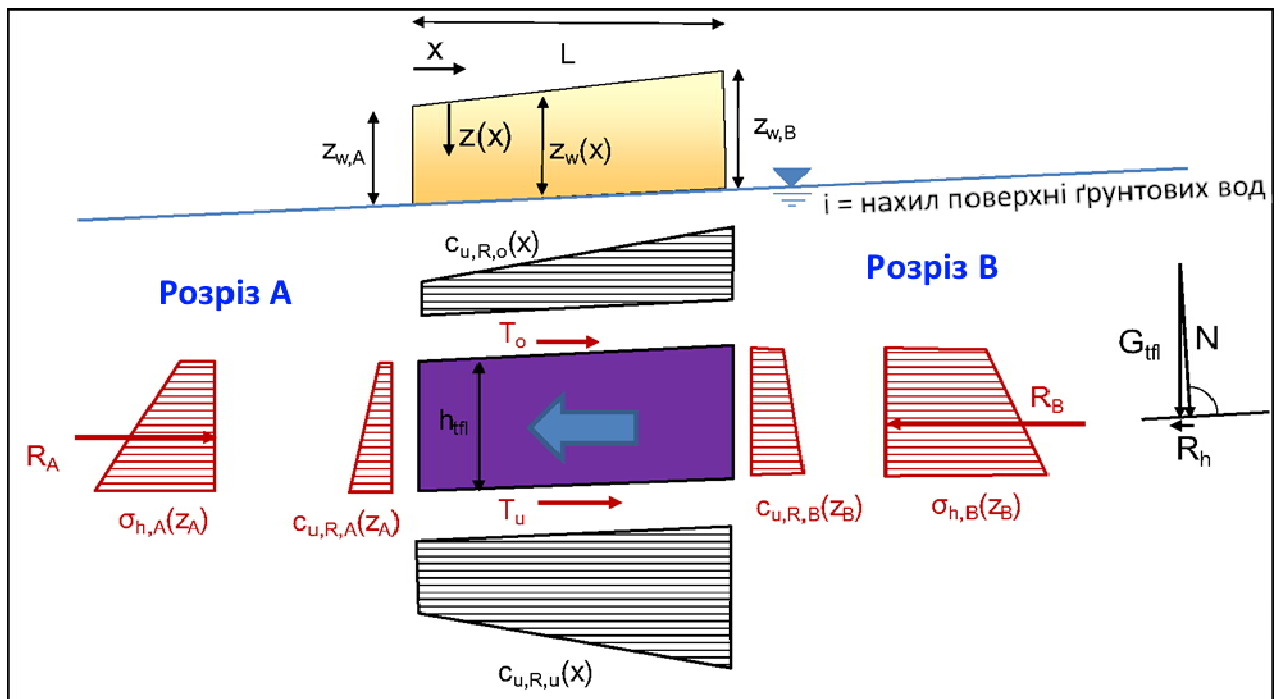


Рис. 3.11. Напруги та зусилля під час перевірки на компенсаційні деформації [52]

Перепади висот місцевості (випадок розрахунку AD) [126]

Наступні змінні визначені на рис. 3.11 і включені в перевірку [52]:

L – довжина насипу;
 Z_{wA} – відстань рівня ґрунтових вод на нижньому краю насипу (ділянка А);
 Z_{wB} – відстань рівня ґрунтових вод на верхньому краю насипу (секція В);
 c_u – недренована когезія, недренована міцність на зсув;
 h_{tfl} – висота частково зрідженої ділянки;
 i – гідравлічний градієнт;
 X, Z – координати;
 σ_h – горизонтальна загальна напруга;
 Індекс R – стан залишкової міцності;
 Індекс A – відноситься до розділу А;
 Індекс B – відноситься до розділу В;
 Індекс o – відноситься до верхнього краю частково зрідженої області;
 Індекс u – відноситься до нижнього краю частково зрідженої області.

Горизонтально орієнтований баланс сил подано у рівнянні (34) [126]. Рушійними силами є результуюча сила R_B на частково розрідженій ділянці в секції В і сила R_h , створювана базовою поверхнею, нахиленою в частково розрідженій області нижчі сили зсуву T_0 і мають утримуючий ефект T_u . Оскільки розглядається плоский випадок, сили, перпендикулярні до площини розгляду, не враховуються.

$$R_B + R_h = R_A + T_g + T_u. \quad (34)$$

Результуюча сила R_B на частково зріджену ділянку в секції В розраховується згідно з рівнянням (35) [126]. Загальне горизонтальне напруження інтегрується по глибині, при цьому загальне горизонтальне напруження є результатом активного тиску землі в секції В.

$$R_B = \int_{Z_{w,B}}^{Z_{w,B}+h_{tfl}} \sigma_{h,B}(z_B) dz \quad \sigma_{h,B}(z_B) = \sigma_{v,B}(z_B) - 2 \cdot \frac{c_{u,R,B}(z_B)}{Si_{AD}} \quad (35)$$

Рушійна сила R_h розраховується згідно з рівнянням (36).

$$R_h = i \cdot G_{tfl} = i \cdot h_{tfl} \cdot L \cdot \gamma_r \quad (36)$$

Результуюча сила R_A на частково зріджену ділянку в секції А розраховується згідно з рівнянням (37) [126]. Тут також загальне горизонтальне напруження інтегрується по глибині, при цьому загальне горизонтальне напруження є результатом пасивного тиску землі в секції А.

$$R_A = \int_{Z_{w,A}}^{Z_{w,A}+h_{tfl}} \sigma_{h,A}(z_A) dz \quad \sigma_{h,A}(z_A) = \sigma_{v,A}(z_A) + 2 \cdot \frac{c_{u,R,A}(z_A)}{\eta_{AD}} \quad (37)$$

Утримуючі сили T_0 і T_u є результатом інтегралу зсувних сил по довжині L (рівняння (38) і (39) [183]).

$$T_o = \int_0^L \frac{c_{u,R,o}(x)}{Si_{AD}} dx \quad (38)$$

$$T_u = \int_0^L \frac{c_{u,R,u}(x)}{s_{iAD}} dx \quad (39)$$

Кожне з рівнянь (35)-(39) розглядає стан рівноваги, в якому загальна безпека q_{AD} включається як відношення існуючої залишкової міцності до необхідної залишкової міцності для рівняння (34).

Щоб знайти це значення, η_{AD} потрібно повторювати, доки не буде виконано рівняння (34).

Мінімум η_{AD} знаходять шляхом зміни положення ділянок А і В і товщини частково зрідженого шару $h_{\text{пл}}$ [126].

Якщо доведено достатню надійність для розрахункового випадку AD, то компенсаційні деформації не виникають (див. вище). Однак не можна виключати вертикальних зсувів на поверхні місцевості.

Випадок розрахунку VGB також базується на припущенні про те, що під суцільним вологим покриттям землі є зріджена область (див. 3.12). Доказ надається як «захист проти продавлювання для жорсткої заміної основи» на основі додатку В DIN 4017:2006-03 [52].

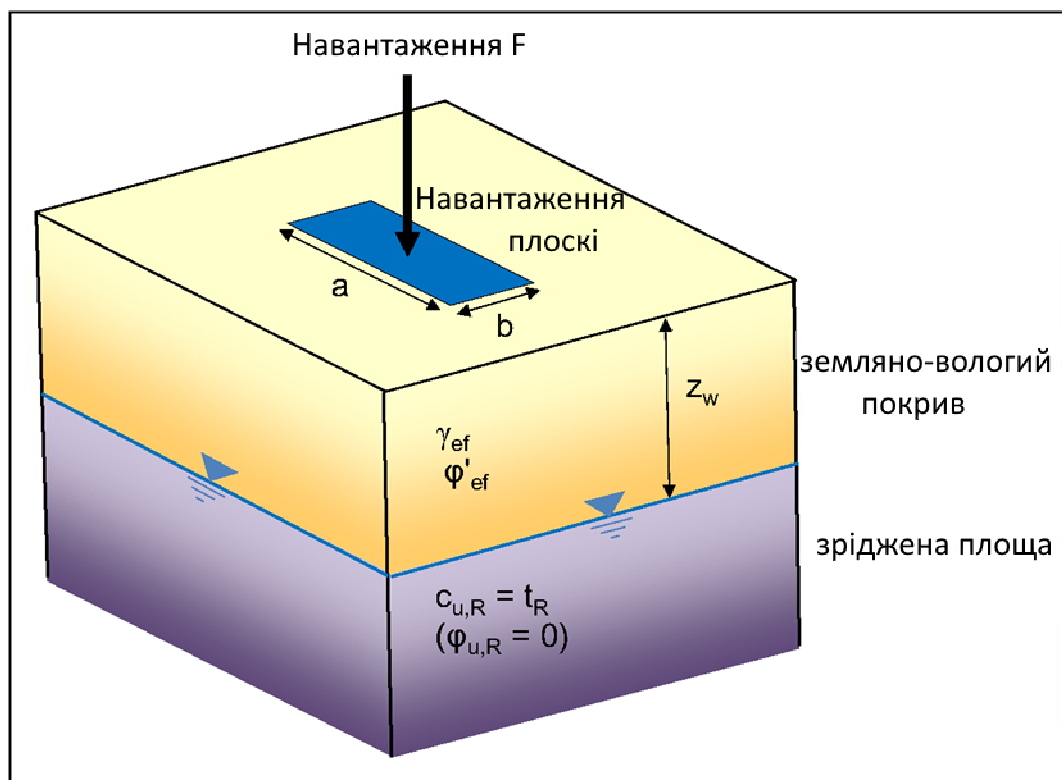


Рис. 3.12. Модель експериментального розрахунку [52]

Випадок обчислення GT є доказом зручності використання у випадку, якщо було доведено безпеку для попередніх випадків обчислення SF, AD і VGB. У результаті оцінюються наступні геометричні параметри, показані на рис. 3.13, западини просідання, яка простягається нескінченно перпендикулярно до площини представлення:

- максимальне зниження $S_{v,max}$;
- ширина западини b_M ;
- стібок з розрахунку на ширину 10 м S_{10M} ;
- максимальний градієнт m .

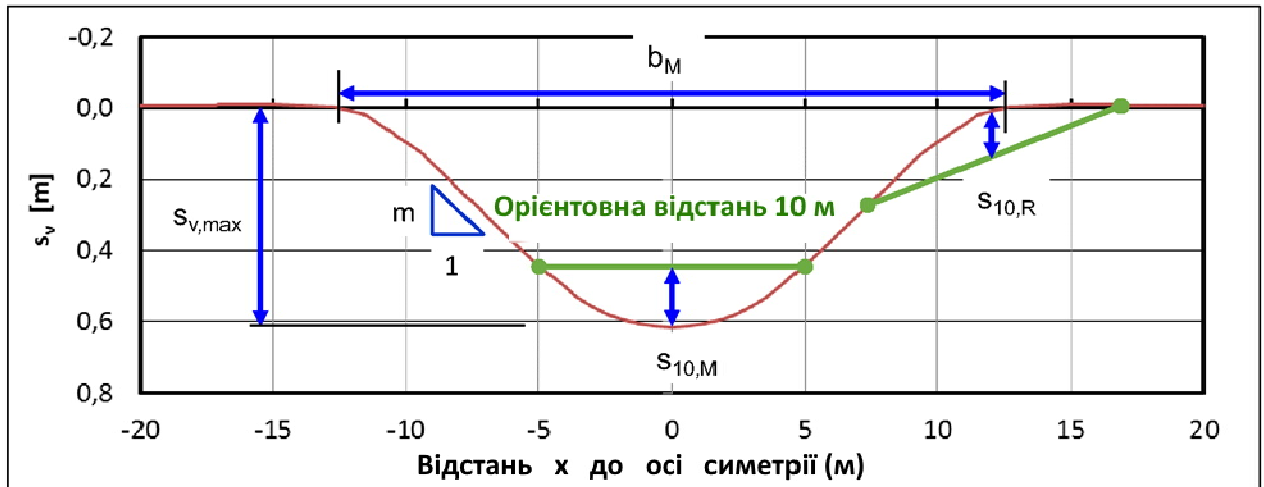


Рис. 3.13. Геометричні параметри для опису западини просідання в розрахунковий випадок GT [126]

Для випадку розрахунку GT опорне зменшення $S_{v,ref}$ обчислюється на першому кроці. Це відбувається як частина комплексної оцінки KDS. З цією метою зміна частки пор внаслідок зрідження та консолідації розраховується по глибині z та інтегрується по глибині зрідження h_{ift} [52].

На рис. 3.14 показано два різні можливі випадки, які враховуються при визначенні зміни частки пор.

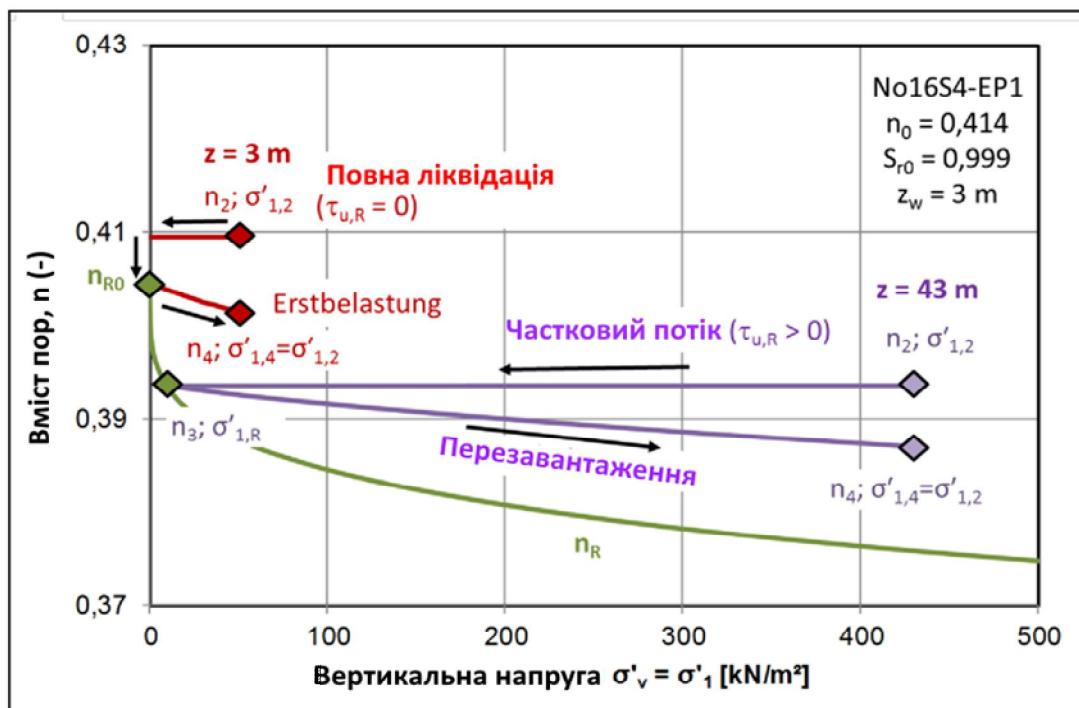


Рис. 3.14. Зміна частки пор під час розрідження та подальшої консолідації. Приклади при $z = 3$ м (повне зрідження) і $z = 43$ м (часткове зрідження) [126]

Для діапазону глибин $z = 3$ м ($n_2 > n_{R0}$) ефективне напруження спадає до нуля під час повного розрідження. Під час консолідації частка пор спочатку падає до n_{R0} , а потім слідує початковій кривій навантаження консолідації з відновленням ефективних напруг до стаціонарного стану. Для прикладу діапазону глибин $z = 43$ м ($n_2 < n_{R0}$), часткове розрідження призводить до зменшення ефективного вертикального напруження до досягнення критичної фракції пор n_R . Оскільки повного розм'якшення не відбулося, ґрунт на глибині $z = 43$ м під час консолідації слідує кривій перевантаження [126].

Рівняння, необхідні для розрахунку зміни частки пор, наведені в [52].

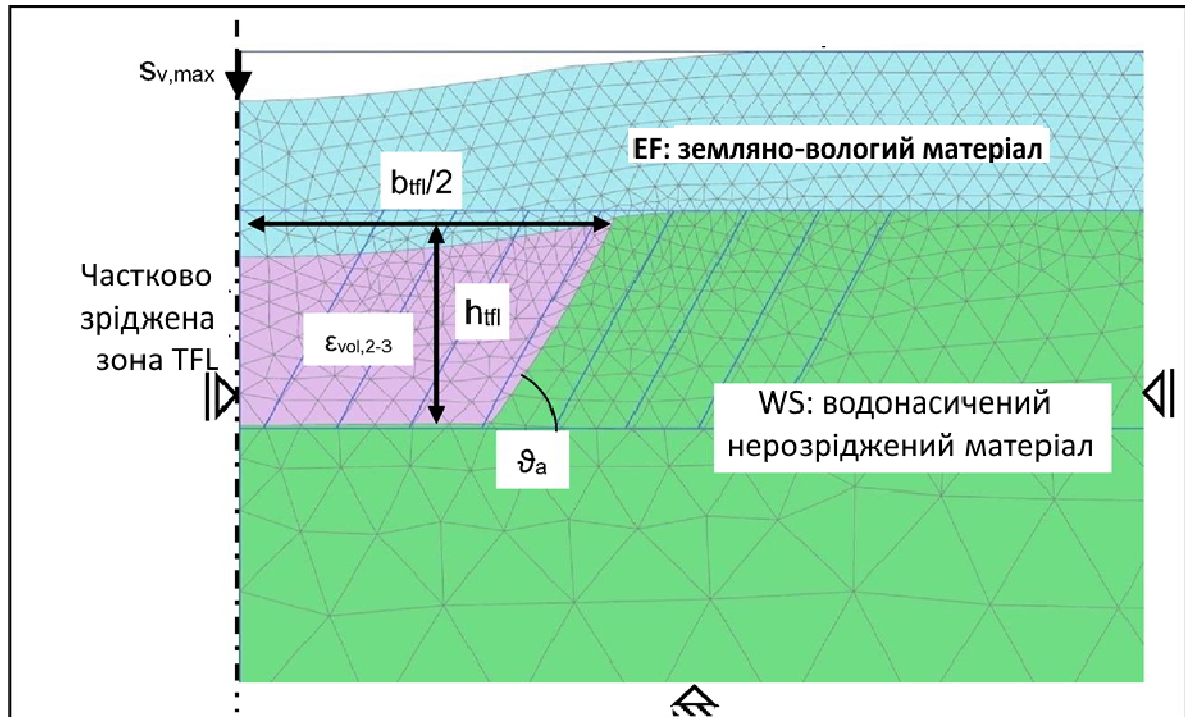


Рис. 3.15. Розрахункова модель двовимірного розрахунку КЕ для визначення осідання та $S_{v,max}$ [126]

Модель FE використовується для розрахунку максимального зменшення $S_{v,max}$ (див. рис. 3.15). Спостерігається обмежене часткове розрідження нижче рівня ґрунтових вод. Змодельована область. Моделювання виконується шляхом зміни матеріалу в моделі FE, при цьому на додаток до параметрів матеріалу, об'ємна зміна матеріалу (визначена через еталонну депресію $S_{v,ref}$) вводиться як гранична умова. Межа частково зрідженої ділянки з водонасиченим не зрідженим матеріалом проходить під нахилом, який відповідає куту повертання активного тиску землі d_a . Положення цієї межі змінюється в розрахунку, поки не буде знайдено максимальне значення $S_{v,max}$ [126].

Ключовим параметром для розрахунку є модуль жорсткості E_s водонасиченого нерозрідженого матеріалу. Відповідно до [126], це можна оцінити за піковим тиском q_c зондування тиску.

3.5.3. Концепції поведінки осадження селевих потоків

Проблемою, яка часто описується в літературі, є прогнозування поведінки селевих потоків [127, 128]. Приймається певна маса ковзання, а поведінка оцінюється на основі емпіричних підходів або за допомогою гідродинамічних чисельних розрахунків. Дослідження переслідують наступні цілі:

- Оцінка діапазону зсуву, напр. B щодо досягнення інфраструктури або населених пунктів (див. також [129]).
- Оцінка швидкості ковзання мас, напр. B по відношенню до напруги на опорах мосту.
- Оцінка впливу на бар'єрні конструкції.
- Оцінка хвильового збудження при зсувах в озерах.

Емпіричний розгляд

Приклад простої емпіричної моделі наведено в [128]. Емпіричне рівняння (40) застосовується до селевих потоків, на які мало впливають перешкоди (див. також рис. 3.16).

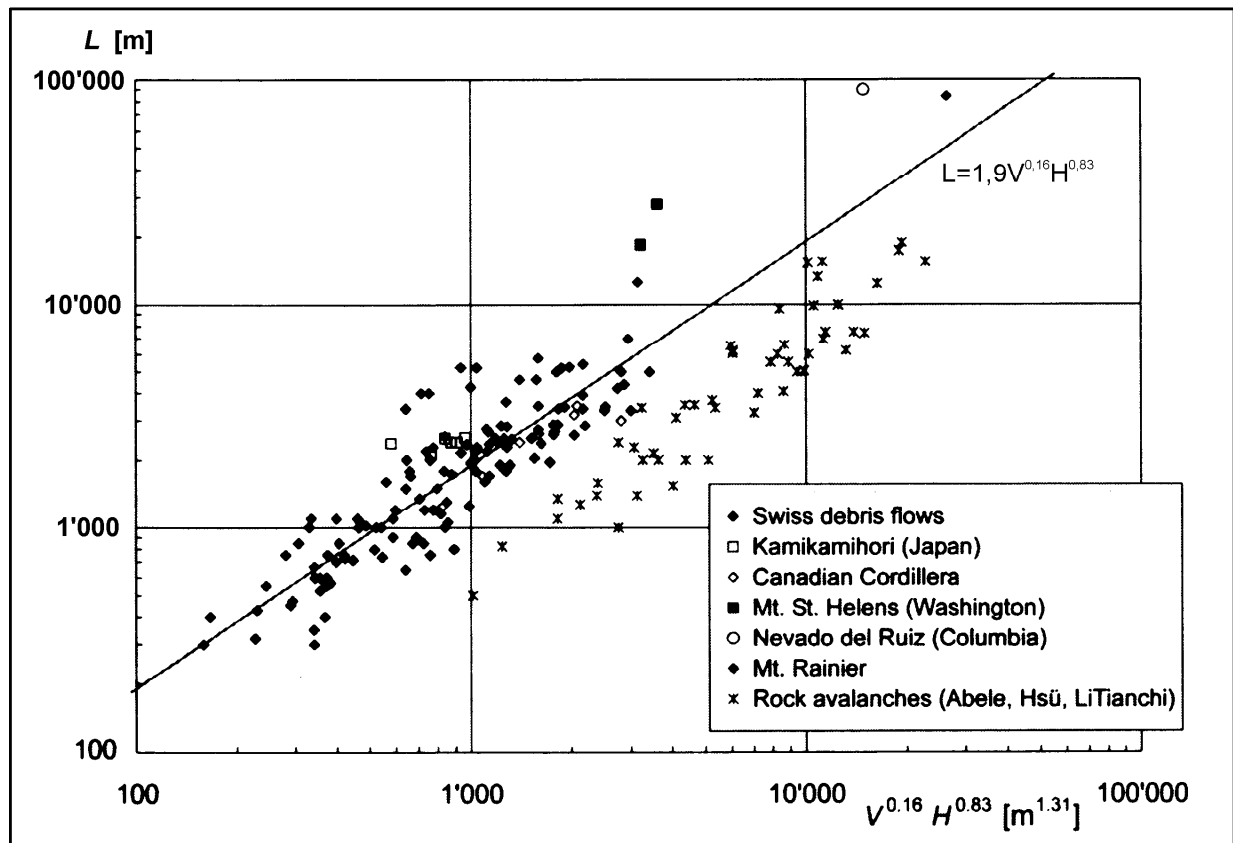


Рис. 3.16. Залежність горизонтальної відстані між початковою точкою і точками розташування L , V і H відповідно до рівняння (40) та враховані дані (згідно [128])

Представлені концепції стосуються всіх рухів маси з високим вмістом твердих речовин. Назви масових рухів змінюються залежно від контексту чи регіону (наприклад, селевий потік, уламкова лавина, зсув тощо).

$$L = 1,9 \cdot V^{0,16} \cdot H^{0,83} \quad (40)$$

де: L – горизонтальна відстань між місцем походження та місцем осадження селювих потоків в м;

V – Об'єм селювого потоку в м^3 ;

H – Перепад висот, який долає селювий потік, м.

Гідродинамічний чисельний розрахунок

19 липня 1985 року біля Терезо в Трентіно прорвало два хвостосховища, які збирали залишки від переробки плавикового шпату. Хвости склалися з дрібного піску та дрібнозернистого матеріалу. Розріджена речовина текла по долині на відстань близько 4 км і пододала перепад висот близько 400 м, загинули 268 людей [127].

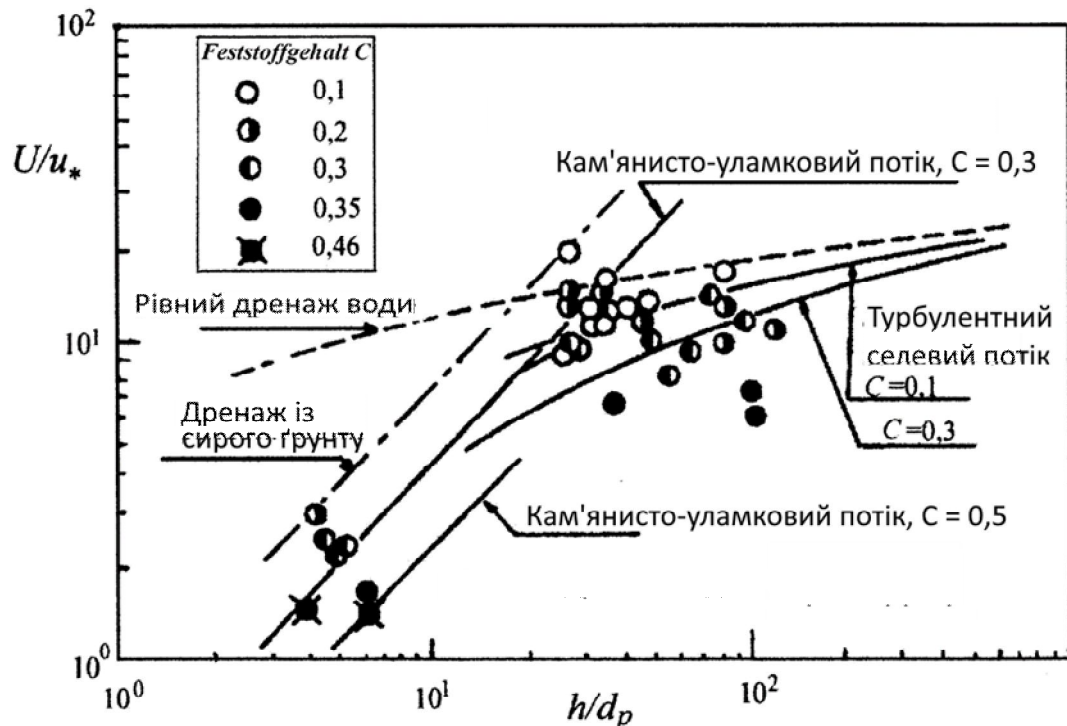


Рис. 3.17. Залежність поведінки потоку в різних співвідношеннях h/d_p (згідно [127])

Відповідно до [127], поведінка потоку уламкового потоку залежить від відповідної глибини потоку та діаметра частинок відповідно до рівняння (41) (див. рис. 3.17).

$$\frac{U}{u_*} = f\left(\frac{h}{d_p}\right) \quad (41)$$

при цьому u означає швидкість течії по глибині;

U – швидкість зсуву рідини;

h – відповідна глибина потоку;

d_p – діаметр частинки.

Для співвідношень $h/d_p > 10$ поведінка потоку приблизно відповідає поведінці рідини (води).

Цей критерій стосується хвостосховищ.

Це означало, що добре відомі закони гідродинаміки можна застосувати до води.

Швидкість потоку, об'єм викиду та положення рівня рідини були розраховані для ходу викиду.

Розрахунки узгоджувалися з виміряними висотами в окремих поперечних перерізах і з часом, реконструйованим із сейсмічних записів.

Це підтвердило, що течія зріджених хвостів нагадує течію чистої води.

Числове обчислення з репрезентативними одиницями об'єму

Для чисельного дослідження поведінки потоку рухів маси з високим вмістом твердих частинок використовуються репрезентативні одиниці об'єму (див. рис. 3.18), властивості яких можуть змінюватися залежно від розташування в межах руху маси.

Методи кінцевих елементів (FEM), методи кінцевих різниць (FDM) та інші мережеві чисельні методи, відомі з механіки ґрунтів, досягають своєї межі при розгляді переміщень значної маси, оскільки великі деформації зумовлюють серйозні спотворення мереж і викликають числову, інколи доволі значну, нестабільність [130].

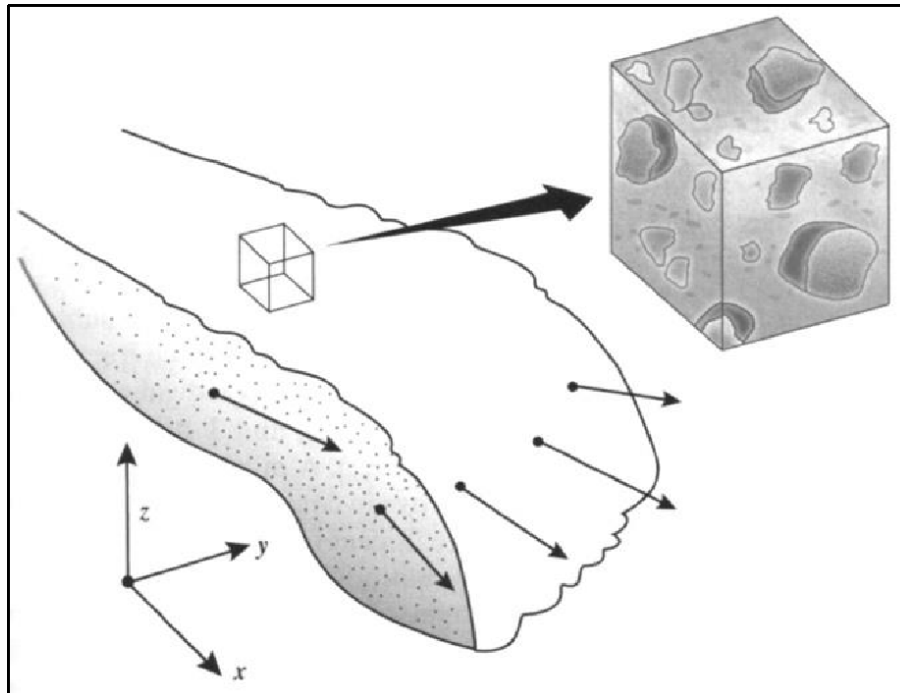


Рис. 3.18. Розгляд репрезентативних одиниць обсягу для характеристики динаміки селевих потоків [128]

«Метод гідродинаміки згладжених частинок» (SPH) — це безсітковий чисельний метод із формулюванням Lagrange.

Він виявився придатним для чисельної реєстрації потоків відходів та інших рухів мас [130].

У формулюванні Huang – див. [130].

Поведінка рідини Бінгема та критерій руйнування Мора-Кулона були об'єднані для опису руху потоку за допомогою рівнянь.

Існує також «глибоко інтегрована гідромеханічна модель» відповідно до Pastor та інших (див. [131]).

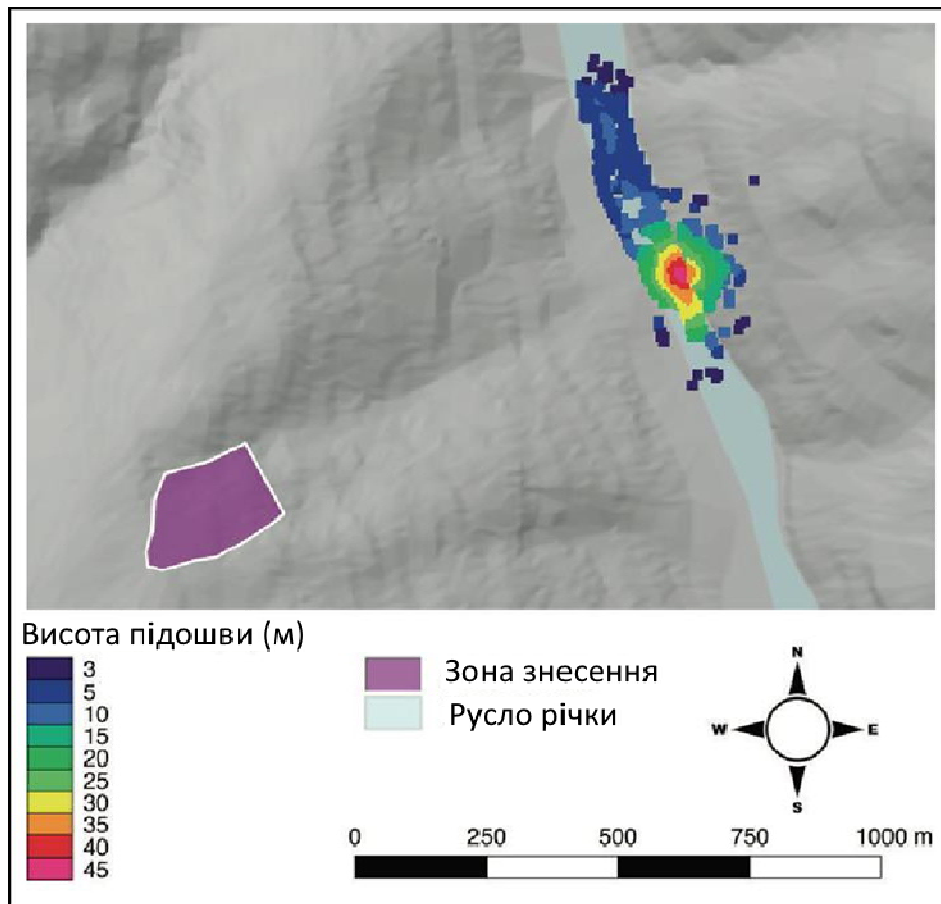


Рис. 3.19. Висота опадів і зона відриву селевого потоку (розраховані за допомогою SPH Приклад, шлях потоку не позначено) [131]

Рецептури були перевірені на їх застосовність у конкретних випадках. На рис. 3.19 показано приклад, у якому визначено зону поділу та включено рух маси з використанням інтегрованої в глибину гідромеханічної моделі SPH. Мета полягала в тому, щоб змодельовати висоту відкладень і поширення відкладених мас. У порівнянні з вимірюваннями на фактичному зсуві це було успішним [131].

Висновки за розділом 3

Аналіз впливу залишків колишніх відкритих гірничих розробок на безпеку людей з'ясує, як наслідки розрідження ґрунту залежать від морфології рельєфу в початковому стані. Основою для цього є відповідний нахил, який визначався на базі цифрових моделей рельєфу до настання 125 розглянутих подій. Відповідна відстань рівня ґрунтових вод біля підніжжя кожного насипу була використана як додатковий параметр. Емпіричний зв'язок між наслідками подій розрідження гірських порід та певними ділянками може бути показаний

на діаграмі, на якій відстань підземних вод відкладено проти числа значущості. Ці області були використані для визначення категорій ризику.

Оскільки розмежування категорій небезпеки базується на геометричних даних, доступних для всієї території, їх можна відобразити у вигляді карти небезпек у цій зоні. Для цього розроблено алгоритм, за допомогою якого відповідне число mh можна отримати з цифрової моделі рельєфу. Карти небезпек також показують зони, які впливають на це: ущільнені території, попередні події розрідження гірських порід та акваторії. Наслідки розрідження ґрунту у насиченому водою стані, які представлені категоріями небезпеки, завжди пов'язані з умовою, що розрідження гірських порід дійсно відбувається.

Карти ризиків аналізувалися відповідно до запропонованого порядку з 2006 по 2020 рік. Фактичні події розрідження гірських порід, які відбулися протягом цього періоду, порівнювалися на основі їх серйозності з категоріями небезпек у відповідній карті. Для більшості подій було знайдено прийнятне узгодження. Було пояснення винятків, наприклад, гальмування горизонтального зміщення породних мас прихованими дамбами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній роботі охарактеризовано загрозу від розрідження гірських порід, а потім – проведено аналіз механізму їх виникнення та технологічних тригерів розвитку. Стало зрозуміло, що явища, які виникають у зв'язку з просадочними потоками, несуть значно більший ризик для людей, ніж у випадку з обвалами. Відповідно до важливості різної тяжкості подій розрідження гірських порід було запропоновано класифікацію їх на різні групи за типами проявів. Ця класифікація базується на певних критеріях. Слід звернути увагу на визначення осідного потоку з максимальним горизонтальним зсувом на поверхні місцевості. За менших значень горизонтального зміщення відбувається обвал розм'якшених породних мас, які втрачають стійкість.

Було проведено аналіз впливів, щоб визначити ймовірність розрідження гірських порід. Основою стали площі та типи подій розрідження, що фактично відбулися. Вони локалізувалися на територіях, які могли постраждати у відповідний рік відповідно до карти небезпек. Середнє значення для кожної відкритої розробки було розраховано на основі ймовірності появи, визначеної для кожного року та кар'єру, оскільки це значення сильно коливається, і в даних не помітно тенденції відносної частоти реалізації розрідження.

Крім того, була визначена ймовірність перебування людей на місці, залежно від їх поточного або планованого використання. Для цього були зроблені припущення, оскільки розглядався фіктивний стан звалища (допущене до використання без заходів зниження розрідження гірських порід).

Надійність відвалу розраховується в рамках аналізу наслідків. Розрахунок базується на квадратній сітці 5×5 м, причому розрахований ризик прив'язується до площі відповідної комірки сітки. Розрахунок включає ймовірність розрідження гірських порід, ймовірність перебування людини та летальність небезпеки, що розглядається. Ці дані пов'язані по-різному, залежно від місцевої категорії ризику. Для обвалів рельєфу окремо розглядалася ймовірність наступних обвалів, оскільки це впливає на аварійність у місцях, де можливе мимовільне руйнування місцевості.

Крім розрахованого колективного ризику, запропоновано також підхід до розрахунку ризику індивідуального. Визначені ризики були інтерпретовані, а значення – класифіковані відповідно до їх значущості.

Чинники стійкості відвалів, розглянуті в роботі, оцінюються кількісно. З цією метою була зроблена початкова спроба визначити відносну частоту фактичних подій розрідження гірських порід, що було неможливим через малу кількість випадків.

Для оцінки загрози розрідження гірських порід визначають колективний та індивідуальний ризики, які є небезпечними для повсякденної діяльності людей та технологічних ситуацій. Крім того, є необхідним проведення досліджень, щоб з'ясувати, які граничні рівні технологічних впливів потенційно уможливлються в зонах відкритих розробок та як проводиться оцінка загроз на основі граничних ризиків.

Було запропоновано граничний ризик і показано, які ділянки на досліджених відвалах вважаються безпечними та ризикованими на основі запропонованого показника: для того, щоб адекватно скоригувати склад технологічно-

го комплексу та порядок формування і параметри відвалу (внутрішнього чи зовнішнього), або іншого техногенного насипу (складу мінеральної сировини, чернозему, шламосховища тощо).

Для території під загрозою необхідно довести до широкої спільноти, що безпека вже існує реально. Якщо це не вдається, можна вжити заходів для зниження ризику травмування нижче граничного ризику. Ці дії відрізняються технологічними заходами, які зменшують ймовірність розрідження гірських порід (наприклад, їх ущільнення), і заходами, які зменшують ймовірність перебування людей там (наприклад, закриття або адаптоване використання).

На основі результатів оцінки ризику щодо розрідження гірських порід на внутрішніх відвалах у Lausitz було сформульовано наступні рекомендації щодо боротьби з потенційними загрозами:

- Використання пухких відвалів, особливо внутрішніх, яке передбачає часте або тривале перебування людей (наприклад, шляхи руху), має відбуватися лише в місцях, де розрідження гірських порід можна значною мірою виключити. За необхідності слід коригувати трасування кар'єрних та поверхневих вантажопотоків, улаштувати надійний дренаж та провести укріплення транспортних уступів і ремонт доріг на їх бермах.

- Якщо території відвалів не можуть бути переплановані з економічних чи екологічних причин, ризик можна зменшити шляхом адаптованого їх використання. Метою має бути обмеження кількості та тривалості перебування людей на відвалах й інших техногенних насипах.

- Необхідно завчасно й активно підвищувати стійкість розріджених гірських порід штучних насипів колишніх рудників (відвалів, шламосховищ, ґрунтових буртів, сміттєзвалищ тощо) такими технологічними операціями, як: віброущільнення, цементація, бітумізація, осушення й іншими.

Бібліографія.

1. Бизов В.Ф., Дриженко А.Ю. Відкриті гірничі роботи. Т. XIII «Виробничі процеси» : підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». - Кривий Ріг: Мінерал. 2004. - 341 с.
2. Бейдик О. Визначні родовища корисних копалин у таблиці Д. І. Менделєєва: світовий вимір // Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка ISSN 1728-3817. Географія. 1(74)/2019. – С. 13-17.
3. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. - Т. 1 : А - К. - 640 с. - ISBN 966-7804-14-3.
4. Білецький В.С., Гайко Г.І. Хронологія гірництва в країнах світу. – Донецьк: Донецьке відділення НТШ. «Редакція гірничої енциклопедії», УКЦентр, 2006. - 224 с.
5. Гаврилюк В.С. Північна Америка. Фізико-географічна характеристика. – К.: Вища шк., 1971.
6. Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. — Д. : Східний видавничий дім, 2004. — Т. 3. — 752 с.
7. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів / Гошовський С.В., Рудько Г.І., Преснер Б.М. – К., ЗАТ «НІЧЛАВА», 2002. - 624 с.
8. Бакка М.Т., Гуменик І.Л., Редчиць В.С.. Екологія гірничого виробництва: Навчальний посібник. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 307 с.
9. Металічні і неметалічні та корисні копалини України / Д.С. Гурський, К.Ю. Єсипчук, В.І. Калінін та ін.: у 2 кн. К.; Львів: Центр Європи, 2006. – Т. 1 : Металічні корисні копалини. – 785 с. ; Т. 2 : Неметалічні корисні копалини. – 552 с.
10. Природно-ресурсна сфера України: проблеми сталого розвитку та трансформацій / Під загальною редакцією чл.-кор. НАН України Б.М. Данилишина. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА». 2006. – 704 с.
11. Drebenstedt, C. ; Kuyumcu, M. (Hrsg.): Braunkohlesanierung: Grundlagen, Geotechnik, Wasserwirtschaft, Brachflächen, Rekultivierung, Vermarktung. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2014 — ISBN 978-3-642-16353-1
12. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH: lmbv.de. URL lmbv.de. - abgerufen am 2018-01-04
13. Lausitz Energie Bergbau AG: leag.de. URL leag.de. - abgerufen am 2019-01-04
14. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH ; TU Bergakademie Freiberg ; Universität Fridericiana in Karlsruhe: Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen (Grünes Heft). Senftenberg, 1998.
15. Förster, Wolfgang ; Gockel, Gert: Sanierung in den Bergbaugebieten Ostdeutschlands: dargestellt am Beispiel der Niederlausitz. In: Zeitschrift für Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg Bd. 15 (2008), S. 14-22.
16. Weißbach, Jörg ; Kudla, Wolfram: Auswertung und Erkenntnisse bei den bisherigen Schadensfällen auf Grund von Verflüssigung bei Innenkippen in der Lausitz. In: Kudla, W. (Hrsg.): Beiträge zum Fachkolloquium 4:

Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus: Im Rahmen des Freiburger Forschungsforums - 63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau. Bd. 3, 2012, S. 25-39.

17.LMBV mbH (Hrsg.): Wandlungen und Perspektiven: Schlabendorf. Senftenberg, 2012.

18.Kudla, Wolfram ; Arendt, Jennifer ; Kreßner, Jan ; Rosenzweig, Tino ; Szczyrba, Sebastian ; Weißbach, Jörg: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen (Abschlussbericht). Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 28.04.2017.

19.Weißbach Jörg. Risikobeurteilung von Bodenverflüssigungsereignissen auf Innenkippen des Lausitzer Braunkohlereviere: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur Dr.-Ing. – Freiberg: Technischen Universität Bergakademie Freiberg. 2020. – 359 Seit.

20.Kudla, Wolfram ; Weißbach, Jörg: Ergänzende wissenschaftlich-technische Untersuchungen zur Verflüssigungsproblematik an Lausitzer Innenkippen -Risikobetrachtung zu Bodenverflüssigungsereignissen auf Lausitzer Innenkippenflächen. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 21.12.2018.

21.Kudla, Wolfram ; Weißbach, Jörg: Entwicklung eines komplexen seismischen, hydraulischen und geotechnischen Monitoringsystems zur Früherkennung der Bodenverflüssigungsgefährdung am Beispiel von Innenkippen des Lausitzer Reviers (SHGM) - Zwischenbericht 2/2018 zur Teilaufgabe A1-5 „Bereitstellung und Auswertung markscheiderischer Daten“. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 17.05.2019.

22.Klose, Martin: Landslide databases as tools for integrated assessment of landslide risk. Vechta, Universität Vechta, Dissertation, 2014.

23.Ruff, Michael: GIS-gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich). Karlsruhe, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Dissertation, 2005.

24.Vogt, A. ; Förster, W. ; Warmbold, U.: Sachstandsbericht zum „Setzungsfließen" (Unveröffentlichter Bericht). Senftenberg, Dresden, 03.05.1992.

25.Cramer, Bernhard ; Voigt, Christof ; Freytag, Klaus: Bodenverflüssigung aus Sicht der Bergbehörden - Nachweis der Erforderlichkeit und Geeignetheit von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und Anforderungen bei der Entlassung aus der Bergaufsicht. In: Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus im Rahmen des Freiburger Forschungsforums - 63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 3. Freiberg, 2012.

26. Bundesinstitut für Risikobewertung: „Risiko" oder „Gefahr"? Experten trennen nicht einheitlich - BfR. URL. https://www.bfr.bund.de/de/presseinformation/2010/04/_risiko_oder_gefahr_experten_trennen_nicht_einheitlich-48560.html. - abgerufen am 2019-01 -17.

27.ISO/IEC: ISO/IEC Guide 51:2014(E) Safety aspects -- Guidelines for their inclusion in standards.

28.Proske, Dirk: Katalog der Risiken: Risiken und Ihre Darstellung. 1. Aufl. Dresden : Proske, 2004 — ISBN 978-3-00-014396-0.

- 29.Bründl, Michael (Hrsg.): Risikokonzept für Naturgefahren - Leitfaden. Bern : Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, 2009.
- 30.Arbeitskreis 4.6 „Altbergbau" der Fachsektion Ingenieurgeologie der DGGT: Empfehlung „Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung, Bewertung und Sanierung von altbergbaulichen Anlagen". In: 17. Altbergbaukolloquium, 16. bis 18. November 2017, TU Bergakademie Freiberg, 201 7 - ISBN 978-3-938390-20-7.
- 31.Proske, Dirk: Catalogue of Risks: Natural, Technical, Social and Health Risks. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 — ISBN 978-3-540-79555-1.
- 32.Cottin, Claudia ; Döhler, Sebastian: Risikoanalyse: Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen, Studienbücher Wirtschaftsmathematik. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Spektrum, 2013.
- 33.Lee, E. Mark ; Jones, David K. C.: Landslide risk assessment. Second edition. London : ICE Publishing, 2014 — ISBN 978-0-7277-5801-9.
- 34.Meyer, Thierry ; Reniers, Genserik L. L.: Engineering risk management. 2nd edition. Berlin ; Boston : De Gruyter, 2016 — ISBN 978-3-11 -041803-3.
- 35.Sieber, Hans-Ulrich: Was bringt die neue DIN 19700 für die Sicherheitsbewertung von Stauanlagen? In: WASSERWIRTSCHAFT (2005), Nr. 1-2, S. 25.
- 36.Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (Hrsg.): Hochwasservorsorge in Deutschland: Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet, Schriftenreihe des DKKV. Bonn : Dt. Komitee für Katastrophenvorsorge e.V, 2003 — ISBN 978-3-9331 81 -32-9.
- 37.Klingmüller, Oswald ; Bourgund, Ulrich: Sicherheit und Risiko im konstruktiven Ingenieurbau. Braunschweig : Vieweg, 1992 — ISBN 978-3-528-08835-4.
- 38.Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.): Schadensanalysen und Projektbewertung im Hochwasserrisikomanagement, DWA-Themen. Hennef (Sieg) : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2012 — ISBN 978-3-942964-44-9.
- 39.Witt, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Grundbau-Taschenbuch: Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 8. Auflage. Berlin : Ernst & Sohn, a Wiley brand, 2017 — ISBN 978-3-433-60724-4.
- 40.Schuppener, Bernd ; Weißenbach, Anton: Zuverlässigkeit und Sicherheit bei der Bemessung in der Geotechnik. In: Bautechnik Bd. 89 (2012), Nr. 9, S. 629-639.
- 41.Müller, H. S. ; Nolting, U. ; Haist, M. (Hrsg.): Innovationen in der Betonbautechnik. 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 15.03.2006.
- 42.Proske, Dirk: Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit und der Versagenshäufigkeit von Brücken. In: Bautechnik Bd. 94 (201 7), Nr. 7, S. 419-429.
- 43.Proske, Dirk: Bridge collapse frequencies versus failure probabilities. New York, NY : Springer Berlin Heidelberg, 201 8 — ISBN 978-3-319-73832-1.

44. Robertson, Peter K. ; Fear, Catherine E.: Liquefaction of sands and its evaluation. In: Ishihara, K. (Hrsg.): Earthquake Geotechnical Engineering: Proceedings of IS-Tokyo'95 -The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Bd. 3. Rotterdam Brookfield : A.A. Balkema, 1 997 — ISBN 90 5410 581 X, S. 1253-1289.

45. Glasenapp, Ralf: Das Verhalten von Sand unter zyklischer irregulärer Belastung. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2016.

46. Buchheister, Juliane: Verflüssigungspotenzial sandiger und siltiger Böden unter multiaxialer Belastung : Vdf Hochschulverlag AG, 01.01.2012 — ISBN 978-3-7281 -3305-2.

47. Terzaghi, Karl ; Peck, Ralph B.: Soil Mechanics in Engineering Praxis. 6. Auflage. New York, London : John Wiley & Sons, 1948.

48. Förster, Wolfgang: Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine. Stuttgart, Leipzig : Teubner, 1996 — ISBN 3-8154-5000-4.

49. TU Bergakademie Freiberg: Beurteilung der Setzungsfließgefahr an Kippenböschungen („Rosa Heft“). Freiberg, 1988.

50. KTA: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen - Teil 2: Baugrund (Nr. KTA 2201.2). Salzgitter, 11.2012.

51. Keßler, Jürgen ; Dennhardt, Michael ; Zschiedrich, Klaus ; Scholz, Eckhard: Handlungsgrundlage zur komplexen Bewertung der Innenkippenflächen der LMBV in der Lausitz 1. Fortschreibung (Unveröffentlichter Bericht). Senftenberg, 10.2016.

52. Kudla, Wolfram ; Szczyrba, Sebastian ; Weißbach, Jörg: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen: Handlungsgrundlage zur Beurteilung der Gefährdung von flachwelligen Kippenbereichen durch Setzungsfließen und Geländeeinbrüche im bergrechtlichen Verantwortungsbereich der VEM AG. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 20.09.2016.

53. Jefferies, Mike ; Been, Ken: Soil liquefaction: A critical state approach. London ; New York : Taylor & Francis, 2006 — ISBN 978-0-203-30196-8.

54. Dierichs, Dieter: Untersuchungen zum Verhalten locker gelagerter wassergesättigter Sande als Basis für die Bewertung der Standsicherheit von Kippenböschungen, Freiburger Forschungshefte Bergbau und Geotechnik. Bd. A758 Bergbau und Geotechnik. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 01.01.1988 — ISBN 3-342-00834-2.

55. Schreyer, Antje: Kennzahlen aus statischen Triaxialversuchen und deren Verwendung: Teil I - Allgemeines, Technologie, Setzung, Sackung (Vortrag). Schwarze Pumpe : GMB GmbH, 23.06.2010.

56. Ishihara, K.: Liquefaction and flow failure during earthquakes. In: Geotechnique Bd. 43 (1993), Nr. 3, S. 351-451.

57. Diener, Uta: Sackungen von Kippen - Modellversuche und statistisch gestützte Betrachtungen. Freiberg, Dissertation, 01.01.1999.

58. Zehe, Steven: Setzung, Sackung, Senkung - Abgrenzungen und Berechnungsmethoden. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Studienarbeit, 09.2011.

59. Rosenzweig, Tino: Untersuchungen zu Sackungen bei der Infiltration von Wasser auf Oberflächen von Innenkippen, Schriftenreihe Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 7. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2017.

60. Casagrande, Arthur: Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review, Harvard soil mechanics series. Bd. 88. Cambridge, Massachusetts : Pierce Hall, 1976.

61. Köhler, Hans-Jürgen: Ursachen der Bodenverflüssigung in nahezu gesättigten Böden an Gewässerberandungen. In: Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus im Rahmen des Freiburger Forschungsforums -63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 3. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2012.

62. Gudehus, Gerd: Mechanisms of partly flooded loose sand deposits. In: Acta Geotechnica Bd. 11 (2016), Nr. 3, S. 505-517.

63. LMBV mbH: Flächenhafter Nachweis der Verdichtung stabilisierter Kippen und Kippenböschungen: Abschlussbericht der wissenschaftlich-technischen Untersuchung - Teil A (Abschlussbericht). Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2002.

64. Montenegro, Hector ; Stelzer, Oliver: Untersuchungen des Einflusses von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels auf Druckausbreitung und Bodenverformung mittels gekoppelter FE-Berechnungen. In: Ohde-Kolloquium 2014 - Aktuelle Themen der Geotechnik, Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden, Hrsg.: Ivo Herle. Bd. 19. Dresden, 2014.

65. Gudehus, Gerd ; Keßler, Jürgen ; Lucke, Beate: Setzungsfließen. In: geotechnik Bd. 38 (2015), Nr. 4, S. 255-266.

66. Gudehus, G.: Zur Stabilität Lausitzer Kippen: Jahresendbericht 2012 an die LMBV (Unveröffentlichter Bericht). Karlsruhe, 30.11.2012.

67. Schreyer, A.: Teil 1:: Auswertung von Verschiebungsmessungen auf Tagebaukippen. In: Förster, W.: Senkungsprognose für Kippen des Braunkohlebergbaues: Abschlußbericht. unveröffentlicht, 1996.

68. Reichel, Gunter: Einfluss des Sackungs- und Verflüssigungsverhaltens Lausitzer Kippensande auf die Größe des zum Auslösen einer Verflüssigung erforderlichen Initials. In: Beiträge zum 2. Kolloquium Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus, Schriftenreihe der Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 5 : TU Bergakademie Freiberg, 2014.

69. Schreyer, Antje ; Reichel, Gunter: Restfestigkeit erdfeucht verstützter Kippenböden, Geotechnisches Symposium „Standesicherheit von Kippen des Braunkohlenbergbaus" (Vortrag). Cottbus, 22.03.2013.

70. Förster, W. ; Walde, M. ; Möckel, W.: Setzungsfließen, dargestellt an einem Schadensfall. In: Bauplanung - Bautechnik Bd. 39 (1985), Nr. 2, S. 83-85.

71. Terzaghi, Karl: Erdbaumechnik auf bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig und Wien : Franz Deuticke, 1925.

72. Matschak, Hans: Das Auftreten von Setzungsfließen in Sandkippen von Niederlausitzer Tagebauen. In: Bergbautechnik. Techn.-wiss. Zeitschr. für d.

Kohlen-, Erz- u. Salzbergbau, für Aufbereitung u. Brikettierung Bd. 6 (1956), Nr. 5, S. 244-253.

73. Wittig, Manfred ; Boettge, Vera ; Wiesner, Philipp: Einschätzung der Standsicherheit von Innenkippenflächen von Tagebauen nach deren Verflüssigung (Vortrag). Freiberg : 11. Freiburger Geotechnik Kolloquium - 69. BHT 2018, 07.06.2018.

74. Wittig, Manfred: Schockwellen und Verflüssigung - ein Modell der Verfestigung von Tagebaukippen nach der Verflüssigung. In: 9. Freiburger Geotechnik-Kolloquium 2016 und THMC-Kolloquium 2016 Herausgeber: Nandor Tamaskovics, Freiburger Forschungshefte. Bd. C 551 Geotechnikwesen. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2017.

75. Rahmig, Michael: Das Verhalten verflüssigungsfähiger Lockergesteine als Funktion der Porenzahl und der Größe der dynamischen Anregung. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Diplomarbeit, 20.08.2015.

76. Gehrish, Manfred ; Kendziora, Peter ; Mukrasch, Otto ; Pavelka, Franz ; Stein, Ulrich ; Vogt, Alfred ; Warmbold, Ulrich ; Wilke, Dieter ; u. a.: Bodenmechanik und Tagebausicherheit im Braunkohlenbergbau der Lausitz, Beiträge zur Geschichte des Bergbaus in der Niederlausitz. 2. Auflage. Cottbus : Förderverein Kulturlandschaft Niederlausitz e.V., 2005 — ISBN 3-9808035-3-8.

77. Gudehus, Gerd: Untersuchung und Sicherung setzungsfließgefährdeter Kippen (Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen zur Anwendung). Karlsruhe : Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, 1993.

78. Keßler, Jürgen ; Förster, Wolfgang: Sprengverdichtung zur Verbesserung von setzungsfließgefährdeten Klippen, Freiburger Forschungshefte Bergbau und Geotechnik. Bd. A819 Bergbau und Geotechnik Bodenmechanik. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992 — ISBN 3-342-00481-9.

79. Kudla, Wolfram ; Rosenzweig, Tino: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen: Bericht zum AP 3 - Technikums-, Feld- und Laborversuche, Teil 2: Technikumsversuche. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 30.06.2016.

80. Muehe, Lutz ; Förster, Wolfgang: Sanierung und Sicherung setzungsfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen: TP1: Untersuchungen zur Eignung von Verdichtungsverfahren (Tiefenrüttler, Dynamische Intensivverdichtung) zur Sanierung setzungsfließgefährdeter Kippen aus kohäsionslosen Lockergesteinen (Abschlussbericht). Freiberg : Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, 1998.

81. Gudehus, G. ; Augustin, S. ; Bössinger, E. ; Cudmani, R. ; Huber, G. ; Karcher, Ch ; Loukachev, J. ; Pralle, N. ; u. a.: Sanierung und Sicherung setzungsfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen: TP6.1: In-situ-Untersuchungen an Verdichtungssprengungen in locker gelagerten rolligen Böden zur Verifizierung theoretischer Modelle und zur Übertragung der Ergebnisse von Modellversuchen. Karlsruhe, Abschlussbericht, 1998.

82. Reinhardt, Kai ; Sommer, Benedikt ; Keßler, Jürgen ; Schicht, Thomas ; Thoma, Holger ; Vollmer, N. ; Völkel, J. ; Mittag, Reinhard ; u. a.: Abschlussbericht und geotechnische Bewertung der erreichten Untergrundverbesserung -

Großversuche zur Schonenden Sprengverdichtung auf der Innenkippe Seese-West (Abschlussbericht). Freiberg, Sondershausen : BIUG GmbH, K-UTEC AG, 02.2014.

83.LMBV mbH ; Breier, Siegfried: Sicherheit nach dem Bergbau - Verdichtung von Kippenböden (2018).

84.Nigang, Louis Roger: Die Wirkung von Elementen zur Dämpfung und Entspannung des Porenwasserdruckes in wassergesättigten verflüssigungsgefährdeten Lockergesteinsschüttungen. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 27.01.2000.

85.Kudla, Wolfram ; Szczyrba, Sebastian: Wissenschaftlich-technische Untersuchungen auf Kippenflächen: Felduntersuchungen zur Bodenverflüssigung - Feldversuche zum Porenwasser- und Gasdruckabbau durch Kunststoffdräns (Schlussbericht). Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 29.04.2014.

86.Friedrich, Steffen: Flächendeckende Ermittlung bodenphysikalischer Parameter aus Drucksondiererergebnissen mittels Korrelationen zu Ergebnissen radiometrischer Sondierungen. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 03.02.2005.

87.LMBV mbH: Flächenhafter Nachweis der Verdichtung stabilisierter Kippen und Kippenböschungen: Abschlussbericht der wissenschaftlich-technischen Untersuchung - Teil B (Abschlussbericht). Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2002.

88.Bahrt, W. (Hrsg.): Die geologische Entwicklung der Lausitz. Cottbus : Vattenfall Europe Mining, 2010 — ISBN 978-3-00-033274-6.

89.Köbbel, W. ; Schossig, W. ; Förderverein Kulturlandschaft Niederlausitz (Hrsg.): Bergbau in der Niederlausitz, Beiträge zur Geschichte des Bergbaus in der Niederlausitz. 3., erw.überarb. Aufl. Cottbus : Förderverein Kulturlandschaft Niederlausitz, 2007. — ISBN 978-3-9811412-1-4.

90.Schroeder, J. H. ; Nowel, W. ; Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V (Hrsg.): Lübbenau - Calau, Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg. 1. Aufl. Berlin, 1995 — ISBN 978-3-928651-04-2.

91.CDM Smith: Bericht über die geologisch-bodenphysikalischen Untersuchungen der Seeser Sande im Tertiär der Lausitz. Berlin, 08.07.2019.

92.Kudla, Wolfram ; Weißbach, Jörg: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen: Bericht zum AP 9 - Auswertung von morphologischen und hydrologischen Daten von Kippen nach dem Grundwasserwiederanstieg, bei denen keine Schadensfälle aufgetreten sind. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 18.12.2015.

93.Nowel, Werner ; Bönisch, Rudolf ; Schneider, Wilfried ; Schulze, Horst: Geologie des Lausitzer Braunkohlereviers. Senftenberg : LAUBAG, 1994.

94.Stoll, R. D. ; Niemann-Delius, C. ; Drebenstedt, C. ; Müllensiefen, K. (Hrsg.): Der Braunkohlentagebau: Bedeutung, Planung, Betrieb, Technik, Umwelt. 1. Aufl. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2009 — ISBN 978-3-540-78400-5.

95.Ring Deutscher Bergingenieure, Bezirksverein Lausitzer Braunkohle (Hrsg.): Die Lausitz und ihre Abraumförderbrücken. Knappenrode, 2006.

96.Fischer, Karoline ; Bönisch, Rudolf: Geologische Übersicht des Raumes Schlabendorf/Seese (Vortrag). Senftenberg, 01.03.2016.

97. Beak Consultants GmbH ; TU Bergakademie Freiberg: Aufbau eines integrierten Kippensicherheits- und Bewertungssystems (Abschlussbericht). Freiberg, 07.02.2014.

98. Drebenstedt, Carsten: Bedeutung des Kippenmodells für geomechanische Prognosen -Einfluss der Tagebautechnologie, Geotechnisches Symposium Standsicherheit von Kippen des Braunkohlenbergbaus (Vortrag). Cottbus, 22.03.2013.

99. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH: Braunkohlenbergbau und Sanierung im Förderraum Kittlitz. Brieske, 2003.

100. Steinhuber, Uwe: Einhundert Jahre bergbauliche Rekultivierung in der Lausitz: Ein historischer Abriss der Rekultivierung, Wiederurbarmachung und Sanierung im Lausitzer Braunkohlenrevier. Olomouc, Palacky-Universität Olomouc, Dissertation, 2005.

101. StuBA Bund-Länder-Geschäftsstelle für die Braunkohlesanierung: braunkohlesanierung.de. URL braunkohlesanierung.de. - abgerufen am 2019-03-09.

102. LMBV mbH: Sanierungsbericht 2017. Senftenberg, 20.04.2018.

103. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg: Richtlinie des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg Geotechnische Sicherheit (GeSi), 01.07.2014.

104. Sächsisches Oberbergamt: Verordnung des Sächsischen Oberbergamtes über die der Bergaufsicht unterliegenden Betriebe, Tätigkeiten und Einrichtungen (Sächsische Bergverordnung - SächsBergVO), 16.07.2009.

105. Förster, Wolfgang: Bodenmechanik. Stuttgart : Teubner, 1998 — ISBN 3-519-00228-0.

106. Kolymbas, Dimitrios: Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019 — ISBN 978-3-662-58471-2.

107. Kudla, Wolfram: Gedanken zur Diskussion im Arbeitskreis Forschung und Entwicklung zur Bodenverflüssigung: Was ist ein hinreichender Nachweis zum Ausschluss einer Bodenverflüssigung? (unveröffentlichtes Papier). Dresden, 27.12.2012.

108. Götz, Matthias: Erdstatische Stabilitätsbetrachtungen gegenüber verflüssigungsangeregten Bodenbewegungen. In: Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus im Rahmen des Freiburger Forschungsforums - 63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 3. Freiberg, 2012.

109. Tamaskovics, Nandor: Rechnerische Stabilitätsnachweise für verflüssigungsgefährdete Altkippen des Braunkohlenbergbaus. In: 13. Altbergbaukolloquium. Freiberg, 2013.

110. Schanz, Tom: Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik: Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 4. In: Geotechnik Bd. 29 (2006), Nr. 1, S. 13-27.

111. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik: EANG. Berlin : Ernst, 2014 — ISBN 978-3-433-60451-9.

112. Kudla, Wolfram ; Szczyrba, Sebastian ; Rosenzweig, Tino ; Kreßner, Jan: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen - Bericht zum AP 4.1 und AP 5, Teil 3: FE-Berechnungen zum Spannungszustand und Rückrechnungen zu Schadensfällen. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 19.12.2016.

113. Savidis, Stavros ; Henke, Sascha: Bodendynamische Untersuchungen zur Typologie von Lockergesteinsrutschungen bei Altbergbaukippen. In: Beiträge zum 2. Kolloquium Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus, Schriftenreihe der Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 5 : TU Bergakademie Freiberg, 2014.

114. von Wolffersdorff, Peter-Andreas ; Henke, Sascha: Bemessen mit numerischen Methoden in der Geotechnik - Möglichkeiten und Grenzen. In: Beiträge der Baugrundtagung 2016 in Bielefeld : Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) (Hrsg.), 2016, S. 305-312.

115. Tamaskovics, Nandor: Standsicherheitsuntersuchungen für verflüssigungsgefährdete Standorte nach der Theorie zweiter Ordnung mithilfe von Phi-C-Reduktion. In: Kudla, W. (Hrsg.): Beiträge zum 2. Kolloquium Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus, Schriftenreihe der Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 5. Freiberg, 2014, S. 351-368.

116. Raju, Vegesna R.: Spontane Verflüssigung lockerer granularer Körper: Phänomene, Ursachen, Vermeidung. Karlsruhe, Universität Fridericiana Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Dissertation, 1994.

117. Kudella, Peter: Stabilitätsberechnung von setzungsfließgefährdeten Kippenrandböschungen. In: Geotechnik Bd. 19 (1995), Nr. 1, S. 7-14.

118. von Wolffersdorff, Peter-Andreas ; Meier, Thomas ; Tamaskovics, Nandor: Neuartiger Standsicherheitsnachweis für verflüssigungsgefährdete Kippen (Vortrag). Würzburg, 2017.

119. Keßler, Jürgen ; Dennhardt, Michael ; Zschiedrich, Klaus ; Scholz, Eckhard: Handlungsgrundlage zur komplexen Bewertung der Innenkippenflächen der LMBV in der Lausitz (Unveröffentlichter Bericht). Senftenberg, 01.2015.

120. Förster, Wolfgang ; Dennhardt, Michael ; Reichel, Gunter: Erste Ergebnisse für die Bewertung von Kippen mit Gefährdungsfaktoren. In: Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus im Rahmen des Freiburger Forschungsforums - 63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau, Hrsg.: Wolfram Kudla. Bd. 3. Freiberg, 2012.

121. Vattenfall Europe Information Services GmbH: Anwenderhandbuch: Berechnung Gefährdungsfaktoren Innenkippe : Cottbus, 24.05.2013.

122. Kudla, Wolfram ; Weißbach, Jörg: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen: Zwischenbericht zum AP 10 Untersuchungen zu den Gefährdungsfaktoren. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 16.08.2014.

123. Grosser, Regine ; Meinig, Hans-Jörg ; Fincke, Matthias: Auswertung von Standsicherheitsberechnungen für die Planung von Geländeerhebungen auf

Kippen, Geotechnisches Symposium „Standsicherheit von Kippen des Braunkohlenbergbaus" (Vortrag). Cottbus, 22.03.2013.

124. Vattenfall Europe Mining AG: Programm zur Auswertung flachwelliger Kippenbereiche.

125. Wittig, Manfred: Geokinematische Abläufe bei der Verflüssigung von Tagebaukippen. In: 18. Geokinematischer Tag. Freiberg, 2017.

126. Szczyrba, Sebastian ; Friedrich, Steffen: Ergänzende Untersuchungen zur Handlungsgrundlage (Bodenmechanisches Gutachten). Freiberg : IGF Ingenieurbüro für Geotechnik Dr.-Ing. Friedrich, 21.02.2019.

127. Takahashi, Tamotsu: Debris flow: mechanics, prediction, and countermeasures. 2nd edition. Boca Raton : CRC Press, 2014 — ISBN 978-1-138-00007-0.

128. Jakob, Matthias ; Hungr, O.: Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin ; New York : Springer, 2005 — ISBN 978-3-540-20726-9.

129. Fell, R. ; Hungr, O. ; Leroueil, S. ; Riemer, W.: Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, cuts and fills in soil (Lecture). Melbourne, 2000.

130. Dai, Zili ; Huang, Yu: The State of the Art of SPH Modelling for Flow-slide Propagation. In: Scaioni, M. (Hrsg.): Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015 — ISBN 978-3-662-45930-0, S. 155-164.

131. Braun, A. ; Cuomo, S. ; Wang, X. ; Petrosino, S. ; Zhang, L.: Baishuihe Hangrutschung in Südwest China - Fallstudie und numerische Modellierung mit SHP (Vortrag). Würzburg, 08.09.2017.