

MARIAN GŁAŻEWSKI¹⁾

BADANIA PROCESÓW EROZJI WODNEJ SKARP BUDOWLI ZIEMNYCH

STRESZCZENIE. Skarpa (zbocze) jest elementem konstrukcyjnym budowli ziemnej. Najskuteczniejszym sposobem stabilizacji wierzchniej warstwy skarpy gruntowej jest umocnienie biologiczne za pomocą roślinności darniotwórczej (trawy ,motylkowate drobnonasienne). Porost (ruń) przejmuje funkcje skutecznej ochrony przeciwoerozyjnej oraz odporności na mróz w trzecim rozwiniętym listku siewek traw tj. od 40 dni (skarpa o wystawie północnej) do 60 dni (skarpa o wystawie południowej). Hydroobsiew daje tymczasowe zabezpieczenie przeciwoerozyjne od chwili naniesienia hydromieszanki (hydromulczu) na powierzchnię skarpy. Artykuł stanowi omówienie rozprawy doktorskiej [1], której celem było zbadanie i ocena wpływu różnych czynników (nachylenia skarpy, intensywności opadów i fizyko-chemicznych właściwości gruntów: naturalnego - piasek średni oraz antropogenicznego - popioły lotne) na poziom zmywu erozyjnego dla niepokrytych i pokrytych powierzchni skarpy.

1. WSTĘP

Budowa obwodnic, autostrad oraz modernizacja dróg szybkiego ruchu [2 – 3] pociąga za sobą drastyczną ingerencję w środowisko naturalne. Skarpy ciągnące się wzdłuż tych ziemnych liniowych obiektów komunikacyjnych stanowią również duży problem – muszą być biologicznie umocnione, obsiane roślinnością trawiastą, motylkowatymi drobnonasiennymi oraz utrzymywane w odpowiednim stanie. To właśnie spowodowało, że Amerykanie od 50 lat – czyli od rozpoczęcia budowy autostrad – interesowali się tym problemem i wymyślili mulczowanie oraz hydromulczowanie, a następnie hydroobsiew. Dziś przy budowie dróg, i nie tylko, stosuje się metody z użyciem

¹⁾ dr inż. – Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa

wodnych roztworów koloidalnych prawie na całym świecie. Polacy dopiero zaczęli kilka lat temu, a biorąc pod uwagę program budowy obwodnic i autostrad, nadeszła odpowiednia pora na wprowadzanie tych metod na dużą skalę.

Słowo skarpa [4] oznacza w technice powierzchnię o znacznym pochyleniu, która łączy dwie płaszczyzny poziome lub zbliżone do poziomu, leżące na różnych wysokościach. Skarpa w podanym znaczeniu zastępuje mury oporowe i wykonuje taką samą pracę. Skarpy zabezpieczają nasypy i wykopy, umacniają rowy melioracyjne oraz koryta uregulowanych rzek.

Skarpa stanowi element konstrukcyjny budowli ziemnych. Umocnienie może być biologiczne (zbliżone do naturalnego użytkowania terenu), bądź techniczne (sztuczne). Jako umocnienie biologiczne najczęściej stosowana jest darń wzmocniona niekiedy krzewami, a nawet drzewami. Przez pojęcie skarpa należy rozumieć nie tylko pochylone powierzchnie ośrodka gruntowego, lecz również przyległe pasy poziome („browki”) o odpowiedniej (wymaganej) szerokości na koronie i u podnóża.

W trakcie wykonywania liniowych budowli ziemnych zdejmuje się całą warstwę darniowo-glebową [5], co powoduje, że odsłonięte grunty, zwłaszcza na pochyłościach podlegają intensywnej wodnej i wietrznej erozji będących wynikiem wpływu warunków atmosferycznych.

Pokrycie roślinnością [6 – 7] skarp nasypów lub wykopów napotyka na znaczne trudności. Nie mamy bowiem do czynienia z glebą i często wprowadzana roślinność musi odgrywać pionierską rolę w procesie glebotwórczym. Pochylenie sprawia, że nakładana warstwa ziemi urodzajnej – zabieg niezbędny do uzyskania polepszenia warunków siedliskowych – ma tendencję do zsuwania się, podobnie jak wysiewane nawozy mineralne czy nasiona. Stąd też diametralnie różne warunki bytowe przy koronie i u podnóża skarpy. Przy koronie, gdzie jest najbardziej sucho, roślinność jest szczególnie narażona na działanie wiatru, a system korzeniowy często ulega obnażaniu z gleby (ziemi urodzajnej). W zimie wiatry często zwiewają pokrywą śnieżną w tych partiach skarpy przyczyniając się do przemarzania i osłabiania roślin. U podnóża skarpy gromadzi się ziemia urodzajna, warstwa próchnicza ma większą miąższość, stąd też tworząca się gleba ma większe możliwości gromadzenia zapasu wody, więc i roślinność znajduje niezłe warunki bytowania oraz rozwoju. Również duże zróżnicowanie warunków siedliskowych może występować w wykopach, gdzie na większości powierzchni skarp mamy do czynienia tylko ze skałą macierzystą (gruntem płonnym), która może charakteryzować się bardzo różnymi warunkami jeśli chodzi o naturalną żyzność (troficzność), jak i stosunki wodne.

Zagadnienie stateczności, prawidłowego utrzymania i estetyki skarp wszelkich budowli ziemnych [8], składowisk odpadów przemysłowych a także zboczy i stoków naturalnych jest trudnym problemem do rozwiązania. Wykonawstwo robót w głównej mierze koncentruje się wokół podstawowego zagadnienia np. wybudowanie drogi, wału przeciwpowodziowego, ziemnego muru oporowego, a najmniej zaangażowania uwidacznia się przy pracach uznanych za mniej ważne, zwłaszcza przy formowaniu i biologicznej obudowie skarp.

Budowle ziemne, w tym skarpy drogowe, są narażone na erozję powierzchniową [9] w trakcie ich budowy (formowania) oraz późniejszego eksploataowania. Usuwanie skutków erozji pochłania do 20% kosztów robót ziemnych [10]. Dlatego istotne jest, aby chronić powierzchnie skarp (zboczy) przed działaniem czynników denudacyjnych. Skarpa (zbocze) musi mieć umocnienie techniczno-biologiczne wraz z osiągnięciem korony robót ziemnych, zwłaszcza przy wznoszeniu liniowych drogowych nasypów budowlanych [11].

2. OPIS WARUNKÓW I CHARAKTERYSTYKA EKSPERYMENTU BADAWCZEGO

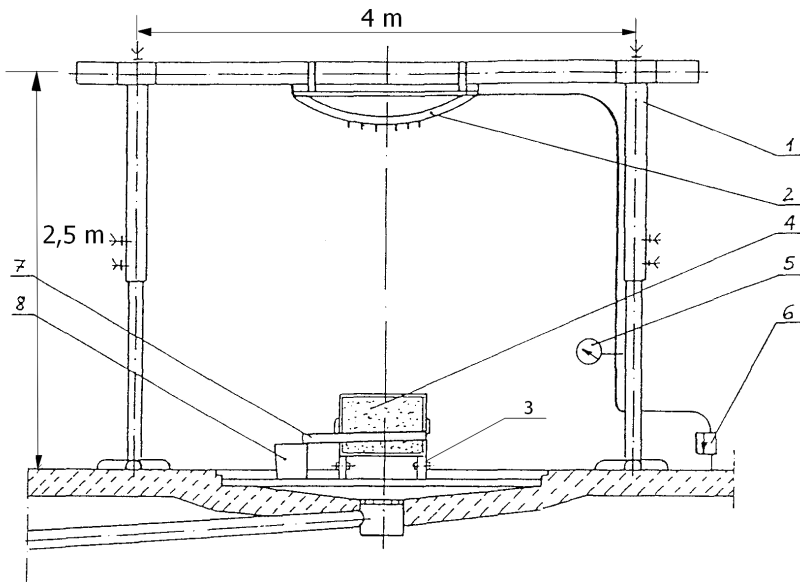
Celem eksperymentu [1] było zbadanie i ocena wpływu różnych czynników (atmosferycznych oraz właściwości gruntów) na poziom zmywu (erozji wodnej), mierzonej ilością masy zmywu stałych cząstek zerodowanego materiału oraz przepuszczalności gruntu, wyrażonej prędkością filtracji wody.

Następnie badano wpływ właściwości fizycznych różnych powłok (warstw) ochronnych, sporządzonych z hydromieszanin (hydromulczu) pokrywających powierzchnię wybranych gruntów nasypowych, na poziom zmywu.

Przeciwoerozyjna powłoka ochronna jest warstwą hydromieszaniny nanoszoną metodą hydromechaniczną na pochyłą powierzchnię gruntów utworów antropogenicznych. Miąższość tej warstwy zależy od właściwości fizyko-chemicznych głównego składnika hydromieszaniny. Zadaniem hydromieszaniny, z której, po naniesieniu jej na powierzchnię gruntu, tworzy się przeciwoerozyjna powłoka ochronna, jest zaotczkowanie, a następnie utrzymanie na odpowiedniej głębokości nasion w niej zawartych, dostarczenie im pokarmu do czasu ich wykiełkowania i wzrostu siewek, kiedy to funkcje przeciwoerozyjne przejmą zasiane rośliny. Użyto tu tych samych gruntów (piasku średniego i popiołów lotnych), które poddano badaniom podatności na erozję wodną przy ich nieosłoniętej powierzchni.

Próbki gruntu w specjalnie przygotowanych pojemnikach (pedonach) nachylonych pod kątami 14-45°, poddano symulowanemu opadowi deszczu o intensywnościach $I_o = 67,0$ mm/h, $I_o = 87,5$ mm/h i $I_o = 114,2$ mm/h, co odpowiada poziomom energii kinetycznej opadu $E_k = 385$ J/m², $E_k = 508$ J/m² i $E_k = 669$ J/m² (rys. 1 i 2). Czas trwania opadu wynosił 30 minut. Do badań zmywu erozyjnego z powierzchni gruntów pokrytych hydromieszaninami przyjęto następujące wartości parametrów eksperymentu $I_o = 114,2$ mm/h i $E_k = 669$ J/m², z uwagi na to, że:

- skarpy nasypów budowlanych z utworów antropogenicznych wznoszone z użyciem gruntów nasypowych wybranych do badań, pochylone są na ogół pod kątem 26°-34° (1:2) i (1:1,5); ta górna granica nachylenia nie przekracza wartości kąta tarcia wewnętrznego piasku średniego i popiołów lotnych,
- przy podanej wartości kąta nachylenia skarpy $\alpha = 34^\circ$ (1:1,5) oraz intensywności opadu $I_o = 114,2$ mm/h, uzyskano najwyższy poziom erozji badanych gruntów z odkrytą powierzchnią.



Rys.1. Schemat stanowiska do badań zmywu erozyjnego gruntów:

1 - stojak z regulowaną wysokością, 2 - zraszacz,
 3 - podstawa o regulowanym kącie nachylenia,
 4 - pojemnik (pedon) z gruntem, 5 - manometr, 6 - reduktor, 7 - rynna spustowa,
 8 - pojemnik na spływający roztwór

Fig.1 Scheme of a test stand for research of rainwash from grounds:

1 - stand with adjustable height, 2 - sprinkler, 3 - base with adjustable angle,
 4 - container filled with soil, 5 - manometer, 6 - reducer, 7 - tapping runner,
 8 - container for a flowing solution



Rys.2. Stanowisko do badań zmywu erozyjnego gruntów

Fig.2. Test stand for research of ground rainwash erosion

Są to zatem graniczne wartości liczbowe cech, przy których należy przeprowadzić eksperyment, by zrealizować cel badawczy, tzn. doprowadzić do wyboru warstwy ochronnej najbardziej odpornej na erozję wodną i tym samym zminimalizować poziom tej erozji.

Doświadczenia zmywu przeprowadzono w układzie kompletnej randomizacji (doświadczenia jednoczynnikowe), w pomieszczeniach laboratoryjnych o wyrównanych warunkach temperaturowych, świetlnych i wilgotnościowych. Znaczną część przyjętego programu badań powtórzono na otwartej powierzchni (pod namiotem). Badano wpływ właściwości fizycznych przeciwerozyjnych powłok ochronnych, głównie z osadów ściekowych, pokrywających powierzchnie dwóch wybranych gruntów na poziom erozji oraz przepuszczalność tych gruntów.

Do przeprowadzenia eksperymentu badawczego [12] wybrano najczęściej występujące grunty:

- naturalny – piasek średni z obwałowań pierwszego poziomu stawu osadowego EC Pruszków (w budowie) [13-14],
- antropogeniczny – popioły lotne ze stawów osadowych Elektrociepłowni Żerań [13-14].

3. BADANIA ZMYWÓW EROZYJNYCH NA SKARPACH NIEOSŁONIĘTYCH (NIEPOKRYTYCH HYDROMULCZAMI)

3.1. BADANIA WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA ZMYW EROZYJNY NIEOSŁONIĘTYCH GRUNTÓW NASYPOWYCH

Wybrane grunty nasypowe wbudowywane najczęściej w nasypy budowlane lub formowane w zwały (składowiska), tworzą utwory antropogeniczne. Przy małej przepuszczalności gruntu w stosunku do intensywności opadu następuje zwiększenie zmywu erozyjnego. Przepuszczalność ta zmniejsza się dodatkowo podczas trwania opadu, gdyż oderwane cząstki gruntu zatykają jego pory.

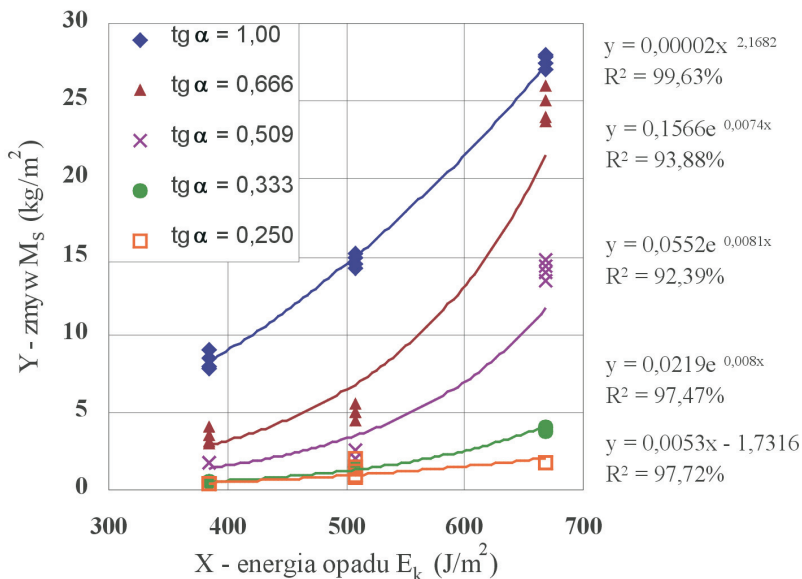
Intensywność opadu, a właściwie wytworzona energia kinetyczna opadu, powoduje rozbryzg, odrywanie, a następnie spływ zmytej mieszaniny wody i gruntu. Znajomość wpływu tych czynników na wielkość zmywu erozyjnego jest niezbędna przy wyborze technologii zabezpieczania utworów antropogenicznych przed szkodliwym działaniem procesów erozyjnych.

Dla określenia i oceny wpływu omawianych czynników na erozję wodną wybranych gruntów nieosłoniętych zastosowano model analizy regresji jednej zmiennej oraz regresji wielorakiej.

PIASEK ŚREDNI

Badania wykazały, że powyżej kąta równego 34° , przy $I_o = 114,20$ mm/h następuje osuwanie się masy gruntu, co kilkakrotnie sprawdzono podczas przygotowywania badań. Powodem jest tutaj najwyraźniej przekroczenie wartości kąta tarcia wewnętrznego badanego piasku. Wartość tego kąta po nasyceniu wodą, przy wskaźniku zagęszczenia gruntu $I_s = 0,88 - 0,94$, wynosi odpowiednio $\varphi = 30^\circ 34' - 34^\circ 25'$.

Na rys. 3 przedstawiono wykresy zależności zmywu od energii kinetycznej opadu E_k stosowanego podczas prowadzonych eksperymentów. Eksperyment przeprowadzono przy pięciu wartościach kąta α w zakresie $14^\circ - 45^\circ$. Wpływ wzrostu energii kinetycznej jest wyraźny, począwszy od nachylenia zbocza wynoszącego $\alpha = 14^\circ$ (co odpowiada wartości $\text{tg } \alpha = 0,25$) do $\alpha = 45^\circ$ (co odpowiada wartości $\text{tg } \alpha = 1$). Wynika stąd, że czynnik topograficzny, nachylenie skarpy lub zbocza utworu antropogenicznego z piasku średniego, przy energii kinetycznej opadu wynoszącej $385 - 669$ J/m² ma duży wpływ na wielkość powstającego zmywu.



Rys.3. Wpływ energii kinetycznej opadu E_k na zmyw M_s piasku średniego przy różnych wartościach nachylenia skarpy w zakresie $\alpha = 14^\circ - 45^\circ$, $\text{tg } \alpha = 0,250 - 1,000$

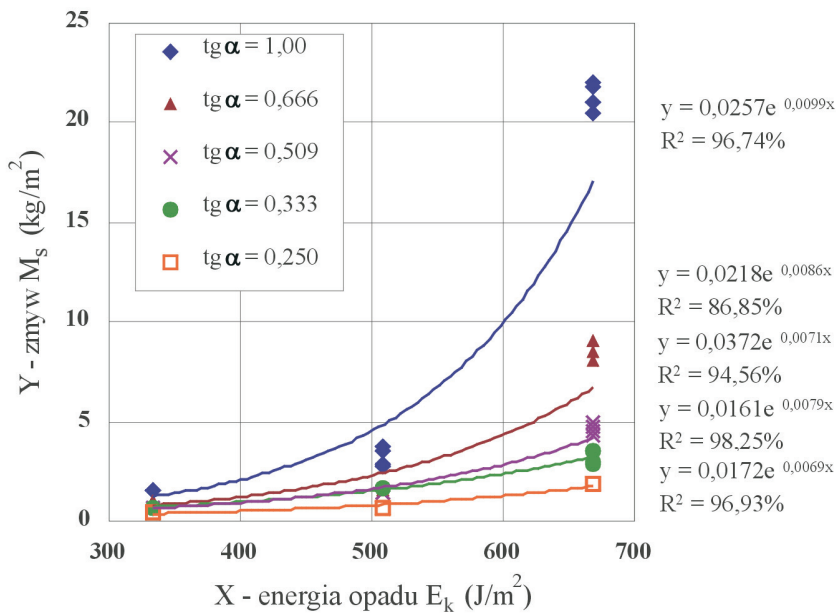
Fig 3. Influence of rainfall kinetic energy E_k on rainwash M_s of sand at various inclination angle, $\alpha = 14^\circ - 45^\circ$, $\tan \alpha = 0,250 - 1,000$

POPIOŁY LOTNE

Z analizy danych empirycznych M_s , w funkcji nachylenia powierzchni gruntu (skarpy) $\text{tg } \alpha$, wynika, że w zakresie kąta α równym $14^\circ - 34^\circ$, przebieg tej zależności ma charakter liniowy lub logarytmiczny. Po przekroczeniu kąta $\alpha = 34^\circ$ zmyw zdecydowanie

narasta (patrz wartości M_s dla kąta 45°) nadając całej funkcji regresji charakter równania regresyjnego. Fakt ten można wytłumaczyć właściwościami fizyko-chemicznymi i składem popiołu lotnego. Przy dużym pochyleniu powierzchni tego gruntu następuje wzrost prędkości spływającej wody. Pod wpływem intensywnego opadu następuje wzrost spójności popiołu wywołany początkiem procesu hydratacji oraz cementacji (zeskalenia), co również przyczynia się do obniżenia infiltracji wody w tym gruncie. Im mniejsza infiltracja wody, tym większy zmyw erozyjny przy większym poziomie opadu niż infiltracja wody w gruncie.

Na rys. 4 przedstawiono wykresy ilustrujące zależność zmywu popiołów lotnych od energii kinetycznej symulowanego opadu E_k stosowanego podczas badań. Zależność tę ustalono przy wartościach kąta α w zakresie $14^\circ - 45^\circ$ kątów nachylenia zbocza. Energia kinetyczna opadu E_k zaznacza swój wpływ na wzrost zmywu popiołów po osiągnięciu wartości 669 J/m^2 w zakresie czterech wartości kąta α od 14° do 34° ($\text{tg } \alpha = 0,250$ do $\text{tg } \alpha = 0,666$). Wyraźny wpływ energii E_k uwidacznia się przy kącie nachylenia powierzchni zbocza $\alpha = 45^\circ$ ($\text{tg } \alpha = 1$), po osiągnięciu poziomu tej energii powyżej 508 J/m^2 . Poziom energii E_k , prędkość spływu wody po powierzchni gruntu o dużym nachyleniu oraz kąt nachylenia strugi opadu w stosunku do powierzchni zbocza to czynniki kształtujące znaczny wzrost zmywu popiołu dopiero przy kącie $\alpha = 45^\circ$. Intensywność działania tych czynników przewyższyła siły spójności cząstek popiołu wywoływane także procesem hydratacji.



Rys.4. Wpływ energii kinetycznej opadu E_k na zmyw M_s popiołów lotnych przy różnych kątach nachylenia skarpy w zakresie $\alpha = 14^\circ - 45^\circ$, $\text{tg } \alpha = 0,250 - 1,000$

Fig.4. Influence of rainfall kinetic energy E_k on rainwash M_s of fly-ash at various inclination angle, $\alpha = 14^\circ - 45^\circ$, $\text{tan } \alpha = 0,250 - 1,000$

3.2. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA ZMYW EROZYJNY GRUNTÓW NASYPOWYCH

W ramach prowadzonych badań dokonano analizy wybranych czynników, czyli zmiennych kontrolowanych w czasie eksperymentu, jako przyczyn kształtowania się cech ilościowych procesu powstawania i przebiegu erozji wodnej na pochyłych powierzchniach utworów antropogenicznych. Wybór i zestawienie tych czynników jest rezultatem studiów i analiz prac badawczych związanych z erozją gleb i gruntów, jak też elementów prac wdrożeniowych z tego zakresu. Poniżej zestawiono czynniki, jako zmienne niezależne warunkujące powstawanie i kształtowanie się procesu erozji wodnej gruntów nasypowych, naturalnych (piasek) oraz antropogenicznych (popioły lotne), wbudowywanych w formy antropogeniczne wraz z innymi gruntami lub stanowiące jedyny składnik takiego utworu w postaci np. hałdy, składowiska czy zwałowiska.

Opis zmiennych

Zmienna niezależna:

M_s – zmyw gruntu lub masa zmywu zmytego materiału podczas 30-minutowego opadu, kg/m^2 ,

$\text{tg } \alpha$ – tangens kąta nachylenia powierzchni gruntu (utworu) skarpy lub zbocza,

w – wilgotność gruntu (%),

I_s – wskaźnik zagęszczenia gruntu,

V – prędkość filtracji w gruncie ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$),

E_k – energia opadu (J/m^2).

Założenia metodyczne

Do analizy funkcji wielorakiej regresji odzwierciedlającej wpływ różnych czynników (zmiennych niezależnych) na zmienną zależną, tj. poziom zmywu M_s , wykorzystano liniowe i nieliniowe modele funkcji regresji. Kryteria stosowane do oceny uzyskanych w analizie matematycznej postaci funkcji regresji wielorakiej:

- ocena dopasowania modelu do danych empirycznych przy użyciu skorygowanego współczynnika determinacji R^2 ,
- ocena wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych X_i (E_k , $\text{tg } \alpha$) na poziom zmywu M_s za pomocą wartości parametrów a_i ($i=1, 2, 3$) modelu opisanego następującym wzorem:

$$M_s = a_0 \cdot a_1 \cdot E_k^{a_2} \cdot (\text{tg } \alpha)^{a_3}, \quad (1)$$

- ocena charakteru wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych $X_i (E_k, tg\alpha)$ na poziom zmywu M_s za pomocą znaku (+/-) parametrów modelu a_i (ocena kierunku zmian: przyrost + lub zmniejszenie - wartości zmiennej zależnej Y w miarę wzrostu zmiennej niezależnej X_i).

PIASEK ŚREDNI

Wyniki analizy $M_s = f(E_k, tg\alpha)$ przeprowadzono dla kompletnego zestawu zmiennych niezależnych na podstawie modelu nieliniowego. Analiza wpływu tych zmiennych na kształtowanie zmywu piasku średniego prowadzi do wniosku, że na poziom zmywu M_s wyłączny wpływ wywierają tylko dwie zmienne: energia kinetyczna opadu E_k i nachylenie skarpy utworu antropogenicznego wyrażona funkcją $tg\alpha$. Ten zestaw dwóch zmiennych niezależnych wyrażony jest w równaniu funkcji regresji o postaci nieliniowej:

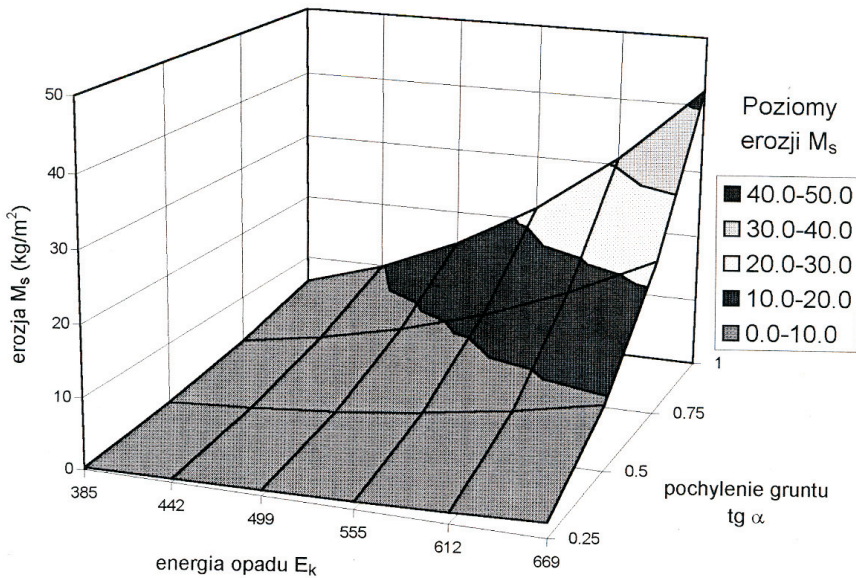
$$M_s = a_0 \cdot 4517 \cdot 10^{-9} \cdot E_k^{3,529} \cdot tg \alpha^{2,192}, \quad (2)$$

$$R^2 = 95,54 \%$$

gdzie:

$$a_0 = 0,00000452,$$

Zależności wyrażone tym równaniem zilustrowano na rys. 5 w przestrzennym układzie współrzędnych. Pozostałe zmienne nie są dopasowane do teoretycznego nieliniowego modelu tego równania.



Rys.5. Wpływ energii kinetycznej opadu E_k i kąta nachylenia powierzchni gruntu $tg\alpha$ na poziom erozji piasku średniego

Fig. 5. Influence of rainfall kinetic energy E_k and inclination angle $tan \alpha$ on erosion of sand

Poniżej przedstawiono wpływ różnych czynników na kształtowanie się zmywu piasku M_s wyrażonej równaniami regresji przy wykorzystaniu modelu liniowego. W równaniach tych zaznacza się także wpływ innych czynników na poziom zmywu M_s piasku niż w modelu nieliniowym. Należą do nich: prędkość filtracji wody V , wilgotność w , wskaźnik zagęszczenia I_s przy różnych poziomach energii kinetycznej opadu E_k .

Przy $E_k = 669 \text{ I/m}^2$

$$M_s = 25,22 \text{ tg} \alpha - 5V,70 V + 2,27 w + 1,02 ; \quad R^2 = 92,92 \% , \quad (3)$$

przy $E_k = 508 \text{ I/m}^2$

$$M_s = 23,71 \text{ tg} \alpha - 2,39 V + 17,57 I_s - 33,51 ; \quad R^2 = 94,82 \% . \quad (4)$$

Można zauważyć, że zarówno w modelu nieliniowym, jak i w modelu liniowym, kąt nachylenia zbrocza silnie zaznacza swój wpływ na wzrost poziomu zmywu piasku średniego M_s . Widoczny jest również wpływ zagęszczenia gruntu I_s oraz prędkości filtracji wody V na kształtowanie się zmywu piasku. Ten ostatni czynnik wpływa na ograniczenie zmywu przy dodatnim wpływie wilgotności w na jej wzrost. Przy znacznym zagęszczeniu gruntu I_s niższa prędkość filtracji wody V również wpływa na wzrost zmywu piasku M_s .

Zauważmy, że w obu tu wykorzystanych modelach regresji liniowym i nieliniowym, występuje kompletny zestaw pięciu czynników (zmiennych niezależnych) wyrażających swój wpływ na kształtowanie się zmywu piasku średniego.

POPIOŁY LOTNE

Wyniki analizy regresji dla kompletnego zestawu zmiennych przeprowadzonej przy wykorzystaniu modeli liniowych i nieliniowych, wskazują na lepsze dopasowanie tych drugich do rozkładu (zmienności czynników) zmiennych niezależnych. Na podstawie tej analizy wyeliminowane zostały najmniej dopasowane do teoretycznego równania regresji następujące zmienne: X_2 – wilgotność w , X_3 – wskaźnik zagęszczenia, I_s oraz Y_4 – prędkość filtracji wody w gruncie V .

Po tej eliminacji równanie regresji zbudowane przy wykorzystaniu modelu nieliniowego przyjmie następującą postać:

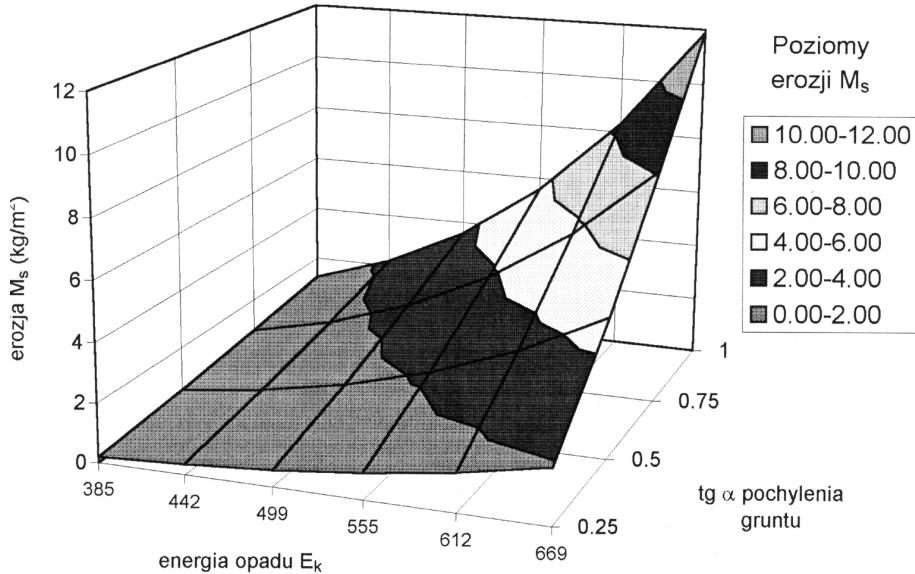
$$M_s = a_0 \cdot \text{tg} \alpha^{1,334} \cdot E_k^{4,086} , \quad (5)$$

$$R^2 = 91,98 \%$$

gdzie:

$$a_0 = 3396 \cdot 10^{-11} .$$

Zależności wyrażone tym równaniem przedstawione są na rys. 6 w układzie trzech współrzędnych. Z zależności tych wynika, że nachylenia zbocza $tg\alpha$ oraz energia kinetyczna opadu E_k dominują siłą wpływu na erozję M_s popiołów lotnych.



Rys.6. Wpływ nachylenia powierzchni gruntu $tg\alpha$ i energii kinetycznej opadu E_k na erozję wodną popiołu lotnego

Fig.6. Influence of rainfall kinetic energy E_k and inclination angle $\tan \alpha$ on of fly-ash erosion

Pewnym uzupełnieniem powyższego równania może być uwzględnienie dodatkowej zmiennej niezależnej – wilgotności gruntu w . Wtedy równanie regresji przyjmie następującą postać:

$$M_s = a_0 \cdot E_k^{4,073} \cdot tg \alpha^{1,335} \cdot w^{0,259} , \quad (6)$$

$$R^2 = 91,98 \%$$

gdzie:

$$a_0 = 137 \cdot 10^{-11} .$$

W przypadku czterech zmiennych niezależnych model liniowej funkcji regresji charakteryzujący się najwyższym poziomem determinacji $R^2 = 84,72 \%$ zbudowany przy poziomie opadu $E_k = 508 \text{ J/m}^2$ jest następujący:

$$M_s = 4,779 \cdot tg\alpha - 3,399 I_s + 0,959 V - 0,058 w + 1,354 . \quad (7)$$

Czynnikiem istotnie wpływającym na poziom zmywu popiołu jest kąt nachylenia gruntu $tg\alpha$, tak jak wskaźnik zagęszczenia I_s ogranicza jej poziom. Wpływ prędkości filtracji wody V na wzrost zmywu popiołu jest niewielki. Nieznaczny jest też wpływ wilgotności na ograniczenie zmywu popiołu.

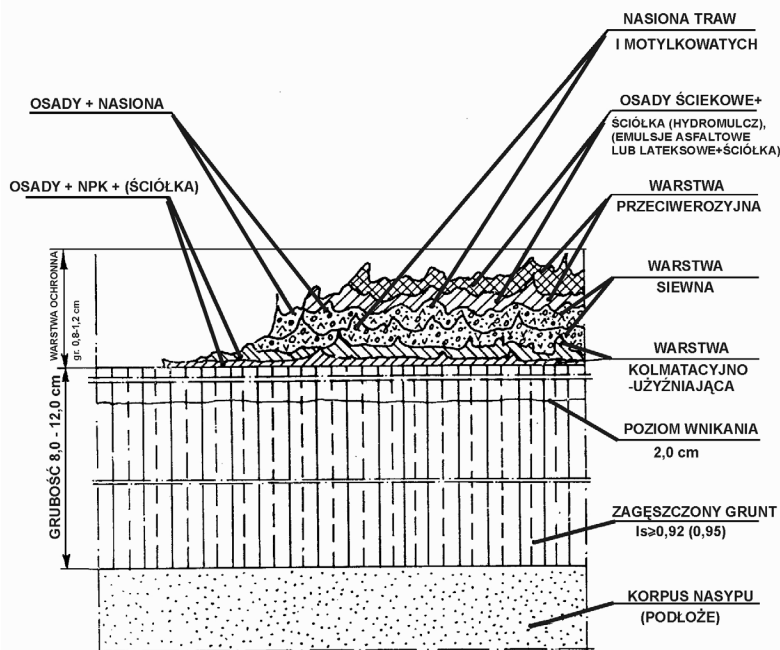
Wyniki analizy wpływu pięciu zmiennych niezależnych na kształtowanie zmywu popiołów lotnych wykazały, że pełny zestaw tych zmiennych w różnych konfiguracjach i składzie liczbowym występuje w rozpatrywanych modelach regresji wielorakiej. Oznacza to również, że wybrane czynniki z różną siłą w zależności od modelu liniowego czy nieliniowego dobrze opisują proces powstawania i kształtowania się erozji wodnej na pochyłych powierzchniach utworów antropogenicznych uformowanych z popiołów lotnych.

4. BADANIE ODPORNOŚCI NA EROZJĘ WODNĄ POWIERZCHNI GRUNTU POKRYTYCH PRZECIWEROZYJNYMI POWŁOKAMI OCHRONNYMI

Hydromieszanki tworzące powłokę ochronną, od momentu naniesienia ich na powierzchnię gruntu, w przeprowadzanych doświadczeniach oznaczono symbolami: A_1, A_2, \dots, A_i . Różnią się one jednym z charakterystycznych dla tych cieczy parametrem fizycznym tj. koncentracją mierzoną zawartością procentową suchej masy w jednostce objętości cieczy lub stosunkiem zawartości głównego składnika do zawartości wody oraz domieszkami stałymi w postaci trocin lub strużyn drzewnych. Porcje poszczególnych hydromieszanki określone miąższością warstwy (rys. 7) w momencie nanoszenia jej na powierzchnię gruntu uzależnione są od właściwości fizykochemicznych i reologicznych głównych składników tych hydromieszanki. Próbkę gruntów w pojemnikach (pedonach) w obrębie których prowadzimy obserwację wpływu pokrycia ich powierzchni hydromieszankami czy roślinami, nazywamy w prowadzonych badaniach jednostkami doświadczalnymi.

Poziomami czynnika lub jego obiektami nazywamy wybrane różne rodzaje pokrycia powierzchni badanych gruntów, dla których prowadzimy obserwację kształtowania się interesujących nas cech ilościowych:

- poziomu erozji, mierzonej masą zmywu zerodowanego materiału M_s (kg/m^2),
- przepuszczalności powłoki ochronnej z hydromieszanki, okrywy roślinnej oraz pokrywanego gruntu - mierzona prędkością przepływu wody V (cm/h).



Rys.7. Formowanie warstwy ochronnej na powierzchni utworów antropogenicznych [1, 14]

Fig.7. Formation of protective layer on the surface of anthropogenic structures [1, 14]

Charakterystyka powłok ochronnych z różnych pokryć (poziomów czynnika lub obiektu) powierzchni próbek badanych gruntów w pojemnikach (jednostkach doświadczalnych)

- A_1 – powierzchnia gruntu nasypowego odsłonięta (nie pokryta żadną powłoką ochronną), jednostka ta spełnia funkcję kontrolną,
- A_2 – hydromieszanka sporządzona z osadów ściekowych z oczyszczalni komunalnych o zawartości suchej masy (sm) 6,2%, miąższość warstwy ok. 8 mm,
- A_3 – hydromieszanka sporządzona z osadów ściekowych z oczyszczalni komunalnych o zawartości sm 9,4%, miąższość warstwy ok. 8 mm,
- A_4 – hydromieszanka sporządzona z osadów ściekowych o zawartości sm 9,4%, miąższość warstwy ok. 8 mm z dodatkiem trocin,
- A_5 – hydromieszanka z osadów ściekowych o zawartości sm 9,4%, z dodatkiem strużyn, miąższość warstwy ok. 8 mm,
- A_6 – hydromieszanka sporządzona z polimeru syntetycznego EKOGEL-MI i o koncentracji 1:9, miąższość warstwy ok. 5 mm,

A_7 – powierzchnia gruntu nasypowego z runią (okrywą trawiastą) jako ostateczny rezultat wykonanego hydroobsiewu przejmująca funkcję ochrony przed erozją.

4.1. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH DOŚWIADCZEŃ

Doświadczenie założono metodą kompletnej randomizacji. Warunki doświadczenia:

- kąt nachylenia powierzchni gruntu $\alpha = 34^\circ$ (1:1,5),
- intensywność symulowanego opadu $I_0 = 114,2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,
- energia kinetyczna opadu $E_k = 669 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$.

Wyniki pomiarów masy zmywu zerodowanego materiału zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Pomiary zmywu zerodowanego materiału z odsłoniętej i pokrytej powierzchni piasku średniego różnego rodzaju powłokami ochronnymi, kg/m^2
Table 1. Measurement of the earth flow from sand surface covered and uncovered with various protective coatings, kg/m^2

Powierzchnia	Rodzaj pokryć powierzchni gruntu - obiekty						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
1	23,80	2,1	4,7	0,34	0,28	0,45	0,17
2	23,98	1,8	1,5	0,32	0,30	0,50	0,20
3	24,96	1,7	1,6	0,29	0,22	0,40	0,12
4	25,75	1,9	1,4	0,31	0,18	0,30	0,19
Średnia arytmetyczna	24,62	1,87	1,55	0,315	0,245	0,41	0,17

Analiza statystyczna wyników

W celu weryfikacji hipotezy, że badane rodzaje pokryć powierzchni piasku średniego nie wpływają różnicująco na poziom erozji tego gruntu w warunkach laboratoryjnych, wykonano analizę wariancji dla klasyfikacji pojedynczej. Jej wyniki zestawiono w tablicy 2. Z tablic Snedecora odczytano, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$ oraz dla odpowiednich stopni swobody $c - 1 = 6$ i $n - c = 21$, wartość krytyczna $F_{0,05} = 2,57$ i $F_{0,01} = 3,81$. Wniosek: ponieważ wartość funkcji testowej $F_{emp}^o = 2596,34 > F_{0,01} = 3,81$, więc z ryzykiem błędu mniejszym od 1% odrzucamy hipotezę zerową o braku różnic między wpływem różnego rodzaju powłok ochronnych powierzchni piasku średniego a masą zmywu tego materiału.

Tablica 2. Analiza wariancji dla wyników dotyczących zmywu zerodowanego piasku średniego z pokrytej i odsłoniętej powierzchni tego gruntu różnego rodzaju powłokami ochronnymi

Table 2. Analysis of variance of effects of earth flow from sand surface uncovered and covered with various protective coatings

Źródło zmienności	Stopnie swobody	Suma kwadratów odchyłeń	Średni kwadrat (wariancja)	Wartość funkcji		
				F_{emp}^o	$F_{0,05}$	$F_{0,01}$
Między obiektami	$v_{ob.} = c - 1 = 6$	1962,87	$V_{ob.} = 327,1$	2596,34	2,57	3,81
Wewnątrz obiektów	$v_e = n - c = 28 - 7 = 21$	2,647	$V_e = 0,126$			
Suma	$n - 1 = 27$	1965,517				

Ze względu na stwierdzony wpływ rodzajów powłok ochronnych powierzchni piasku na poziom erozji tego gruntu, przystąpiono do porównań wielokrotnych średnich obiektowych, za pomocą testu Tukey'a oraz porównano średnie w porządku malejących mas zmywu zerodowanego materiału w kg/m^2 . W takim porządku przedstawiono średnie w tablicy 3 i podano ich istotne i nieistotne zróżnicowanie za pomocą symboliki literowej.

Tablica 3. Podział siedmiu średnich obiektowych na grupy jednorodne dotyczące masy zmywu zerodowanego piasku z odsłoniętą i pokrytą różnego rodzaju powłokami ochronnymi, kg/m^2

Table 3. Classification of seven object means into homogenous groups earth flow mass from sand surface covered and uncovered with various protective coatings, kg/m^2

Lp.	Symbol obiektu	Średnia obiektowa	Symbol grupy jednorodnej
1	A_1	24,62	a
2	A_2	1,87	b
3	A_3	1,55	c
4	A_4	0,315	d
5	A_5	0,245	d
6	A_6	0,41	e
7	A_7	0,17	e

Wyniki i ocena podziału średnich obiektowych na grupy jednorodne ze względu na erozję

W badaniu istotności różnic obiektowych między kolejnymi parami wypisanych średnich zastosowano test luki opartej na funkcji testowej t Oktaba [1976]. Jeżeli różnica między dwoma sąsiednimi jest średnimi większa od pół przedziału ufności obliczonego wg wzoru:

$$L = t_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_e}{k}}, \quad (8)$$

to uważamy tą lukę (różnicę) za istotną i wobec tego średnie te zaliczamy do różnych grup. Wartość graniczną t_{α} przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ odczytujemy z tablic t Studenta przy v_e stopniach swobody odpowiadających średniemu kwadratowi dla błędu V_e . Symbol k we wzorze oznacza liczbę replikacji (powtórzeń), na podstawie których była obliczona każda z badanych średnich.

W badaniu istotności różnic obiektowych posłużono się wartością L (najniższej istotnej różnicy) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczona na podstawie testu Tukey'a (wzór 8). Dane: $t_{\alpha} = t_{0,05} = 2,080$; $V_e = 0,126$; $k = 4$.

$$L = t_{\alpha} = \sqrt{\frac{2 \cdot v_e}{k}} = 2,080 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,126}{4}} = 0,52. \quad (9)$$

Znając wartość L możemy przystąpić do porównania średnich obiektowych zestawionych w tablicy 3.

Podzielono siedem rodzajów pokryć powierzchni piasku na pięć rozłącznych (nie pokrywających się) grup jednorodnych pod względem średnich wartości masy zmywu zerodowanego materiału (kg/m^2) z powierzchni gruntu odległego i pokrytego różnego rodzaju hydromieszaninami. Trzy grupy jednorodne zmieniają po jednym obiekcie (A_1, A_2 i A_3), natomiast dwie grupy zmieniają po dwa obiekty (A_4 i A_5) oraz (A_6 i A_7).

Wszystkie rodzaje pokryć (obiekty od A_2 do A_7) zabezpieczają powierzchnie piasku przed erozją i z różną siłą wpływają na jej ograniczenie. W tym doświadczeniu obniżają one masę zmywu erozyjnego 13-krotnie, poczynając od obiektu A_2 (hydromieszanina z osadów ściekowych o zawartości sm. 6,2%) i 60-krotnie przy obiekcie A_6 (pokrycie hydromieszaniną sporządzoną na bazie polimeru syntetycznego EKOGEL-MI).

Erozję piasku najbardziej ogranicza obiekt A_7 , tj. osłona powierzchni tego gruntu roślinnością trawiastą wyrosłą na podłożu gruntów pokrytych różnymi hydromieszaninami nanoszonymi na ich powierzchnie w ramach opisanych badań i doświadczeń.

W tym przypadku pokrycie powierzchni piasku runią trawiastą znacząco wpływa na poziom erozji w stosunku do powierzchni nieosłoniętych. Ograniczenie to jest spowodowane tym, że energia kinetyczna kropeł deszczu (symulowanego opadu) padających na okrywą trawiastą tłumiona jest przez źdźbła trawy. Na skutek tego następuje obniżenie siły uderzeń kropeł deszczu opadających z listków roślinności trawiastej, a w związku z tym także odrywanie cząstek gruntu z podłoża. Okrywa trawiasta powoduje również obniżenie prędkości zmywu, co jest również czynnikiem wpływającym na poziom erozji. Duży wpływ na obniżenie erozji ma ograniczenie dostępności odkrytej powierzchni dla kropeł deszczu, co można osiągnąć przez odpowiednią zawartość okrywy trawiastej. Obiekt A_6 , należący do dwuelementowej grupy „e” ogranicza, po obiekcie A_7 , najbardziej erozję piasku.

Zaobserwowano w czasie doświadczenia, że hydromieszanka sporządzona na bazie polimeru syntetycznego EKOGEL-MI ulega łuszczeniu i utwardza wierzchnią warstwę piasku na głębokość do 4 cm. Utwardzenie to obniża wprawdzie poziom erozji, lecz ogranicza przepuszczalność piasku i wpływa niekorzystnie na wschody i rozwój zasianych roślin. Z tych powodów hydromieszanka ta jest bardziej odpowiednia do stabilizacji gruntów. Jest także dobrą domieszką do innych hydromieszanin przeciwerozyjnych oraz stanowi dobre zabezpieczenie gruntów przed erozją wietrzną.

Z innych powłok erozyjnych rozpatrywanych w doświadczeniu (tabl. 3) trzeba wyróżnić obiekty A_4 i A_5 należące do dwuelementowej grupy „d”. Są to hydromieszanki z osadów ściekowych o zawartości sm. 9,4% z domieszką trocin i strużyn.

Podkreślić należy, że domieszki te spełniają rolę siatki zbrojeniowej w warstwie naniesionej hydromieszanki. Tak nałożona warstwa osłabia, zwłaszcza strużyny, uderzenia kropeł deszczu padających na pokrytą powierzchnię gruntu.

Wyniki badań wpływu różnego rodzaju pokryć powierzchni piasku średniego (oznaczonych za pomocą symboli $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$) na przepuszczalność tego gruntu - V , cm/h

Tablica 4. Wyniki pomiarów prędkości filtracji V piasku (cm/h), o powierzchni odsłoniętej i pokrytej różnymi powłokami ochronnymi i roślinnością trawiastą
Table 4. Results of measurement of filtration speed V (cm/h) of sand - covered and uncovered with various protective coatings

Powierzchnia	Rodzaj pokryć powierzchni gruntu - obiekty						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
1	3,81	1,47	0,90	0,63	1,35	0,75	2,02
2	3,61	1,58	0,92	0,65	1,26	0,72	1,92
3	4,08	1,62	1,01	0,56	1,15	0,80	1,89
4	3,45	1,71	0,98	0,52	1,31	0,69	1,96
Średnia arytmetyczna	3,73	1,59	0,95	0,59	1,26	0,74	1,95

Analiza statystyczna wyników

W celu weryfikacji hipotezy, że badane rodzaje pokryć powierzchni piasku, nie wpływają różnicująco na przepuszczalność warstwy tych pokryć oraz pokrywanego gruntu, w warunkach laboratoryjnych, wykonano analizę wariancji dla klasyfikacji pojedynczej. Jej wyniki zestawiono w tabelicy 5. Z tablic Snedecora wynika, że przy $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$, poziomie istotności $i - c = 6$ oraz $n - c = 21$ stopniach swobody wartości wynoszą odpowiednio $F_{0,05} = 2,57$ i $F_{0,01} = 3,81$.

Tablica 5. Analiza wariancji dla wyników dotyczących przepuszczalności piasku średniego o pokrytej i odsłoniętej powierzchni tego gruntu różnymi powłokami ochronnymi

Table 5. Analysis of variance of sand permeability tests when its surface is covered and uncovered with various protective coatings

Źródło zmienności	Stopnie swobody	Suma kwadratów odchyień	Średni kwadrat (wariancja)	Wartość funkcji		
				F_{emp}^o	$F_{0,05}$	$F_{0,01}$
Między obiektami	$V_{ob.} = c - 1 = 6$	27,71	$V_{ob.} = 4,61$	317,93	2,57	3,81
Wewnątrz obiektów	$V_e = n - c = 28 - 7 = 21$	0,3049	$V_e = 0,0145$			
Suma	$n - 1 = 28 - 1 = 27$	28,0149				

Wniosek: ponieważ wartość funkcji testowej $F_{emp}^o = 317,93 > F_{0,01} = 3,81$ zatem z ryzykiem błędu mniejszym od 1% odrzucamy hipotezę zerową o braku zróżnicowania między wpływem różnego rodzaju pokryć ochronnych powierzchni piasku średniego na przepuszczalność warstwy tych pokryć, ani też pokrywanej powierzchni gruntu.

Rezultat ten upoważnia do przeprowadzenia porównań wielokrotnych średnich obiektowych za pomocą testu Tukey'a. Interesujące jest porównanie średnich w porządku rosnących wartości liczbowych prędkości filtracji V w cm/h. W takim porządku zestawiono średnie w tabl. 6 i podano ich istotne i nieistotne zróżnicowanie za pomocą symboliki literowej. Sposób przeprowadzenia tych porównań opisano już wcześniej.

Wyniki i ocena podziału średnich obiektowych na grupy jednorodne ze względu na przepuszczalność

Dane do obliczania L (najmniejszej istotnej różnicy); wg wzoru (8) $t_{0,05} = 2,080$; $V_e = 0,0145$; $k = 4$.

$$L = 2,080 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0145}{4}} = 0,17 \quad (10)$$

Tablica 6. Podział siedmiu średnich obiektowych, na grupy jednorodne, dotyczących przepuszczalności warstwy powłok ochronnych piasku i powierzchni tego gruntu V , cm/h

Table 6. Classification of seven object means concerning permeability of sand and ground protective coatings into homogenous groups, cm/h

Lp.	Symbol obiektu	Średnia obiektowa	Symbol grupy jednorodnej
1	A_4	0,59	a
2	A_6	0,74	a
3	A_3	0,95	b
4	A_5	1,26	c
5	A_2	1,59	d
6	A_7	1,94	e
7	A_1	3,73	f

Wniosek: zaostrenie warunków doświadczenia przez zwiększenie kąta nachylenia gruntu do 34° i intensywności opadu $I_o = 114,2$ mm/h oraz energii kinetycznej opadu do $E_k = 669$ J/m², spowodowało istotne zróżnicowanie w zakresie wartości średnich obiektowych prędkości filtracji V . Świadczy o tym podział siedmiu badanych pokryć powierzchni piasku na grupy jednorodne zestawione w tabl. 6. Pięć grup jednorodnych zawiera po jednym obiekcie (A_3, A_5, A_2, A_7, A_1), jedna natomiast zawiera dwa obiekty (A_4 i A_6). Są to obiekty o najniższych wartościach średniej przepuszczalności warstwy okrywającej powierzchnię piasku, jak i samego gruntu. Są to pokrycia: hydromieszanka z osadów o zawartości sm. 9,4% z domieszką trocin oraz hydromieszanka sporządzona na bazie polimeru syntetycznego EKOGEL-MI. Jednak średnie wartości prędkości filtracji V nie wpłynęły w sposób istotny na masę zmywu erozyjnego kontrolowanego w tym samym doświadczeniu (patrz obiekty A_4 i A_6 , tabl. 6).

Najwyższa wartość średniej V przypisana jest obiektowi A_1 , czyli odkrytej powierzchni piasku średniego. Z pokrytych powierzchni piasku okrywa roślinna (obiekt A_7), uzyskuje najwyższą wartość prędkości filtracji V , przy najniższej wartości średniej masy zmywu erozyjnego.

Zakończenie badań i doświadczeń związanych z erozją wodną piasku średniego z odsłoniętą i pokrytą powierzchnią

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że z dwóch wybranych gruntów (piasek średni i popioły lotne), piasek średni jest bardziej podatny na erozję wodną. Toteż rezultaty uzyskane na przykładzie badań tego gruntu dostatecznie wyraźnie obrazują rozpatrywany problem. Dlatego w dalszej prezentacji wyników badań pokryć powierzchni popiołów lotnych ograniczono się do podania podziału średnich obiektowych na grupy jednorodne. Pozwoli to na dostatecznie dokładne zorientowanie się w przebiegu erozji tego gruntu. Podkreśla się, że przeprowadzone badania i doświadczenia związane z

erozją wodną popiołów odbywały się w identycznych warunkach co piasku średniego i obejmowały ten sam zakres.

POPIOŁY LOTNE

Charakterystyka doświadczenia i wyników badań zmywu erozyjnego

Podobnie jak w doświadczeniach z piaskiem średnim, tak i niniejsze doświadczenie założono metodą kompletnej randomizacji, w którym badano wpływ różnego rodzaju pokryć powierzchni popiołów lotnych na poziom erozji i przepuszczalności tego gruntu. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych.

Warunki doświadczenia:

- intensywność symulowanego opadu $I_o = 114,2$ mm/h,
- nachylenie powierzchni gruntu $\alpha = 34^\circ$ (1:1,5),
- energia kinetyczna opadu $E_k = 669$ J/m².

Tablica 7. Wyniki pomiarów zmywu masy zerodowanego popiołu lotnego, z odkrytej i pokrytej powierzchni tego gruntu różnego rodzaju powłokami ochronnymi, kg/m²

Table 7. Results of measurement of rainwash of eroded fly-ash from surfaces covered and uncovered with various protective coatings, kg/m²

Powierzchnia	Rodzaj pokryć powierzchni gruntu - obiekty						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
1	8,24	0,89	0,83	0,30	0,31	0,36	0,12
2	8,50	0,85	0,71	0,36	0,28	0,40	0,17
3	8,86	0,92	0,80	0,42	0,35	0,38	0,20
4	8,87	0,94	0,74	0,40	0,26	0,42	0,23
Średnia arytmetyczna	8,61	0,90	0,77	0,37	0,30	0,39	0,18

Analiza statystyczna wyników

Na podstawie analizy wariancji wg klasyfikacji pojedynczej przy poziomie istotności $\alpha = 0,01$ i dla odpowiednich stopni swobody $\nu_h = 6$ i $\nu_e = 21$, $F_{0,01} = 3,61$ odrzuca się hipotezę, że badanie pokrycia nie wpływają różnicująco na poziom erozji popiołów lotnych i stwierdza się, że wysoce istotny wpływ różnych pokryć powierzchni tego gruntu na poziom tej erozji wodnej. Oznacza to, że średnie obiektowe dla badanej cechy nie są jednakowe. Należy zatem porównać wielokrotne średnie obiektowe za pomocą procedury Tukey'a.

Wyniki i ocena podziału średnich obiektowych na grupy jednorodne ze względu na erozję

Zgodnie z zasadą wydzielenia grup jednorodnych, uporządkowano średnie obiektowe w porządku malejącym zmywu zerodowanego materiału, kg/m^2 , przedstawiając rezultaty w tabl. 8. Wartość L najmniejszej istotnej różnicy obliczono wg wzoru (8) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$, $t_{0,05} = 2,080$, średni kwadrat odchyłeń dla błędu $V_e = 0,0147$, przy 21 stopniach swobody i $k = 4$.

$$L = 2,080 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0147}{4}} = 0,178 \quad (11)$$

Dokonano podziału siedmiu średnich obiektowych masy zmywu zerodowanego materiału popiołów lotnych z odkrytej i pokrytej różnymi powłokami ochronnymi powierzchni tego gruntu na grupy jednorodne. Są to dwie grupy jednoelementowe (obiekty A_1 i A_2), jedna dwuelementowa (obiekty A_3 i A_6) oraz jedna trzejelementowa (obiekty A_4 , A_5 i A_7).

Tablica 8. Podział siedmiu średnich obiektowych dotyczących masy zmywu zerodowanego popiołu lotnego w z odkrytych i pokrytych powierzchni tego gruntu różnymi powłokami ochronnymi, kg/m^2

Table 8. Sharing of seven object means concerning the mass of eroded fly-ash from surfaces covered and uncovered with various protective coatings into homogenous groups, kg/m^2

Lp.	Symbol obiektu	Średnia obiektowa	Symbol grupy jednorodnej
1	A_1	8,61	a
2	A_2	0,90	b
3	A_3	0,77	c
4	A_4	0,39	c
5	A_5	0,37	d
6	A_6	0,30	d
7	A_7	0,18	d

Tak jak i w doświadczeniu z piaskiem średnim, do najbardziej skutecznych należą pokrycia: hydromieszaniną z osadów ściekowych o zawartości sm. 9,4% z domieszkami trocin i strużyn oraz okrywa trawiasta. W następnej kolejności usytuowania są: hydromieszanina z EKOGEŁ-u oraz hydromieszanina z osadów ściekowych o zawartości sm. 9,4% bez domieszek. Zauważmy, że poziom erozji popiołów lotnych mierzony zmywem masy zerodowanego materiału w kg/m^2 jest około do 48 razy wyższy w porównaniu z takim samym zmywem z powierzchni pokrytych (obiekty od A_2 do A_7). Przy czym najbardziej skutecznym pokryciem jest ruń trawiasta.

W porównaniu z piaskiem średnim popioły lotne są dużo mniej podatne na erozję wodną, co tłumaczy się ich składem mechanicznym (duża zawartość cząstek iłowych i pylistych) oraz właściwościami chemicznymi. Hydromieszanki sporządzane z osadów ściekowych charakteryzują się również dużą zawartością cząstek koloidalnych.

Powierzchnia graniczna pomiędzy fazą stałą (cząstkami popiołów lotnych) i fazą ciekłą (hydromieszaniną) pokrywającą powierzchnię gruntów jest miejscem występowania wielu zjawisk natury fizykochemicznej (adsorpcja jonów, potencjał elektrokinetyczny, pojemność wymienna, kohezja itp.). Zjawiska te decydują o możliwości wzmocnienia (stabilizacji gruntu) warstwy popiołów lotnych pokrytych hydromieszaniną z osadów ściekowych oraz polimerów syntetycznych. Im drobniejsze są cząstki danego ośrodka tym większa jest aktywność fizyko-chemiczna na granicy faz. Zjawiskom tym trzeba przypisać skuteczność pokryć powierzchni popiołów lotnych, zawierających dużo cząstek iłowych i pyłowych. Świadczy o tym również niski poziom zmywu zerodowanego materiału z pokrytych powierzchni popiołów lotnych.

Wyniki badań prędkości filtracji V (cm/h) popiołów lotnych z odkrytą i pokrytą różnymi powłokami powierzchnią tego gruntu

Pomiary prędkości filtracji V popiołów lotnych przeprowadzono w czasie doświadczenia równocześnie ze zmywem erozyjnym tego gruntu. Wyniki pomiarów zestawione są w tabelicy 9.

Tablica 9. Pomiary prędkości filtracji V popiołów lotnych z odkrytą i pokrytą powierzchnią tego gruntu różnego rodzaju powłokami ochronnymi, cm/h
Table 9. Results of measurement of the fly-ash filtration speed V when its surface is uncovered and covered with various protective coatings, cm/h

Powierzchnia	Rodzaj pokryć powierzchni gruntu - obiekty						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
1	3,12	0,94	0,90	0,92	0,96	0,64	0,42
2	4,48	0,96	0,78	0,83	0,96	0,68	0,46
3	2,96	0,90	0,84	0,89	0,93	0,70	0,48
4	4,02	0,89	0,82	0,85	0,89	0,74	0,52
Średnia arytmetyczna	3,61	0,92	0,83	0,87	0,94	0,69	0,47

Analiza statystyczna wyników

Na podstawie analizy wariancji wg klasyfikacji pojedynczej przy poziomie istotności $\alpha = 0,01$ i dla odpowiednich stopni swobody $V_{ob.} = 6$ i $V_e = 21$, $F_{0,01} = 3,81$ oraz przy uzyskanej wartości funkcji $F_{emp}^o = 63,46$, wobec nierówności $F_{emp}^o > 3,81$, odrzucamy hipotezę zerową, że badane pokrycia nie wpływają różnicująco na poziom przepuszczalności popiołów lotnych i stwierdzamy istotny wpływ różnych pokryć powierzchni

tego gruntu na tę jego cechę. Zatem przystąpiono do porównań wielokrotnych średnich obiektowych za pomocą procedury Tukey'a. Zgodnie z zasadą wydzielenia grup jednorodnych porządkowano średnie obiektowe w porządku rosnącej prędkości filtracji V w cm/h i przedstawiono wyniki w tablicy 10.

Tablica 10. Podział siedmiu średnich obiektowych dotyczących prędkości filtracji V popiołów lotnych (cm/h), z odkrytą i pokrytą powierzchnią tego gruntu na grupy jednorodne przy zastosowaniu procedury Tukey'a
Table 10. Sharing of seven object means concerning filtration speed of fly-ash V with uncovered and covered surface into homogenous groups, cm/h

Lp.	Symbol obiektu	Średnia obiektowa	Symbol grupy jednorodnej
1	A_1	0,47	a
2	A_2	0,69	a
3	A_3	0,83	a
4	A_4	0,87	a
5	A_5	0,92	a
6	A_6	0,94	a
7	A_7	3,61	b

Wyniki i ocena podziału średnich obiektowych na grupy jednorodne ze względu na wodoprzepuszczalność

Wartość L - najmniejszej istotnej różnicy obliczamy wg wzoru (8) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$; $t_{0,05} = 2,080$; średni kwadrat odchyłeń dla błędu przy 21 stopniach swobody $v_e = 0,0728$; $k = 4$.

$$L = 2,080 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0728}{4}} = 0,39 \quad (12)$$

Przeprowadzono porównanie średnich obiektowych dotyczących przepuszczalności popiołów lotnych z odkrytą powierzchnią tego gruntu i pokrytą różnymi powłokami ochronnymi. Ostatecznie podzielono siedem średnich obiektowych na dwie rozłączne grupy jednorodne. Jedna grupa zawiera sześć obiektów (A_1, A_6, A_2, A_4, A_3 i A_5), druga jeden obiekt (A_7). W pierwszej grupie są wszystkie obiekty - pokrycia powierzchni popiołów lotnych, co oznacza, że różnice między tymi obiektami są nieistotne ze względu na przepuszczalność. W drugiej grupie znajduje się tylko jeden obiekt - powierzchnia popiołów o poryciu zerowym, czyli odsłonięta.

Oznacza to, że znajdująca się między ziarnami lub cząstkami popiołów pory, wniknęła hydromieszanka. Uległy one przez to przewężeniu, lecz przepuszczalność nie zanikła. Takie połączenie cząstek hydromieszanki z cząstkami popiołów lotnych oznacza, że utrwalenie warstwy powłoki pokrywającej powierzchnię tego gruntu, zapewnia utrzymanie zasianych nasion do czasu ich wykiełkowania oraz warunki niezbędne dla wschodów i wzrostu siewek.

5. ANALIZA I OCENA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ

W ramach rozwiązania podjętego problemu, zaprojektowano eksperyment badawczy, pozwalający na ilościową ocenę strat (ubytków) materiału (gruntu i pokrycia) spowodowanych procesem zmywu powstającym na pochyłych, odkrytych powierzchniach utworów antropogenicznych. W tym celu do badań wybrano dwa rodzaje gruntów nasypowych: grunt naturalny – piasek średni i grunt antropogeniczny – popioły lotne. Następnie napełniono nimi pedony, zagęszczano je i umieszczano na stanowisku badawczym pod symulatorem opadu tak, by powierzchnia gruntu nachylona była w stosunku do poziomu pod określonym kątem w zakresie od 14° – 45° (rys. 1 i 2). Tak przygotowane próbki gruntu poddano symulowanemu opadowi deszczu o różnej intensywności. W ten sposób warunki przeprowadzenia eksperymentu w pomieszczeniach laboratoryjnych oraz pod namiotem zbliżone były do naturalnych. Obejmowały one przygotowanie próbek gruntu tak, by odpowiadały one wymaganiom nasypu budowlanego w zakresie: wskaźnika zagęszczenia, wilgotności, nachylenia powierzchni skarp, zaś intensywność symulowanego opadu odpowiadała naturalnym opadom pochodzenia nawalnego i burzowego.

W ramach tego eksperymentu poszukiwano ilościowych zależności między masą zmywu zmytego materiału – erozją M_s a czynnikami wywołującymi i kształtującymi ten proces. Wybrano pięć czynników opisujących ilościowe zależności wpływające na zjawisko powstawania i kształtowania zmywu wodnej na pochyłych powierzchniach badanych gruntów utworów antropogenicznych. Czynniki te potraktowano jako zmienne niezależne i poddano ocenie ich wpływ na zmyw (zmienna zależna), z zastosowaniem metod analizy regresji jednej zmiennej i regresji wielorakiej.

Są tu cztery czynniki charakteryzujące właściwości fizyczne i mechaniczne badanych gruntów, przede wszystkim (I_s, V, w), do których trzeba zaliczyć także czynnik topograficzny ($tg\alpha$), gdyż nachylenia zbocza lub skarpy utworu antropogenicznego, uwarunkowane jest wielkością kąta tarcia danego gruntu, uzależnionego od jego składu mechanicznego i spójności. Prędkość filtracji V jest czynnikiem zależnym od właściwości filtracyjnych gruntu wyrażanych współczynnikiem filtracji k , gradientu hydraulicznego i (różnica ciśnień), jak również drożności porów (skutki zjawiska sufozji lub kolmatacji gruntu). Natomiast piąty czynnik E_k – energia kinetyczna opadu jest pochodną intensywności kropli deszczu spadających z określoną prędkością i masą na nieosłoniętą powierzchnię gruntu. Pod wpływem energii kinetycznej opadu tych kropli następuje mechaniczne uderzenie, wrywanie, rozbryzg i wymywanie z powierzchniowej warstwy cząstek gruntu, a następnie ich zmyw po pochyłej powierzchni skarpy. Jest to więc czynnik E_k powodujący powstawanie i kształtowanie zmywu.

Na podstawie wyników liniowych i nieliniowych modeli regresji można stwierdzić, że pełny zestaw tych pięciu czynników (cech ilościowych) występujących w różnym składzie i liczbie z różną siłą wpływa na poziom i kształtowanie zmywu dwóch badanych gruntów. Oznacza to, że wybór tych czynników dobrze opisuje zależność ich wpływu na powstawanie, poziom i kształtowanie zmywu na powierzchniach utworów antropogenicznych.

Bardziej podatny na erozję wodną jest piasek średni niż popioły lotne, przy czym podatność ta uzależniona jest głównie od składu mechanicznego gruntu. Uwidacznia się to w przypadku piasku średniego nie zawierającego cząstek ilastych. W przypadku popiołów lotnych silny wpływ na mniejszą podatność tego gruntu na zmyw, oprócz dużej zawartości cząstek ilastych i pyłowych, mają także właściwości pucolanowe (zawartość aktywnego CaO) wywołujące proces wiązania hydraulicznego.

Spośród czynników najbardziej wpływających na wzrost poziomu zmywu w przypadku piasków i popiołów lotnych ma kąt nachylenia powierzchni zbocza $tg\alpha$ oraz energia kinetyczna opadu E_k przy czym na wzrost zmywu M_s piasku istotnie wpływa zmienna w – wilgotność gruntu i I_s wskaźnik zagęszczenia, zaś na jej ograniczenie prędkość filtracji wody V . Na wzrost zmywu popiołów lotnych wpływa istotnie zmienna w , a na jej ograniczenie zmienne I_s i V .

Wyniki badań erozji dwóch wybranych gruntów nasypowych, piasku średniego i popiołów lotnych z powierzchnią pokrytą powłokami ochronnymi z sześciu różnych hydromieszanin wykazały, że ochraniają one przed erozją powierzchniową. Przy czym każda z tych powłok z różną siłą osłabia zmyw zerodowanego materiału z pochyłych powierzchni gruntu.

Hydromieszanina sporządzona z polimeru syntetycznego EKOGEL- MI o koncentracji 1:9, oznaczona symbolem A_6 tworzy trwałą, mocną powłokę ochronną z tendencją do pękania i łuszczenia przy zachwianej proporcji rozcieńczenia tzn. zmniejszonej ilości wody. Warstwa gruntu pokryta tą hydromieszaniną ulega zeskaleniu, lecz nie traci przepuszczalności. Z tego względu nadaje się do stabilizacji powierzchni gruntu przy jednoczesnym zastrzeżeniu, że stanowi przeszkodę we wschodzie zasianych roślin i ich rozwoju. Hydromieszanina sporządzona z polimerem może być stosowana do doraźnego pokrywania naddatków skarp. W porównaniu z badanymi hydromieszaninami z wykorzystaniem z osadów ściekowych [14] z oczyszczalni daje gorsze rezultaty w zakresie masy zmywu zerodowanego materiału i prędkości filtracji V .

Powłoka ochronna z hydromieszaniny sporządzonej z osadów ściekowych (symbol A_2) o zawartości sm. 6,2% daje gorsze rezultaty w zakresie zmywu erozyjnego, lecz przy korzystnej wartości prędkości filtracji V . Zatem hydromieszanina o tej koncentracji s.m. też może być stosowana do hydromulczowania (doraźnego zabezpieczenia przed erozją skarp) pochyłych powierzchni.

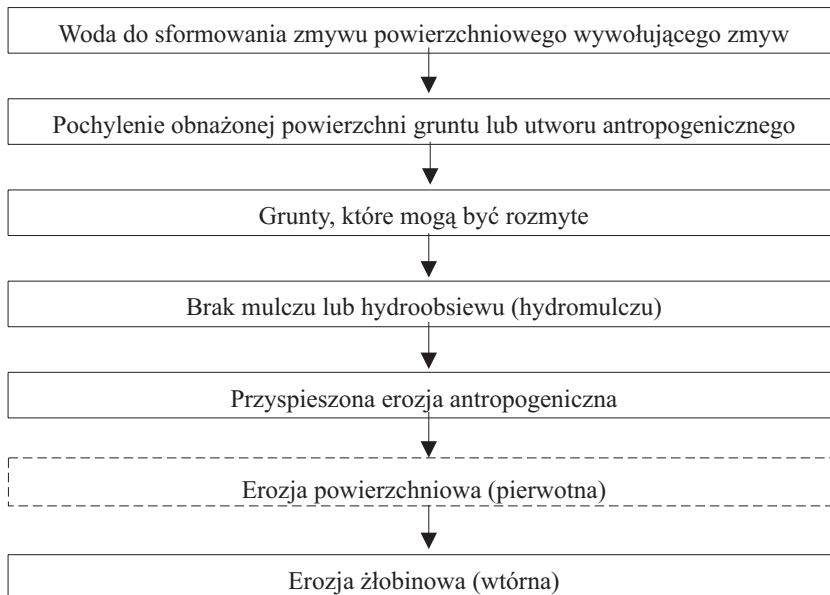
Skuteczność działań związanych z agrotecznicznym zabezpieczeniem powierzchni skarp budowli ziemnych przed erozją zależy przede wszystkim od prawidłowego wykonania (formowania) tych skarp. Powinno to obejmować:

- formowanie z naddatkiem (dotychczas nie ujęto konieczności wykonywania naddatku w Ogólnych Specyfikacjach Technicznych D-02.00.00 Roboty ziemne) i staranne zagęszczanie warstw nasypu, tak, aby w fazie robót wykończeniowych skarpy usunąć ten naddatek, tworząc skarpe w gruncie właściwie zagęszczonym,

- wykonywanie wykopów z niedomiarem, bez lokalnych pogłębień, tak, aby w fazie robót wykończeniowych skarpy usunąć ten niedokopany grunt, tworząc skarpe w nienaruszonym gruncie rodzimym.

Koszt naprawy zerodowanych skarp może osiągnąć nawet 8-12% kosztów robót ziemnych (nawet do 20% wraz z kosztami naprawy urządzeń odwodnieniowych i melioracyjnych).

Tablica 11. Powstawanie przyspieszonej erozji wodnej utworów antropogenicznych
Table 11. Initiation of accelerated water erosion in anthropogenic earthen structures



Źródło: opracowanie własne autora na podstawie:

- 1 - nadzoru w czasie realizacji na 2 tys. ha rekultywacji metodą hydroobsiewu, w tym na 350 ha bezpośredni udział;
- 2 - kwerendy literatury [6], [9], [15] z nawiązaniem do norm [16], [17]



Rys.8. Przykłady niewłaściwego zabezpieczenia skarp nasypu obwodnicy drogowej w Radzyminie
Fig.8. Examples of improper protection of the embankment scarps at by-pass road in Radzymin

6. WNIOSKI

1. Procesy erozji wodnej można opisać nieliniowymi lub też liniowymi modelami funkcji regresji wielorakiej dla poszczególnych badanych utworów oraz różnej intensywności opadu. Nie można zatem opisać zachodzących procesów erozji jednym modelem, a to ze względu na odmienne oddziaływanie poszczególnych czynników wpływających na te procesy.
2. Najsilniejszy wpływ na procesy erozji wodnej ma czynnik opisany jako kąt nachylenia powierzchni (skarpy). Pozostałe cztery czynniki, to energia (intensywność) opadu, zagęszczenie utworu wyrażone wskaźnikiem zagęszczenia I_s , wilgotność wierzchniej warstwy utworu oraz prędkość filtracji V , których oddziaływanie na omawiany proces erozji będzie zmienne w zależności od rodzaju utworu.
3. Uzyskane wyniki badań dotyczące intensywności procesu erozji wodnej pochyłych powierzchni wybranych utworów antropogenicznych, niezabezpieczonych warstwą ochronną, przebiegają znacznie bardziej intensywnie niż zabezpieczonych warstwą hydromieszanki. Efekt zabezpieczający tego rodzaju warstwy zależy od masowego doboru użytych składników i może się różnić wielokrotnie. Stąd też technologia doboru składników odgrywa istotną rolę w końcowej skuteczności omawianej warstwy.
4. Porost roślinny (ruń) pokrywająca pochyłe powierzchnie utworów antropogenicznych, będąca rezultatem zastosowania hydroobsiewu w miarę rozwoju wegetacyjnego zmniejsza intensywność procesu erozji. W przypadku badania pochyłej powierzchni, np. zbudowanej z piasku, intensywność ta zmniejszyła się znacząco w stosunku do powierzchni niepokrytej runią trawiastą. Dla innych utworów używano mniejszą krotkość.
5. Właściwe technologie formowania skarp (z zachowaniem wymaganego zagęszczenia), jak i sposób nakładania poszczególnych warstw hydromieszanki o odpowiednich właściwościach gwarantują skuteczność hydroobsiewu od chwili naniesienia jako metody ochrony przeciwerozyjnej powierzchni pochyłych utworów antropogenicznych. Nieprzestrzeganie tych zasad ujętych dotychczas częściowo w polskich normach branżowych i ogólnych specyfikacjach technicznych skutkuje potrzebą zwiększenia nakładów inwestycyjnych, a równie często jest przyczyną strat w produkcji rolniczej.
6. Upowszechnienie stosowania hydroobsiewu wymaga kontynuowania badań terenowych w celu opracowania klarownych zasad stosowania w zależności od rodzaju utworu antropogenicznego, jak również modernizacji hydrosiewnika umożliwiającego ocenę preparowanej hydromieszanki pod względem uzyskania dobrej stabilności na pochyłej powierzchni.
7. Zabiegi mające na celu zabezpieczenie skarp nasypów i wykopów drogowych przed erozją należy rozpocząć już w trakcie wznoszenia i formowania budowli. Skuteczność działań związanych z agrotechnicznym zabezpieczeniem powierzchni skarp budowli ziemnych przed erozją zależy przede wszystkim od prawidłowego wykonania (formowania) tych skarp.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Głażewski M.*: Hydroobsiew jako metoda ochrony przeciwoerozyjnej pochyłych powierzchni utworów antropogenicznych. Rozprawa doktorska, IBMER, Warszawa 2003
- [2] *Głażewski M.*: Wznoszenie, formowanie, zagęszczanie, plantowanie przypór budowli ziemnych oraz naddatków skarp. Seminarium nt. Inżynieria wznoszenia budowli ziemnych oraz zabezpieczania techniczno-biologiczne skarp, Energopomiar Gliwice 2003
- [3] *Głażewski M., Eymontt A.*: Agrotechniczne umocnienie zboczy liniowych budowli ziemnych metodą hydroobsiewu z użyciem osadów ściekowych. Międzynarodowa Konferencja Zrównoważone Zarządzanie Obszarami Przemysłowymi, PAN/IGS-MiE, Kraków 2004
- [4] *Głażewski M.*: Przygotowanie podłoża i powierzchni skarp budowli ziemnych do biologicznej stabilizacji. Konferencja Naukowo-Techniczna Obwałowania cieków wodnych i poboczy szlaków komunikacyjnych, Problemy techniczno-przyrodnicze. PAN-IPIS/Politechnika Śląska, Gliwice 2003
- [5] *Dzierżawski K., Głażewski M.*: Nowe możliwości zadarnienia kolejowych budowli ziemnych. Drogi Kolejowe, 9, 1985
- [6] *Coopin N.J., Richards I.G.*: Use of Vegetation in Civil Engineering. CIRIA - Butterworths, Londyn 1990
- [7] *Ziaja W.*: Dobór traw i roślin do obsiewów pasa drogowego. Drogownictwo, 1, 1993
- [8] *Jewgieniew I.E., Sawin W.W.*: Zaszczita prirodnoj sredy pri stroitelstwie i soderżani awtomobilnych dorog. Wyd. Transport, Moskwa 1989
- [9] *Morgan R.P.C.*: Soil erosion and conservation. Longman Scientific and Technical, New York 1991
- [12] *Głażewski M.*: Przeciwoerozyjne biologiczne zabezpieczenie skarp metodą hydroobsiewu. Konferencja Naukowo-Techniczna Tereny zdegradowane - możliwości ich rekultywacji: Nauka o Gospodarce, Akademia Rolnicza, Szczecin 2000
- [13] *Wierzbcki K.* i in.: Rekultywacja utworów antropogenicznych metodą hydroobsiewu. KBN/IBMER 1997
- [15] *Głażewski M., Rogulski B.*: Ocena zmywów erozyjnych skarp budowli ziemnych z popiołów lotnych. V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Materiały alternatywne w drogownictwie. Recykling a drogownictwo. ZUTER, Radom 2004
- [22] *Sinkiewicz M.*: Rozwój denudacji antropogenicznej w środkowej części Polski Północnej. Uniwersytet M. Kopernika, Toruń 1998
- [23] *Głażewski M.* i in.: Zasady agrogeotechnicznego przygotowania skarp drogowych do zadarniania. IBDiM, Warszawa 2004

NORMY, PRZEPISY, WYTYCZNE, ROZPORZĄDZENIA

- [10] Dz. U. Nr 89 poz.414. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane.
- [11] Dz. U. Nr 72 poz.664. Obwieszczenie Marszałka Sejmu RP z dnia 25 kwietnia 2002 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o zamówieniach publicznych.
- [14] EN-4435/M10/84. Warunki przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych z oczyszczalni komunalnych metodą hydroobsiewu. Ministerstwo Zdrowia i Opieki Społecznej
- [16] BN-88/8932-02 1988. Podtorze i podłoże kolejowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [17] P-162546. 1990. Sposób umacniania skarp o pochyleniu stoku naturalnego i naruszonej strukturze gruntu
- [18] OST/D-06.0101. 2001. Ogólne specyfikacje techniczne. Umocnienie powierzchniowe skarp, rowów i ścieków. BZDBDiM/DDKiA, Warszawa
- [19] P-147319. 1986. Sposób hydromechanicznego siewu
- [20] PN-R-04152. 1997. Erozja i melioracje przeciwerozyjne. Terminologia
- [21] PN-S-02205. 1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [24] PN-B-12099. 1997. Zagospodarowanie pomelioracyjne. Wymogi i badania
- [25] OST/D-02.00.00. 2002. Roboty ziemne.
- [26] PN-S-02204. 1997. Drogi samochodowe. Odwodnienia dróg

INVESTIGATION OF WATER EROSION OF SLOPES OF SOIL STRUCTURES

Abstract

Building influences of highways and by-pass roads as well as fast roads modernization strongly the natural environment. Keeping of slopes situated along these structures in good condition requires a biological reinforcement and a cover with grass and papilionaceous plants. That is why American research workers, who have been interested in this problem for 40 years, have invented mulching, hydromulching and hydroseeding technology. This method is currently used almost all over the world. In Poland the hydroseeding has been involved 20 years ago. However taking into account the program of highway and by-pass roads development, we should implement this method on a large scale.

Technical meaning of the word "slope" assigns significantly inclined area which joins two horizontal or almost horizontal surfaces lying on different heights. In this meaning, slope replaces and acts as a resistance wall. The slopes protect embankments and excavations, reinforce drainage ditches and regular river-beds. The slope is a construction element of earthen structures. Slope concern not only inclined areas of soil but also adherent horizontal strips of suitable width at road crown and toe.

The problem of biological reinforcement (grassing) of uncovered, inclined surfaces of anthropogenic earthen structures was discussed. The studies were undertaken to protect the natural environment against harmful effects of water/soil erosion occurring on such surfaces. A main component of sowing hydromixtures was a sewage sludge from municipal treatment plant. The sludge form a medium/binding agent for antierosive protective coats, since a moment of their hydromechanical spreading on the surface of tested anthropogenic soils, until developing of the third full-blown grass leaf. The investigations concerning rain-washes were conducted under laboratory (repeatable) conditions, where formation and shaping of water erosion processes were simulated. Sloped areas (14-45°) of anthropogenic structures from natural soils (medium sand) and anthropogenic soils (fly-ash) were tested.