

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK · ZAKŁAD AGROFIZYKI



Ossolineum

zeszyt 21

rok 1976

**CZYNNIKI ZASKORUPIANIA GLEB
ORAZ METODY
PRZECIWDZIAŁANIA TEMU ZJAWISKU**

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
ZAKŁAD AGROFIZYKI W LUBLINIE

PROBLEMY AGROFIZYKI

21

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PROBLEMY AGROFIZYKI

21

IGNACY DECHNIK, RYSZARD DĘBICKI

**CZYNNIKI ZASKORUPIANIA GLEB
ORAZ METODY PRZECIWDZIAŁANIA
TEMU ZJAWISKU**

**WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

1976

Komitety Redakcyjne
BOHDAN DOBRZAŃSKI (przewodniczący)
JAN GLIŃSKI, BOGUSŁAW SZOT

Okladkę projektował ZYGMUNT ZIEMKA
Redaktor techniczny RYSZARD DĘBICKI

Wykonano z oryginałów tekstowych
dostarczonych przez Zakład Agrofizyki

Wszelkie prawa zastrzeżone. Printed in Poland

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1976.
Nakład: 390 egz. Objętość: ark. wyd. 3,10, ark. druk. 4,50. Papier
offset. kl. III, 70 g, 61×86. Wykonano w lipcu 1976. Wrocławska
Drukarnia Naukowa. Zam. 2163/76 — L-11 Cena zł 22.—

W S T Ę P

Wszystkie właściwości fizyczne, fizyko-chemiczne, chemiczne i biologiczne gleby są zależne od siebie. Nie działają one oddzielnie, lecz tworzą zawsze nierozrwalną całość, a wypadkową ich kompleksowego działania jest aktualny stan gleby, od którego zależy wzrost, rozwój i plonowanie roślin uprawnych. Jednakże wpływ pozostałych elementów siedliska takich jak czynniki klimatyczne, topograficzne, biotyczne i antropogeniczne sprawia, że nie zawsze utrzymywane są korzystne warunki środowiska edaficznego dla rozwoju roślin, jak ma to miejsce w przypadku powstawania skorupy glebowej. Utworzona na powierzchni gleby cienka, zbita warstwa utrudnia kiełkowanie nasion i równomierne wschody, obniża zdolność wymiany gazowej, infiltrację, zwiększa spływ powierzchniowy wody i erozję gleb oraz wywiera bezpośredni, mechaniczny wpływ na całą roślinę. Problem powierzchniowego zaskorupiania się jest ważny dla wielu rodzajów gleb, lecz dotychczas w naukowej literaturze krajowej brak jest wyjaśnienia mechanizmu tworzenia się skorupy oraz szerszego przedstawienia sposobów zapobiegania temu zjawisku. Z przeglądu literatury zagranicznej wynika, że jakkolwiek rozpatrywano wpływ kilku czynników (wilgotność, opady atmosferyczne i symulowane, wpływ cyklicznych procesów nawilżania i osuszania, struktury, substancji organicznej itd.) na pojawienie się skorupy, to dotychczas nie podano całkowitej definicji zjawiska oraz

nie ma ustalonej metodyki badań właściwości, które charakteryzowałyby powstałą skorupę. Brak jest również opracowania metod zwalczania lub też efektywnych sposobów przeciwdziałania powstawaniu powierzchniowego zaskorupiania gleb uprawnych.

Przedstawione opracowanie jest podsumowaniem dotychczasowych wyników badań nad zjawiskiem zaskorupiania i metod zwalczania wytworzonej skorupy glebowej oraz wskazaniem na potrzeby dalszych kierunków badań w tym zakresie.

MECHANIZM POWSTAWANIA SKORUPY GLEBOWEJ

Proces powierzchniowego zaskorupiania się gleb jest ważny dla wielu gleb uprawnych występujących w różnych warunkach klimatycznych (gleby wapniowcowe, laterytowe, halomorficzne, gleby o dużej zawartości frakcji ilastej). Zainteresowanie tym zjawiskiem nie jest nowe. Już w pierwszej książce dotyczącej rolnictwa praktycznego wydanej przez Fitzherbert'a „Boke of Husbandry” wspomniano, że „.....niebezpieczeństwem świeżo zaoranej ziemi jest tworzenie twardej skorupy po ulewnym deszczu”. Rozpowszechnione są poglądy, że wytworzona skorupa jest jednym z głównych czynników ograniczających kiełkowanie roślin, aerację, infiltrację wody oraz że zwiększa spływ powierzchniowy, erozję gleb i parowanie. Nie wszystkie te poglądy zostały potwierdzone przez wyniki doświadczeń przeprowadzonych do chwili obecnej.

W piśmiennictwie polskim spotykamy się z nielicznymi próbami opisu procesu powstawania skorupy glebowej i jej wpływu na rośliny. Najszerszy opis tego zjawiska znajdujemy u Świętochowskiego (87), który stwierdza, że: „Stan gleby, a właściwie jej warstwa powierzchniowa, począwszy od zasiewu pogarsza się pod

wpływem działania czynników atmosferycznych. Deszcz padając na nieosłoniętą przez roślinność powierzchnię gleby rozбивa gruzelki, które w potokach wody zamieniają się na szlam i rozplývają. Jednocześnie przestwory włosowate i większe kanaliki są zamulane drobnym materiałem pyłowym i koloidalnym. Działanie mechaniczne deszczu jest rozmaite, zależy ono zarówno od ilości deszczów, jak i od ich siły. Im wyżej są chmury oraz im większe są krople, tym wyższa jest siła uderzenia. Wiatr i słońce, susząc zamuloną powierzchnię, powodują wytwarzanie się skorupy, przez którą woda siecią kapilarnych kanalików podsiąka ku górze powoli, lecz stale; woda ta, parując na powierzchni skorupy ułatwia się, co powoduje zwiększenie nieużytecznego parowania, a więc stratę. Jednocześnie skorupa, ułatwiając ruch wody ku górze, utrudnia wymianę gazów, gdyż włoskowate pory zatkane wodą podnoszącą się ku górze nie przepuszczają do gleby powietrza atmosferycznego, poruszającego się w normalnych warunkach w przeciwnym kierunku. W ten sposób wymiana gazów zmniejsza się tak, że dochodzi do całkowitego przerwania łączności pomiędzy powietrzem gleby a powietrzem atmosfery. Skład powietrza zmienia się wtedy gwałtownie, maleje procent tlenu, ilość natomiast CO_2 wzrasta stopniowo z 0,3% tak bardzo, że przekracza krytyczną granicę. Z tego powodu przerywają swoje funkcje życiowe bakterie, następnie zaczynają odczuwać nadmiar CO_2 korzenie roślin, przy czym skorupa z dnia na dzień grubieje już nie od deszczu, lecz jedynie pod wpływem rosy i słońca. Szybkość tworzenia się skorupy zależy nie tylko od charakteru gleby, ale również od doprowadzenia roli (zwłaszcza od wielkości gruzełków i ich rozpylenia) oraz od warunków klimatycznych i przebiegu pogody. W klimacie górskim i nadmorskim tworzenie skorupy trwa dłużej niż w klimacie kon-

tymentalnym, a wiatr i słońce działają na proces ten przyspieszająco. Gleby bogate w potas i sól szybciej się zamulają i zaskorupiają niż gleby bogate w wapń i magnez. Przeciwdziałanie naturalnemu, żywiołowemu procesowi wytwarzania się skorupy lub niszczenie skorupy już sformowanej jest jednym z najważniejszych zadań przy pielęgnowaniu roślin".

Nie wszystkie sformułowania podane przez Świętochowskiego są potwierdzone przez wyniki doświadczeń. Opierając się na dotychczasowych badaniach zaskorupiania, możemy szerzej przedstawić pewne współzależności istniejące pomiędzy różnymi czynnikami biorącymi udział w tym procesie oraz pozwalającymi na częściowe wyjaśnienie mechanizmu tworzenia się skorupy.

Zaskorupianie, czyli tworzenie zbitej warstwy bezpośrednio na powierzchni gleby, powstaje w wyniku współdziałania dwu grup czynników:

- 1) czynniki zewnętrzne, które dostarczają energii,
- 2) właściwości fizyczne i chemiczne gleb, na które działają siły zewnętrzne.

Czynniki zewnętrzne

Do tych czynników można zaliczyć niszczące działanie kropel deszczu oraz procesy cyklicznego nawilżania i osuszania gleby.

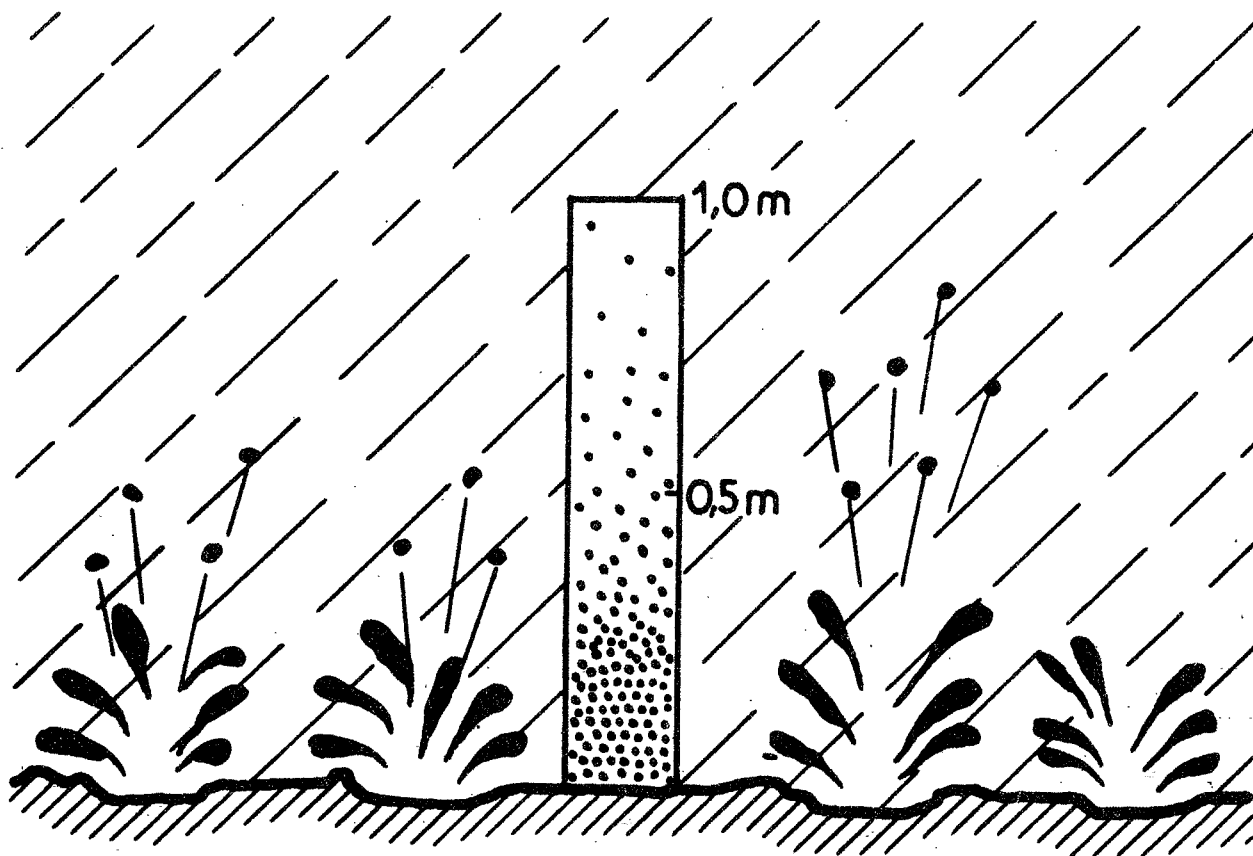
Niszczące działanie kropel deszczu

Dwoma głównymi źródłami energii są: siła uderzeniowa kropel deszczu oraz energia promieniowania słonecznego.

Energia uderzeniowa kropel deszczu, a tym samym ich siła niszcząca, zależy przede wszystkim od wielkości kropli, wysokości chmur, prędkości wiatru, wielkości kąta padania kropli względem

powierzchni gleby oraz od natężenia i czasu trwania deszczu (63, 73). Leon Lyles i in. (63) podają, że dla pewnej frakcji gleby 10 minutowy deszcz symulowany o natężeniu 5,6 cm/godz. posiadał taką samą siłę uderzeniową jak 90 minutowy opad o natężeniu 1,6 cm/godz., przy stałej prędkości wiatru, chociaż objętość wody w drugim przypadku była 2,5 razy większa. Energię uderzeniową każdej kropli deszczu możemy wyliczyć znając jej wielkość i prędkość. Wyliczono, że opad 5,1 cm/godz., padający na 1 akr, przy prędkości 20 mil/godz., posiada wystarczającą energię, aby podnieść 18 cm warstwę gleby na wysokość 90 cm (17). Według Leonarda (87) ciężar jednej kropli waha się od 0,00065 do 0,0065 g. Jeżeli więc na pole pada od 1 kwietnia do 1 lipca około 100 mm deszczu, czyli około 10^5 g/m^2 , to ilość kropel wyniesie od 15 do 150 mln. Ponieważ siła uderzeniowa jednej kropli waha się w zależności od jej wielkości i wysokości chmury od 0,0004 do 1,516 g, więc suma sił uderzeń przez 3 miesiące wyniesie około 100 kg/m^2 czyli 10 g/cm^2 . Uderzenia kropel deszczu o powierzchnię gleby działają przede wszystkim w trojaki sposób: 1) rozluźniają glebę, 2) niszczą gruzełki glebowe, 3) powodują rozbryzg (unoszenie) rozbitych cząstek gleby nawet do wysokości 1 m nad powierzchnię gleby (ryc. 1) oraz ubijanie gleby w jej powierzchniowej warstwie. Na glebie o małej spójności i niskiej wodoodporności struktury, pod wpływem gwałtownego deszczu może ulec rozbiciu około 250 ton gleby na 1 ha (17).

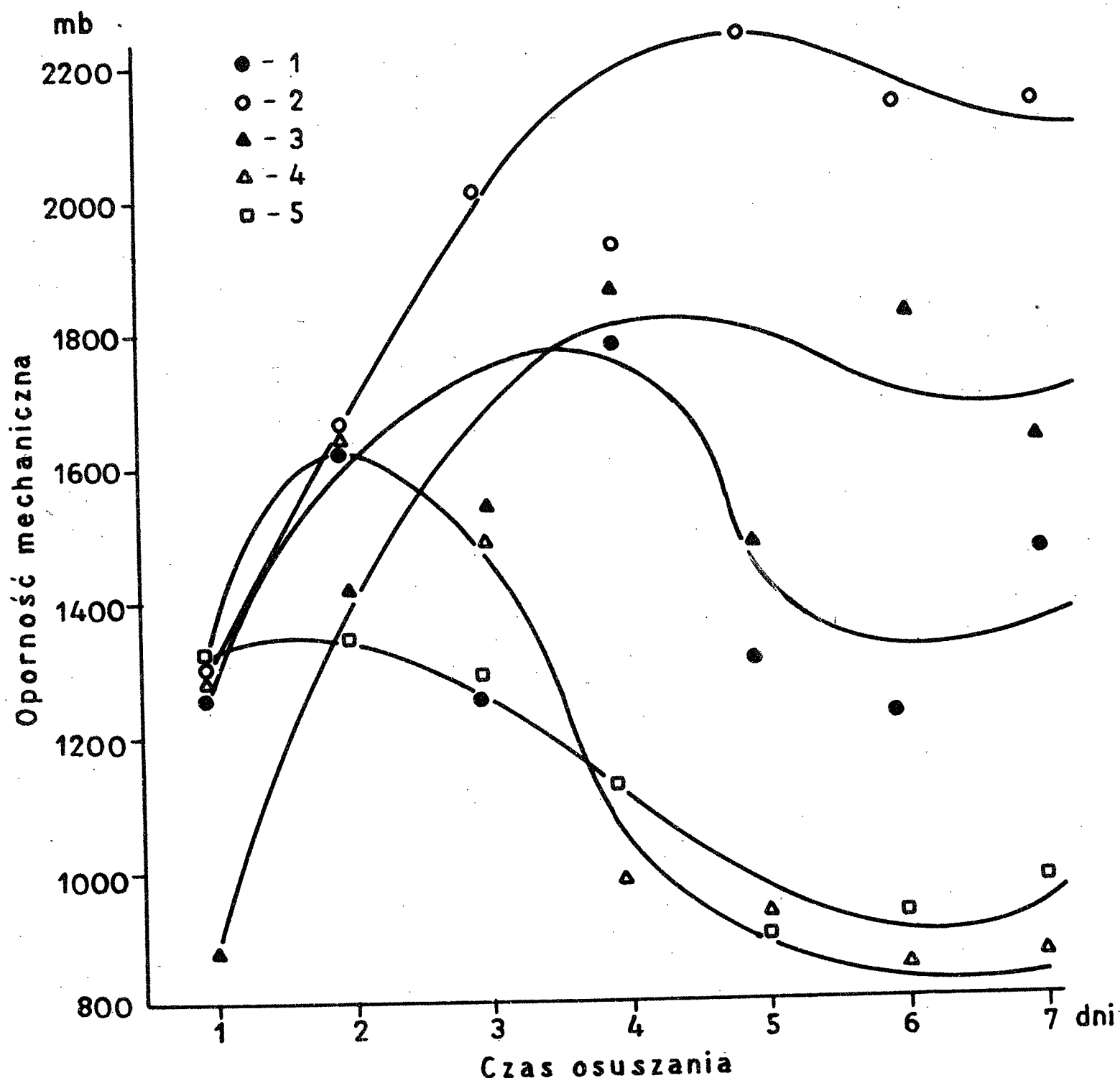
Deszcz o największym natężeniu i największej energii uderzeniowej nie zawsze powoduje powstanie skorupy o maksymalnej oporności mechanicznej (50). Można to wyjaśnić wahaniami powierzchniowego stanu gleby pomiędzy dwoma procesami: tworzenie się zwartej warstwy gleby i zjawisko erozji. Gdy natężenie opadów wzras-



Ryc. 1. Rozbryzg gleby odkrytej podczas silnego deszczu wg Ziernickiego (98)

ta, zwiększa się również energia uderzeniowa kropel, np. deszcz 1,3; 2,5; 5,1 cm/godz. dawał odpowiednio wyższą energię: 325, 656 i 1403 J/m². Po okresie początkowym, w momencie gdy natężenie i ilość opadów przekroczy zdolność infiltracji gleby, rozpoczyna się spływ powierzchniowy. Warstewka wody na powierzchni gleby grubieje przy wyższych natężeniach deszczu, wzrasta energia uderzeniowa, zjawisko to powoduje zwiększenie spływu i wówczas tworzy się słabsza skorupa (75).

Energia uderzeniowa opadów: 2,5 cm/godz. przez 19 minut i 5,1 cm/godz. przez 30 min. wynosiła odpowiednio 207 i 701 J/m². Porównując wyniki uzyskane przy opadach trwających 19, 30 i 60 minut zauważono, że dla większego zróżnicowania oporności mechanicznej skorupy były potrzebne opady dłuższe niż 30 minut (50), (ryc. 2). Wynika stąd, że działanie erozji jest bardziej aktywne po 30 minutach opadu.

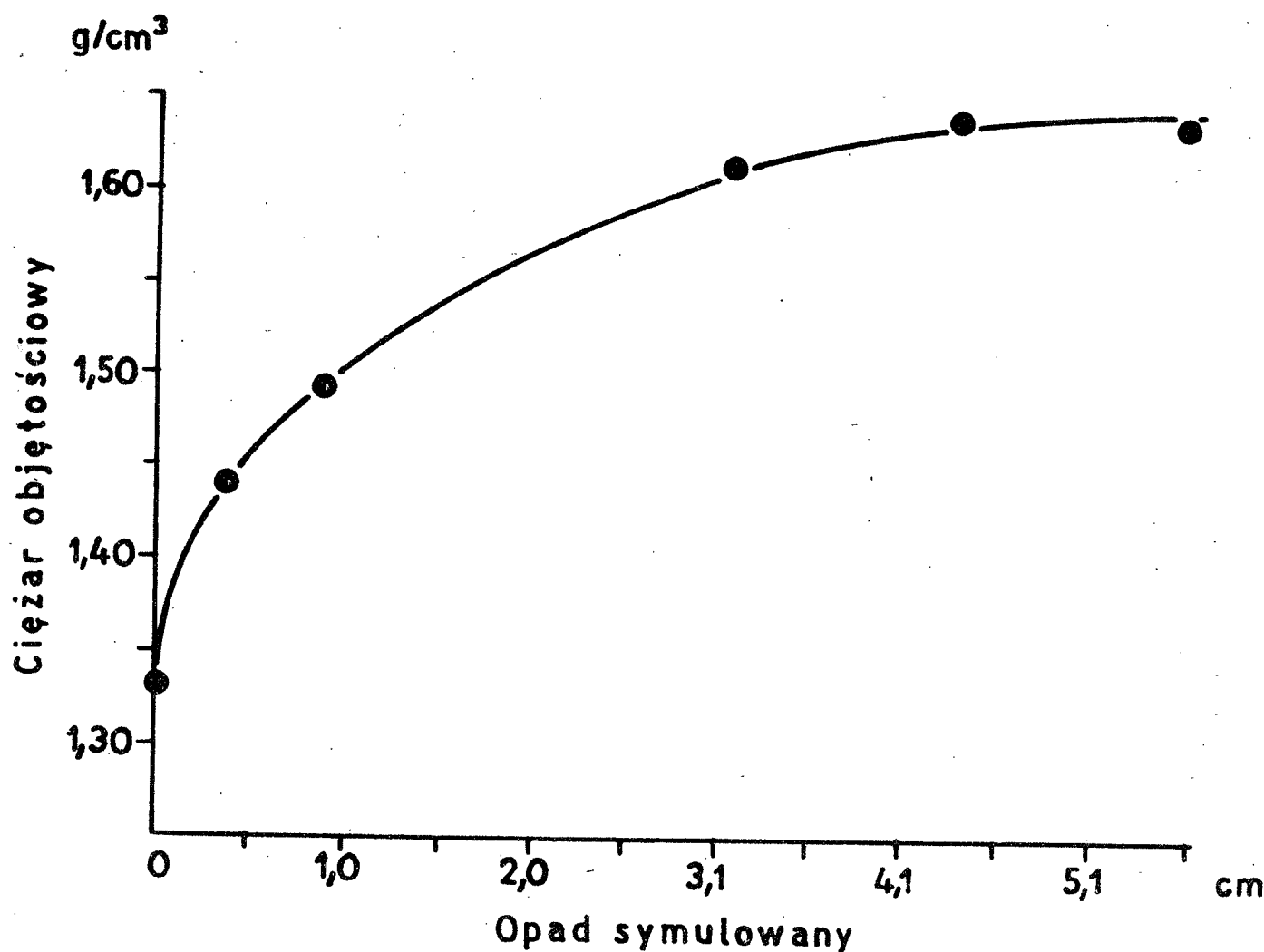


Ryc. 2. Zmiany oporności mechanicznej skorupy w okresie 7 dni osuszania wg Holdera (50)

1 - 1,3 cm/godz.	} przez 1 godz.	4 - 5,1 cm/godz. przez 30 min.
2 - 2,5 cm/godz.		5 - 2,5 cm/godz. przez 19 min.
3 - 5,1 cm/godz.		

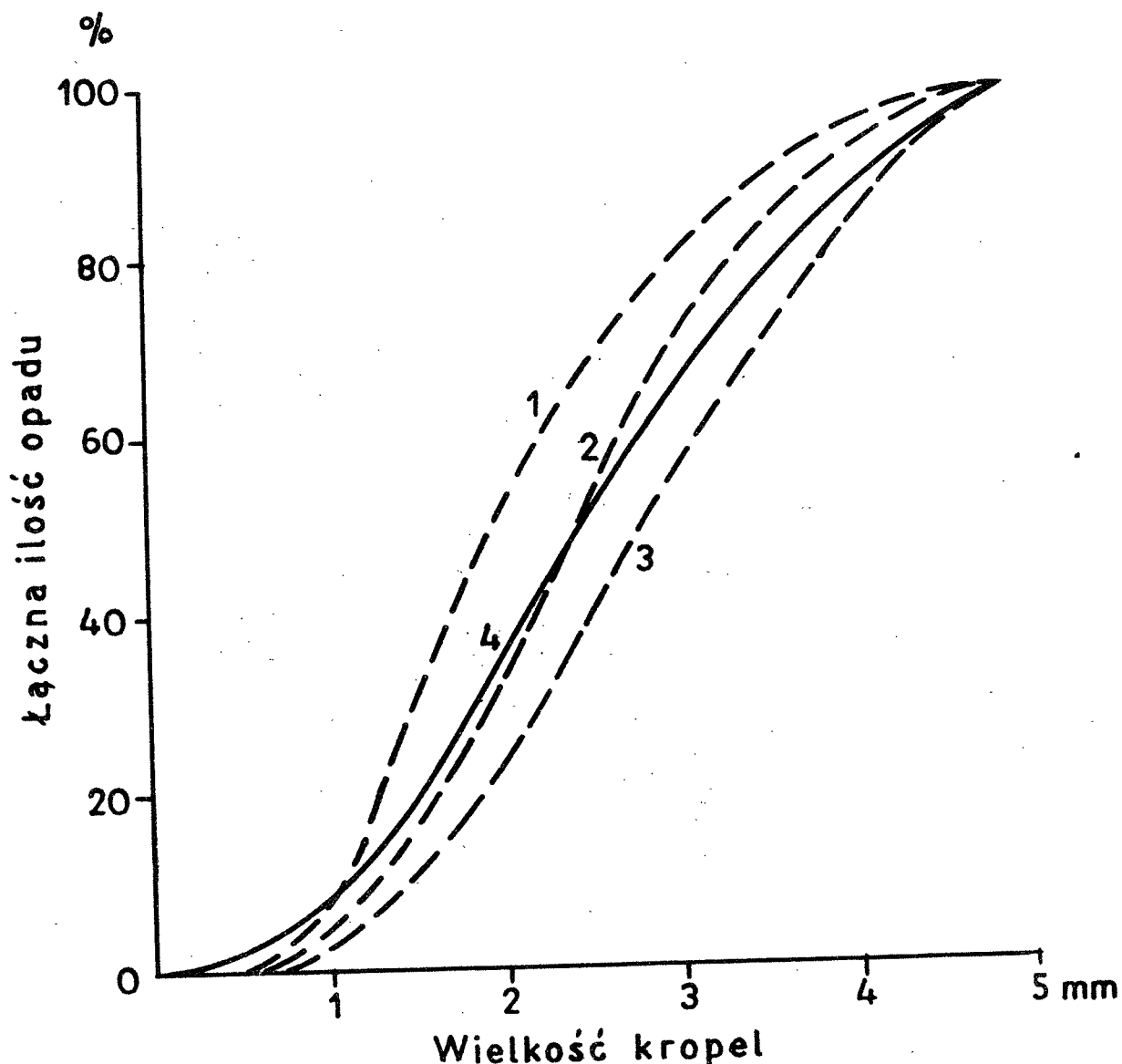
Jest to zgodne ze stwierdzeniem Meyera (68), że przy zastosowaniu stałego natężenia opadów symulowanych dłuższych od 30 minut, wskaźnik erozji (energia kinetyczna $\times$ maksymalne natężenie 30 min.) jest proporcjonalny do energii kinetycznej, tzn. że czas trwania opadów miał większy wpływ na oporność mechaniczną skorupy niż natężenie. Jednakże doświadczenia przeprowadzone

przez Tacketta (88) nie potwierdzają tych wniosków. Podaje on, że poziom zbityści nie zawsze wzrasta wraz ze zwiększającą się ilością opadów, co zresztą potwierdzają dane przedstawione na ryc. 3.



Ryc. 3. Wpływ ilości deszczu symulowanego na zbityść warstwy gleby 0-2,5 cm poziomu B₂ wg Tacketta (88)

Większość doświadczeń nad powstawaniem skorupy powierzchniowej została przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu opadów symulowanych, tzn. sztucznych, przez użycie różnej aparatury, która pozwala otrzymać krople o podobnej wielkości, rozkładzie i energii kinetycznej do kropel deszczu naturalnego. Wyniki doświadczeń przeprowadzonych przez Leona Lylesa (63) potwierdzają słuszność użycia symulowanego deszczu do badań zjawiska zaskorupiania (ryc. 4). Wprawdzie warunki tworzenia skorupy w laboratorium różnią się od polowych, ale McIntyre (67)



Ryc. 4. Porównanie rozkładu wielkości kropeł deszczu naturalnego i symulowanego wg Lylesa (63). 1-3 - Opad naturalny (1 - 1,27 cm/godz., 2 - 2,54 cm/godz., 3 - 5,08 cm/godz.), 4 - Opad symulowany

stwierdza, że właściwości tak wytworzonej skorupy prawdopodobnie nie różnią się od skorup naturalnych.

Poznanie zależności pomiędzy energią uderzeniową kropeł deszczu, a więc czynnikiem najważniejszym w procesie zaskorupiania, a stopniem zniszczenia gleby na powierzchni pozwoliło na przedstawienie mechanizmu powstawania skorupy glebowej. Według McIntyre (67) gwałtowne zmiany, powstające w powierzchniowej warstwie gleby pod działaniem kropeł deszczu, można ująć w cztery kolejno po sobie następujące procesy:

1) Szybkie nawilżanie wywołuje niższe siły kohezji, tym samym rozluźnienie gleby, rozbicie mechaniczne gruzełków, a także

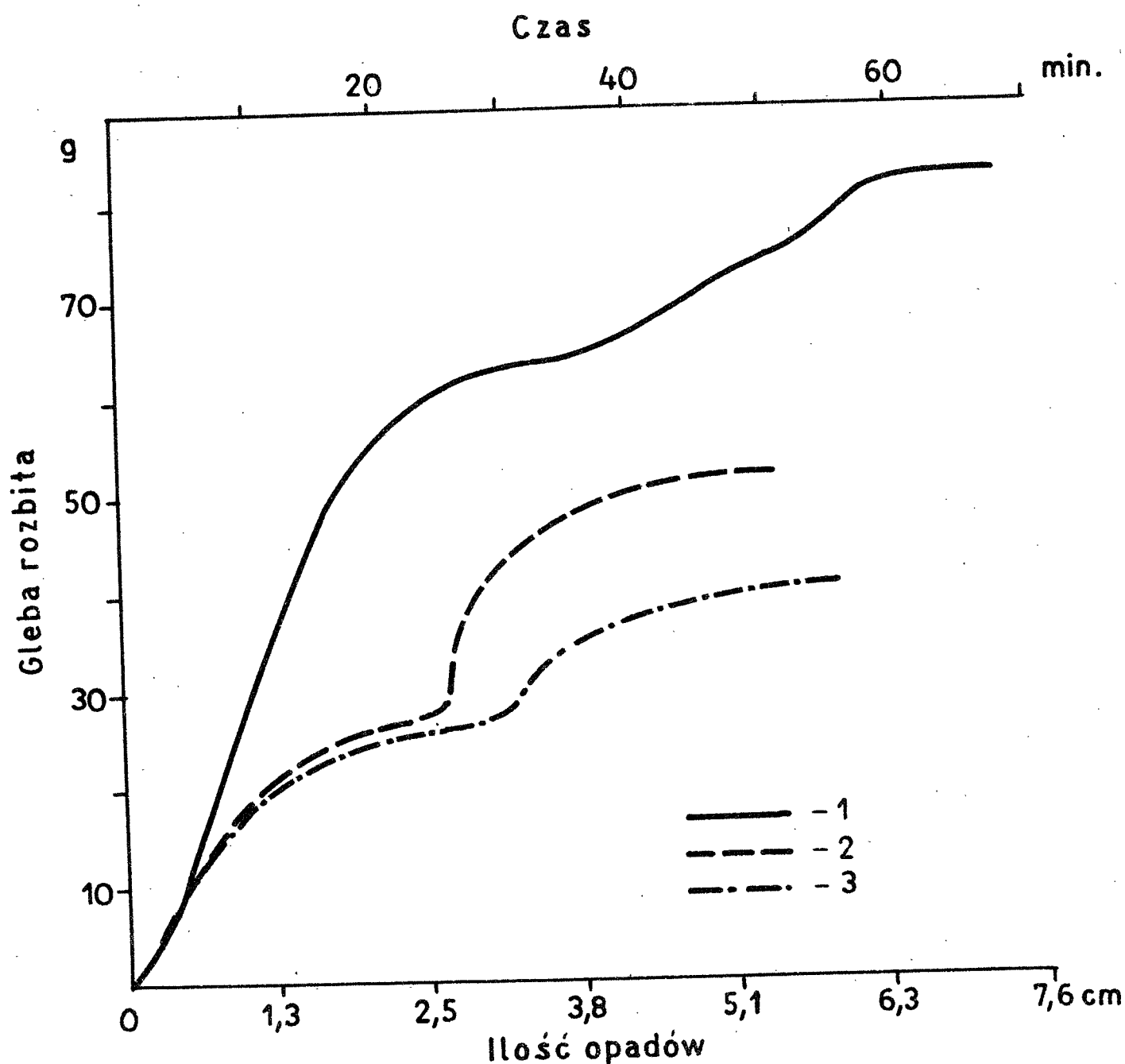
rozpad gruzełków w wyniku rozrywającego działania powietrza zamkniętego przez wodę wewnątrz agregatów i przez rozmycie.

2) Przenoszenie rozdrobnionych cząstek glebowych w głąb profilu do głębokości kilku milimetrów i osadzanie go w porach. Powoduje to zmniejszenie objętości porów, przy czym następuje charakterystyczna orientacja cząstek iłu w warstwie grubości 2-3 mm, którą McIntyre określa jako „strefa wmywania”.

3) Następuje zwiększenie zbitości warstwy powierzchniowej po rozbiciu gruzełków i utworzenie cienkiej warstewki (otoczki) na powierzchni gleby o grubości 0,1 mm, która ogranicza dalszą infiltrację wody, ruch cząstek glebowych w głąb i blokowanie porów.

4) Na powierzchni tej 0,1 mm otoczki gromadzi się woda, rozpoczyna się turbulentny jej ruch pod działaniem uderzającym kropel deszczu, który powoduje częściowe zniszczenie powstałej otoczki i strefy wmywania. Infiltracja zwiększa się i ponownie następuje osadzanie cząstek gleby z zawiesiny. Proces ten może następować cyklicznie aż do chwili, gdy usunięta otoczka nie powoduje zwiększonej szybkości infiltracji. W tym stadium szybkość rozbicia będzie stała (ryc. 5).

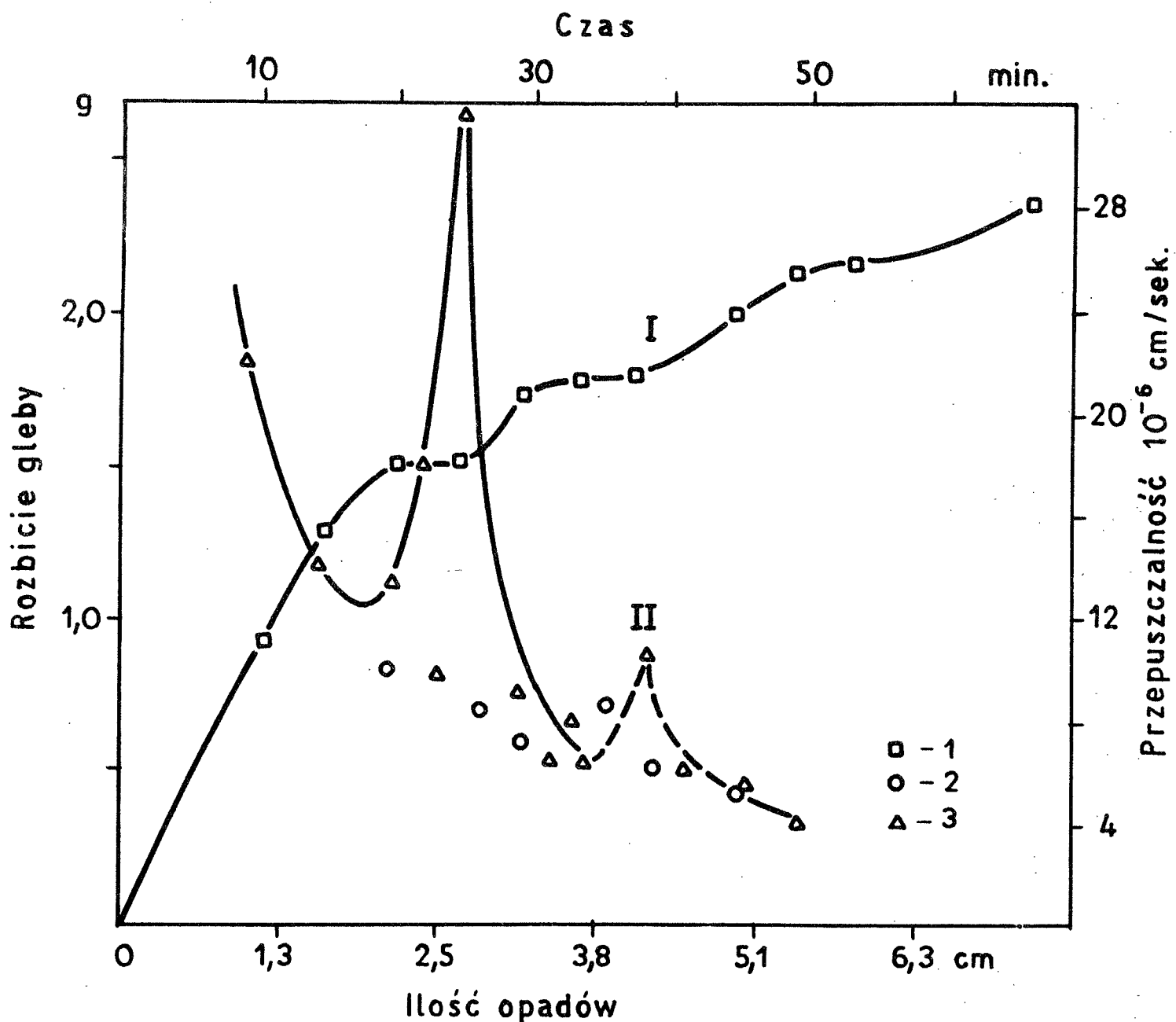
Dla wszystkich gatunków gleb najważniejszymi procesami, wg McIntyre, są: ubijanie warstwy powierzchniowej oraz wmywanie drobnych cząstek w głąb. Hipotezę tę wydają się potwierdzać dane przedstawione na ryc. 6, gdzie krzywa ilości rozbicia gleby w czasie oraz krzywa przepuszczalności wskazuje, że obniżeniu szybkości rozbicia towarzyszy zmniejszenie przepuszczalności, a gwałtowny wzrost przepuszczalności otrzymano w momencie usunięcia powierzchniowej otoczki przez ruchy turbulentne wody oraz zwiększenie szybkości rozbicia.



Ryc. 5. Zależność rozbitcia gleby od ilości i czasu trwania opadów, natężenie opadów 6,6 cm/godz. wg McIntyre (67).
1. Ugór, 2. gleba w płodozmianie 4-polowym, 3. gleba w płodozmianie 2-polowym

Należy rozpatrzyć również zależności pomiędzy szybkością tworzenia się skorupy, a stanem struktury i agregacji kilkumilimetrowej powierzchniowej warstwy gleby. Zmiany w uwilgotnieniu gleby wpływają na zmianę stanu agregacji i następują one nie tylko w wyniku działania deszczu, ale również przy zastosowaniu innych sposobów nawilżania.

Rozpad agregatów powodowany jest nie tylko energią uderzeniową deszczu, ale również przez wymywanie substancji cementujących, obniżenie kohezji cząstek glebowych, nierównomierne pęcz-



Ryc. 6. Zależność rozbicia gleby i przepuszczalności od ilości i czasu trwania opadów przy zabezpieczaniu i odprowadzaniu gleby rozbitej, natężenie opadów 6,6 cm/godz. 1 - energia zerowa kropli, 2 - zatrzymywanie gleby rozbitej, 3 - energia kropli równa końcowej energii kropli o $\varnothing$ 2 mm, I - rozbicie gleby, II - przepuszczalność, wg McIntyre (67)

nienie agregatów (heterogeniczność materiału glebowego) itd. (11,17). Mazurak i Mosher (64,65) podają, że rozbicie agregatów przez deszcz symulowany było uzależnione od wielkości tych agregatów. Maksymalną szybkość rozbicia otrzymano dla cząstek o średnicy 150 μ i agregatów 2000 μ . Prawdopodobnie obniżona szybkość rozbicia cząstek wielkości pyłu powstała ze zwiększenia kohezji, a nie absorpcji dużej energii uderzeniowej kropel deszczu przez cienką otoczkę wody pokrywającą powierzchnię (64). Rose (83,84)

i Mazurak (65) zanotowali istotne obniżenie szybkości rozbicia dla dużych agregatów glebowych. Jednakże wyniki przedstawione przez tych badaczy należy interpretować ostrożnie, ponieważ ich pomiary rozbicia gleby mogą zawierać w sobie wielkości rozbicia gleby wewnątrz makroporów warstwy agregatowanej. Moldenhauer i Koswara (69) podają, że obniżenie średnicy frakcji agregatów z 30000μ do 8000μ wywołuje największe straty w agregatach o średnicy $2000-500\mu$. Generalnie należy stwierdzić, że stopień degradacji gleby i grubość warstwy ulegającej wpływom sił zewnętrznych uzależnione są od kilku czynników glebowych, a tym samym zależy od nich stopień zaskorupienia gleby (56,70,83,84,85). Rozkład wielkości agregatów w warstwie powierzchniowej decyduje także o grubości strefy wmywania, tj. drugiej warstwy składowej wytworzonej skorupy. Doświadczenia McIntyre (67) wykazały, że warstwa ta jest grubsza na glebach uprawnych niż na glebie ugorowanej. Ponadto możliwe, że w glebie o trwałej strukturze powstaje tylko pierwsza warstwa grubości $0,1\text{ mm}$, która obniża przepuszczalność, nie istnieje natomiast poziom wmywania. Również spływ powierzchniowy i wystąpienie erozji są możliwe tylko na glebach ulegających szybkiemu rozbiciu, gdy nastąpi całkowite zapełnienie porów przez materiał glebowy. Zjawisko spływu powierzchniowego występuje szybciej na glebach uprawnych o większej zawartości frakcji ilastych (69,70).

Powstawanie skorupy glebowej w wyniku cyklicznych procesów nawilżania i osuszania

Z przeglądu literatury wynika jednak, że mechaniczne niszczenie struktury wierzchniej warstwy gleby przez deszcz nie jest jedynym czynnikiem zewnętrznym powodującym tworzenie się skorupy

pod działaniem energii radiacji. Powstaje ona również w wyniku rozmywania i rozpadania się nietrwałych gruzełków glebowych, podczas cyklicznych naturalnych procesów nawilżania i osuszania (28,42,46,50,62). Hillel, (46) oceniając wpływ procesów nawilżania (podsiąk kapilarny na glebach lessowych w warunkach klimatu suchego) na tworzenie skorupy glebowej, stwierdził, że istnieje zależność pomiędzy zmianami porowatości, a więc i stopnia zbityści, wynikającymi z procesów: nawilżanie - osuszanie, a stopniem nawilżania. Zależność tą autor opisuje wzorem:

$$\frac{\Delta V}{V_w} = \frac{D_f - D_o}{D_f \cdot D_o \cdot W},$$

gdzie:

ΔV - zmiana porowatości początkowej,

V_w - objętość porów zajętych przez wodę w jednostce masy gleby,

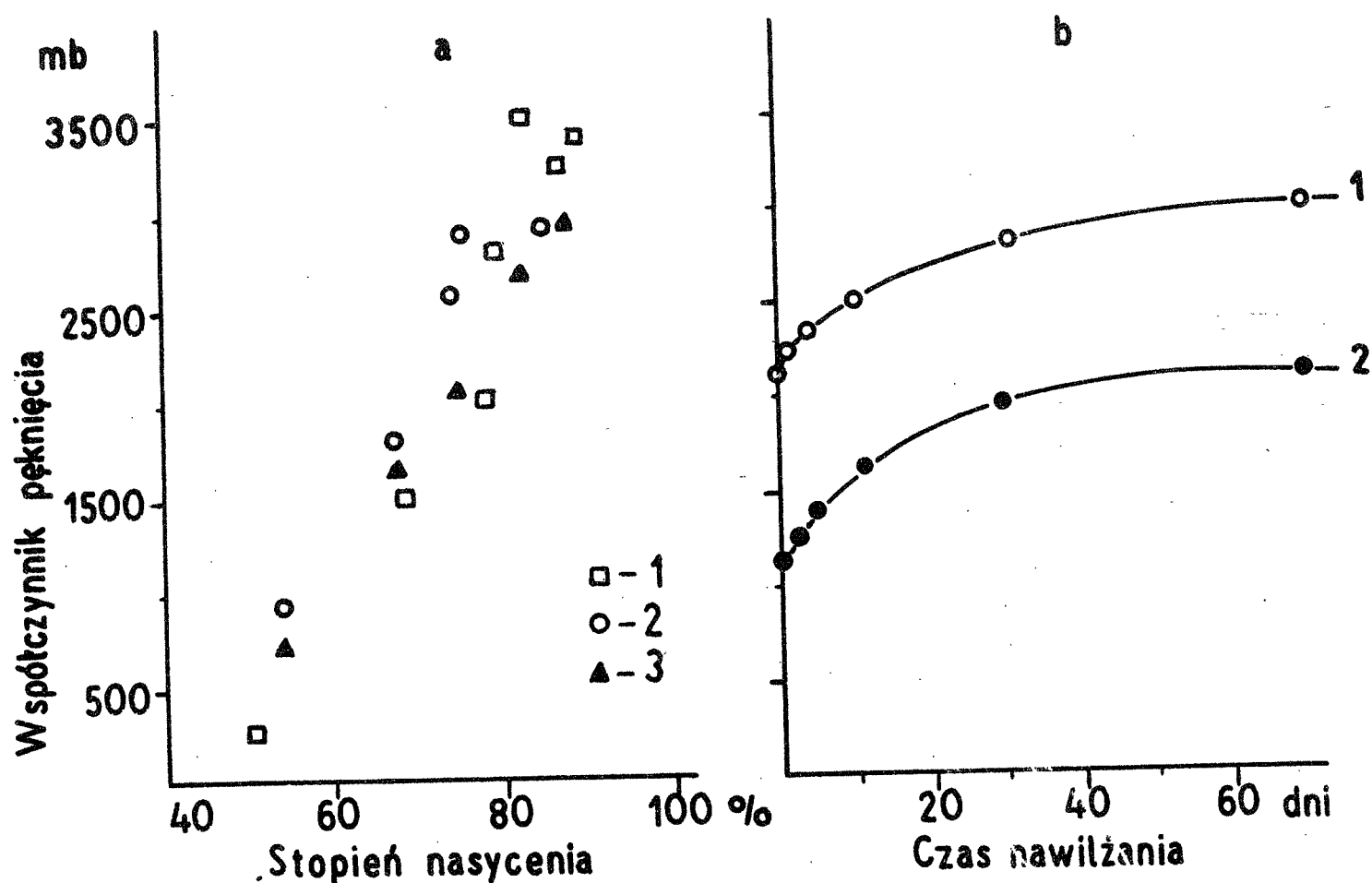
D_f - ciężar objętościowy końcowy,

D_o - ciężar objętościowy początkowy,

W - zawartość wody przy nawilżaniu.

Skłonność gleb do zaskorupiania wzrasta wraz ze zbliżaniem się poziomu wilgotności do stanu nasycenia, a oporność mechaniczna skorupy powiększa się także ze wzrostem czasu trwania nawilżania (ryc. 7a i b).

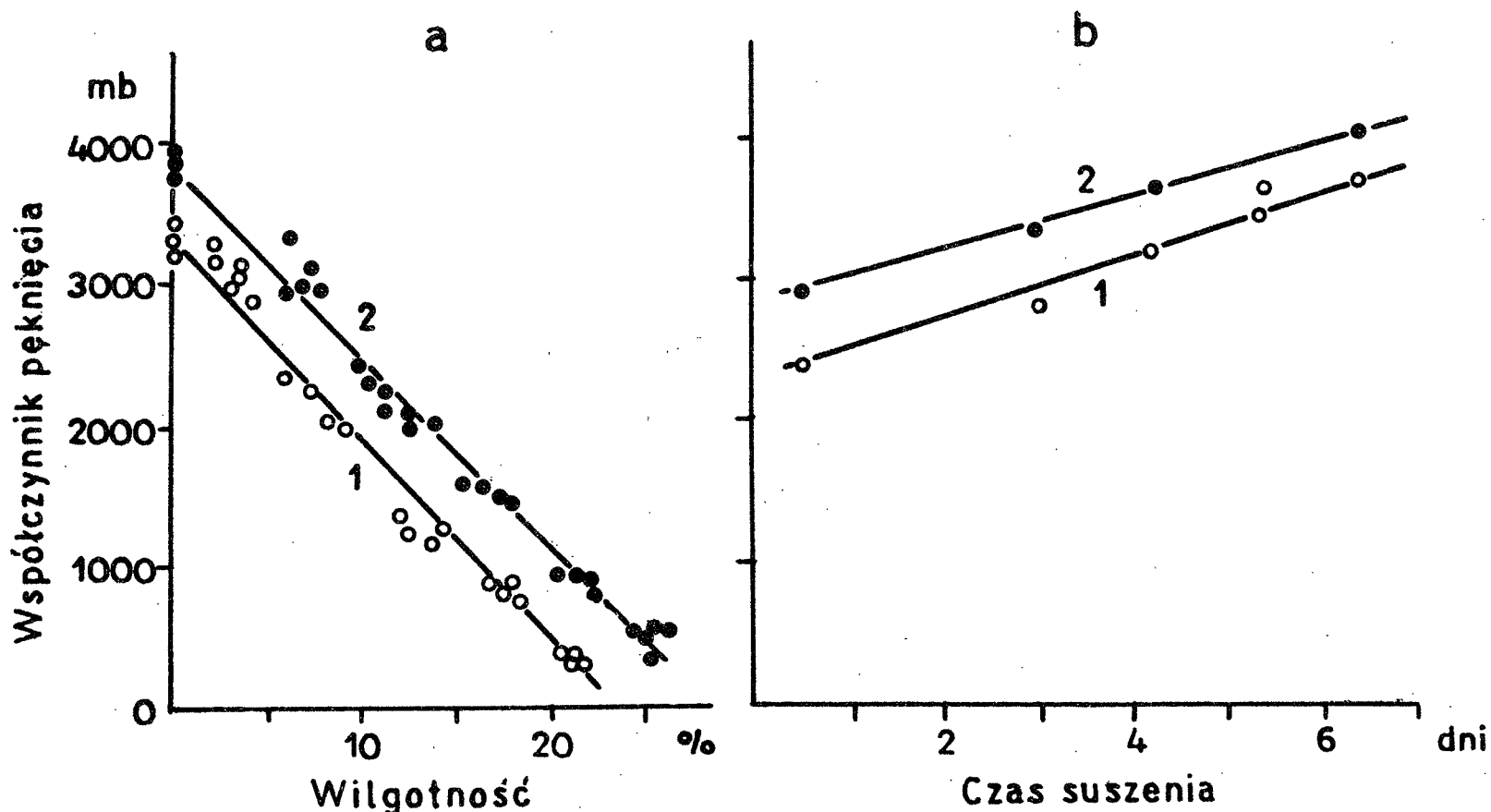
Według Hillela największe zmiany strukturalne zachodzące w procesie powstawania skorupy są wynikiem nasycenia warstw wierzchnich gleby w czasie wsiąkania wody. Zgodność pomiędzy porowatością początkową gleby, rozkładem wilgotności podczas infiltracji, a stopniem zagęszczenia mierzonym po osuszeniu daje podstawę do utożsamienia strefy zaskorupienia gleby ze strefą nasycenia. Istnieje również korelacja pomiędzy stopniem nasyce-



Ryc. 7. Zależność wytrzymałości mechanicznej skorupy, określanej współczynnikiem pęknięcia, od: a) stopnia nasycenia gleby lessowej (1-3 - powtórzenia), b) czasu nawilżania gleby: 1) rozpylonej, 2) strukturalnej, wg Hillela (46)

nia przy zwilżaniu a stopniem zagęszczenia przy osuszaniu. Wskazuje to na możliwość określania strefy zaskorupiania na podstawie strefy nasycenia gleby w procesie infiltracji. Podczas nawilżania następuje osłabienie struktury i jej układu, wynikiem tego jest jej osiadanie. Tworzy się w ten sposób warstwa o większej gęstości, której oporność mechaniczna zwiększa się przy osuszaniu. Niektórzy badacze (13,46) podają, że stopień zaskorupienia gleb oraz wytrzymałość mechaniczna skorupy wzrasta z jednostajnym, powolnym osuszaniem i jest odwrotnie proporcjonalna do wilgotności skorupy (ryc. 8a i b).

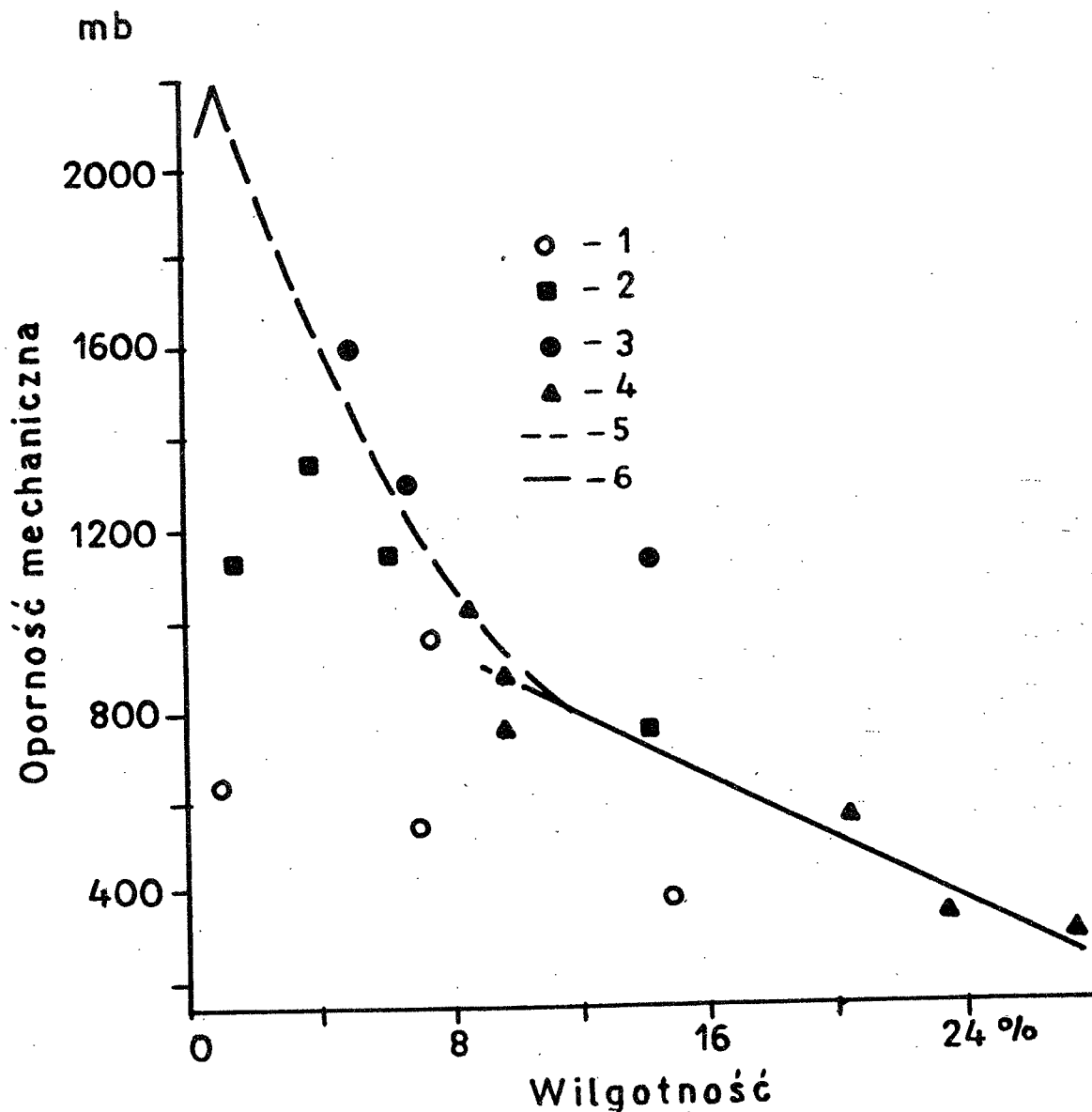
Dane przedstawione przez Holdera i innych na ryc. 2 wskazują, że wytrzymałość mechaniczna skorupy zmienia się w kolejnych 7 dniach suszenia od 28 do 42%, podczas gdy w pierwszych 3 dniach



Ryc. 8. Wpływ osuszania na wytrzymałość mechaniczną skorupy na glebie lessowej: a) wpływ stopnia wysuszenia na wytrzymałość skorupy, b) wpływ szybkości wysuszenia na wytrzymałość skorupy gleby lessowej: 1) strukturalnej, 2) rozpylonej, wg Hillela (46)

zmieniała się tylko od 19 do 25%, a od 4 dnia 10–13%. Dane te sugerują, że zmienność wytrzymałości skorupy w pierwszym okresie związana była z zawartością wody w skorupie, przy czym maksymalne wartości uzyskano przy 2,8 i 3,2% wilgotności. Druga połowa okresu suszenia charakteryzowała się obniżonymi i zmiennymi wartościami wytrzymałości skorupy, co prawdopodobnie wynikało z osłabienia skorupy przez mikropełknięcia powstałe podczas kurczenia się gleby. Dla wyjaśnienia zależności istniejących pomiędzy wytrzymałością mechaniczną skorupy a jej wilgotnością przedstawiono również wykres Arndta (ryc. 9).

Z wykresu tego można wnioskować, że wartości wytrzymałości skorupy dla zakresu wilgotności pomiędzy „pojemnością polową, a stałym punktem więdnięcia” są w liniowej zależności z wilgot-



Ryc. 9. Zmiany wytrzymałości mechanicznej skorupy jako funkcja jej wilgotności - glina piaszczysta, wg Arndta (7), 10,2 cm/godz. przez 10 min.

- | | | |
|-----------|-------------|----------------------------|
| 1. 1,3 cm | } głębokość | 4. 2,5 cm - głębokość, |
| 2. 2,5 cm | | 5. - - krzywa proponowana, |
| 3. 3,8 cm | | 6. — linia regresji |

nością. Zaskakujący może być fakt, że poniżej punktu więdnięcia nie stwierdził autor zależności liniowej, ale wynika to z tego, że skorupa posiada jeszcze wystarczającą wilgotność, aby przy dalszym osuszaniu powstawała większa wytrzymałość. Potwierdzają to również wyniki badań Holdera (50), że wytrzymałość skorupy dla poszczególnych gleb i metod jej wytwarzania zależy bezpośrednio od zawartości wody w skorupie i nie zależy od szybkości wysychania, a więc od szybkości parowania z powierzchni. Jest to dyskusyjne i niezgodne z wynikami przedstawianymi przez Car-

nesa (18), Lemos (62), Hillela (46), Hanksa (42) i in., którzy podają, że wartości wytrzymałości skorupy są wprost proporcjonalne do czasu trwania i temperatury suszenia skorupy glebowej.

Lemos (62) określił także wpływ kolejnych procesów nawilżania i osuszania na wytrzymałość mechaniczną skorupy (tab. 1).

Tabela 1. Wpływ kolejnych cykli nawilżania i osuszania na wartość współczynnika pęknięcia i objętość gleby wg Lemos (62)

Liczba cykli	Współczynnik pęknięcia, mb	Objętość próbki gleby, cm ³
1	123	19,6
2	50	20,7
3	33	22,0

Również temperatura suszenia ma znaczny wpływ na wartości wytrzymałości mechanicznej skorupy, np. współczynnik pęknięcia dla gleby „Cecil” zawierającej 10,4% iłu i 15,6% pyłu, wynosił w temperaturze pokojowej 156 mb, ale już 132 mb w temperaturze 105°C (62). Podobne wyniki uzyskali w swoich badaniach Gerard i in. (34).

Czynniki glebowe

Spośród czynników glebowych wpływających na zaskorupienie gleb należy wymienić: skład mechaniczny, zawartość substancji organicznej, wilgotność gleby oraz zawartość kationów wymiennych.

Skład mechaniczny

Skład mechaniczny warstwy powierzchniowej odgrywa również ważną rolę w tworzeniu skorupy; determinuje on wytrzymałość mechaniczną skorupy, częstotliwość i szerokość pęknięć przy wysu-

szaniu (7,42,62). Duley (25) podaje, że skorupa może tworzyć się na wszystkich glebach przy dowolnej teksturze z wyjątkiem gruboziarnistych piasków z granicznie niską zawartością iłu i pyłu. Gorbunow i in. (38) stwierdzają, że wielkość zaskorupienia gleb zależy w dużej mierze od ilości cząstek glebowych $< 0,001$ mm, zawartości substancji organicznej oraz typu minerałów w glebie. Według Lemosy (62), wytrzymałość skorupy zależy w większym stopniu od zawartości pyłu niż od innych frakcji mechanicznych, natomiast według Hanksa (42) wytrzymałość determinowana jest przez zawartość iłu i charakter minerałów przeważających w glebie (tab. 2).

Skład mechaniczny warstwy zaskorupionej różni się od składu warstwy gleby leżącej poniżej (tab. 3).

Substancja organiczna

Wielkie znaczenie i wpływ na odporność struktury gleby, na destrukcyjne działanie kropel deszczu ma substancja organiczna gleby, co zostało potwierdzone wieloma doświadczeniami (38,42) i jest ciągle podkreślane w literaturze przy omawianiu struktury. Wyniki przedstawione w tab. 4 wskazują, że istnieje ewidentny wpływ zawartości substancji organicznej na wytrzymałość mechaniczną skorupy. Współczynnik pęknięcia wzrasta od 2 do 20 razy przy usunięciu substancji organicznej z gleby. Jest zadziwiające, że warstwa poduprawna o dużej zawartości kaolinitu, a niskiej zawartości frakcji organicznej, wykazuje wielkie zmiany w oporności mechanicznej. Wydaje się, że działanie H_2O_2 spowodowało nie tylko usunięcie substancji organicznej, ale również i inne zmiany, jednakże Hanks (42) nie wyjaśnia tego procesu. Ponadto, według autora, przed usunięciem substancji organicznej nie ma

Tabela 2. Wpływ składu mechanicznego i typu frakcji ilastej na wartości współczynnika pęknięcia i ciężar objętościowy wg Lemosa (62)

Gleba i poziom	Typ mine- rału	F r a k c j e m e c h a n i c z n e %							Współ- czynnik pęknię- cia mb	Ciężar obję- tościowy g/cm ³
		il	pył	piasek b. drobny	piasek drobny	piasek średni	piasek gruby	piasek b. gruby		
Cecil A	1 : 1	10,4	15,6	17,1	37,4	10,1	5,0	4,4	94	1,35
Cecil B	1 : 1	49,3	24,2	3,0	11,9	9,5	1,7	0,4	170	1,10
White Store A	2 : 1	5,7	23,4	13,1	15,0	15,6	17,8	9,4	143	1,40
White Store B	2 : 1	26,3	46,5	7,4	8,6	9,4	1,7	0,1	589	1,52
George- ville A	1 : 1	22,5	62,5	5,4	3,0	2,3	1,6	2,7	417	1,32
Davidson B	1 : 1	60,6	33,2	1,9	1,5	1,1	0,8	0,9	267	1,38

Tabela 3. Skład mechaniczny, ciężar objętościowy i wilgotność skorupy naturalnej i gleby leżącej poniżej wg Lemosy (62)

Frakcje mechaniczne %	Cecil		White Store		Mayodan	
	skorupa	gleba	skorupa	gleba	skorupa	gleba
Ił	11,0	10,4	6,9	5,7	7,6	8,1
Pył	17,4	15,6	25,1	23,4	30,7	27,0
Piasek b. drobny	20,4	17,1	14,5	13,1	10,6	8,6
Piasek drobny	33,5	37,4	14,5	15,0	10,2	10,8
Piasek średni	8,0	10,1	15,2	15,6	13,5	15,0
Piasek gruby	4,8	5,0	16,0	17,8	17,4	19,8
Piasek b. gruby	4,9	4,4	7,7	9,4	10,0	10,7
Ciężar objętościowy g/cm ³	1,47	1,19	1,43	1,18	1,42	1,13
Wilgotność %	1,70	4,30	1,00	4,20	1,70	5,20

Tabela 4. Wpływ substancji organicznej zawartości frakcji ilastej pylastej na wartość współczynnika pęknięcia wg Hanksa (42)

Typ gleby	Pył %	Ił %	Przeważający typ minerału	Współczynnik pęknięcia mb.	
				przed usu- nięciem substancji organicznej	po usu- nięciu
Glina piaszczysta	10	15	illit	300	4290
Glina Keith	35	25	montmorylonit	490	6170
Glina ilasto-piaszczysta	20	30	illit	2400	6310
Glina ilasta	45	40	montm. + Illit	2150	7010
Glina Ladysmith	35	60	montmorylonit	560	10670
Glina kaolinowa (warstwa podorna)	30	60	kaolinit	4720	12020

wyraźnej zależności pomiędzy wartością współczynnika pęknięcia a zawartością iłu. Zależność tę wykazano dopiero po usunięciu frakcji organicznej.

Wilgotność gleby w czasie oddziaływania czynników zewnętrznych wywołujących zaskorupianie

Zawartość wody w glebie, w momencie oddziaływania sił zewnętrznych powodujących powstawanie zbitej warstwy powierzchniowej, ma istotny wpływ na właściwości skorupy. Lemos (62) podaje, że gdy w momencie końcowym procesu nawilżania gleby zawartość wody wzrasta sukcesywnie od 10 do 40% to powiększa się również wartość współczynnika pęknięcia od 206 do 280 mb. Natomiast jeżeli ilość wody wzrasta do 60%, wtedy występuje już zjawisko zbrylania gleby (ang. puddling), a wartość współczynnika powiększa się 15-krotnie i wynosi 3486 mb. Badania Cernudy (19) wykazały, że pod działaniem deszczu łatwiej ulegają rozbiciu agregaty o mniejszej wilgotności w momencie uderzenia kropel

(oprócz próbek, w których było pełne nasycenie), niż agregaty o zawartości wody w granicach pF 2,0 i 4,2. Dokładniejsze dane przedstawił Hanks (42). Wynika z nich, że wysoka wytrzymałość skorupy jest skorelowana z wysoką wilgotnością gleby w czasie jej tworzenia, tzn. w momencie rozpoczęcia procesu osuszania pod wpływem energii radiacji. Hanks zaobserwował również zależność pomiędzy siłą zaskorupienia gleby a jej wilgotnością w momencie uderzenia kropel deszczu o powierzchnię, ale nie wyjaśnia tego zjawiska (tab. 5).

Tabela 5. Wpływ wilgotności gleby w momencie zastosowania opadów na wartości współczynnika pęknięcia wg Hanksa (42)

Typ gleby	Współczynnik pęknięcia w milibarach	
	gleba powietrznie sucha przed opadem	nawilżanie kapilarne
Gлина drobno-пiaszczыста	530	360
Gлина иласто-пiaszczыста	690	560
Gлина пыlasta	450	300
Gлина иласто-пыlasta	700	410

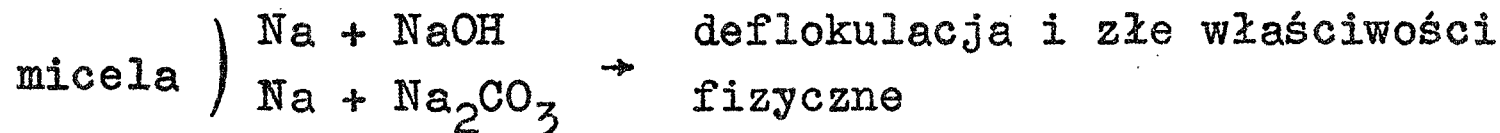
Przedstawione wyniki wskazują, że wytrzymałość skorupy dla wszystkich badanych gleb była większa, gdy gleba doprowadzona była do stanu powietrznie suchego przed zastosowaniem deszczu. Potwierdzają to również prace Gorbunowa i in. (38,46), którzy radzą ponadto, by dla zmniejszenia zaskorupienia gleby nawadniać ją przed spodziewanymi opadami. Wydaje się, że jedną z przyczyn wyżej opisanego zjawiska jest większy stopień zniszczenia struktury i agregatów glebowych w wyniku gwałtownego nawilżania i nasycania, gdzie pod wpływem zwiększonego ciśnienia powietrza w agregatach następuje eksplozja i rozpad agregatów na drobne cząstki, które ulegają dalszemu przemieszczaniu i rozmywaniu.

Dodatni wpływ kationów wymiennych wapnia i wodoru na strukturę gleb uprawnych jest dobrze znany. Działają one przede wszystkim pośrednio, modyfikując wpływ innych czynników strukturotwórczych (szybszy rozkład substancji organicznej i powstawanie próchnicy, uaktywnianie sił biologicznych gleby itd). Aczkolwiek zdolność flokulacyjna kationów waha się w zależności od rodzaju koloidu, na który działają, ale można ułożyć je według następującej kolejności: Ca i $\text{H} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$ (11). Ponieważ kompleks sorpcyjny gleb polskich jest przeważnie wysycony kationami Ca^{++} i H^+ , stąd też deflokulacja cząstek glebowych powodowana przez jony Na^+ ma znacznie mniejsze znaczenie niż dla gleb halomorficznych, w których jony Na^+ stanowią jeden z najważniejszych czynników powodujących niestabilność agregatów, powstawanie skorupy i wytwarzanie warunków niekorzystnych dla uprawy roślin. Jednakże jony soli sodowych nie we wszystkich glebach alkalicznych oddziałują jednakowo i Baver (11) schematycznie przedstawił te zależności następująco:

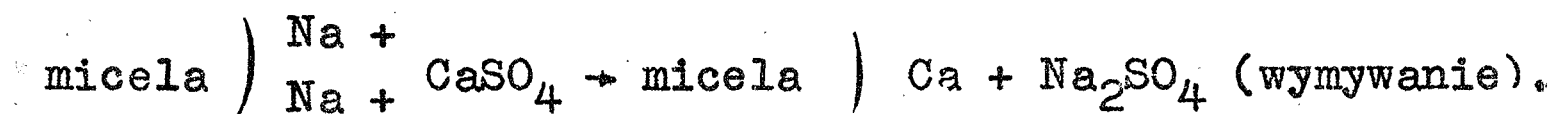
1) gleby alkaliczne białe:



2) gleby alkaliczne czarne:



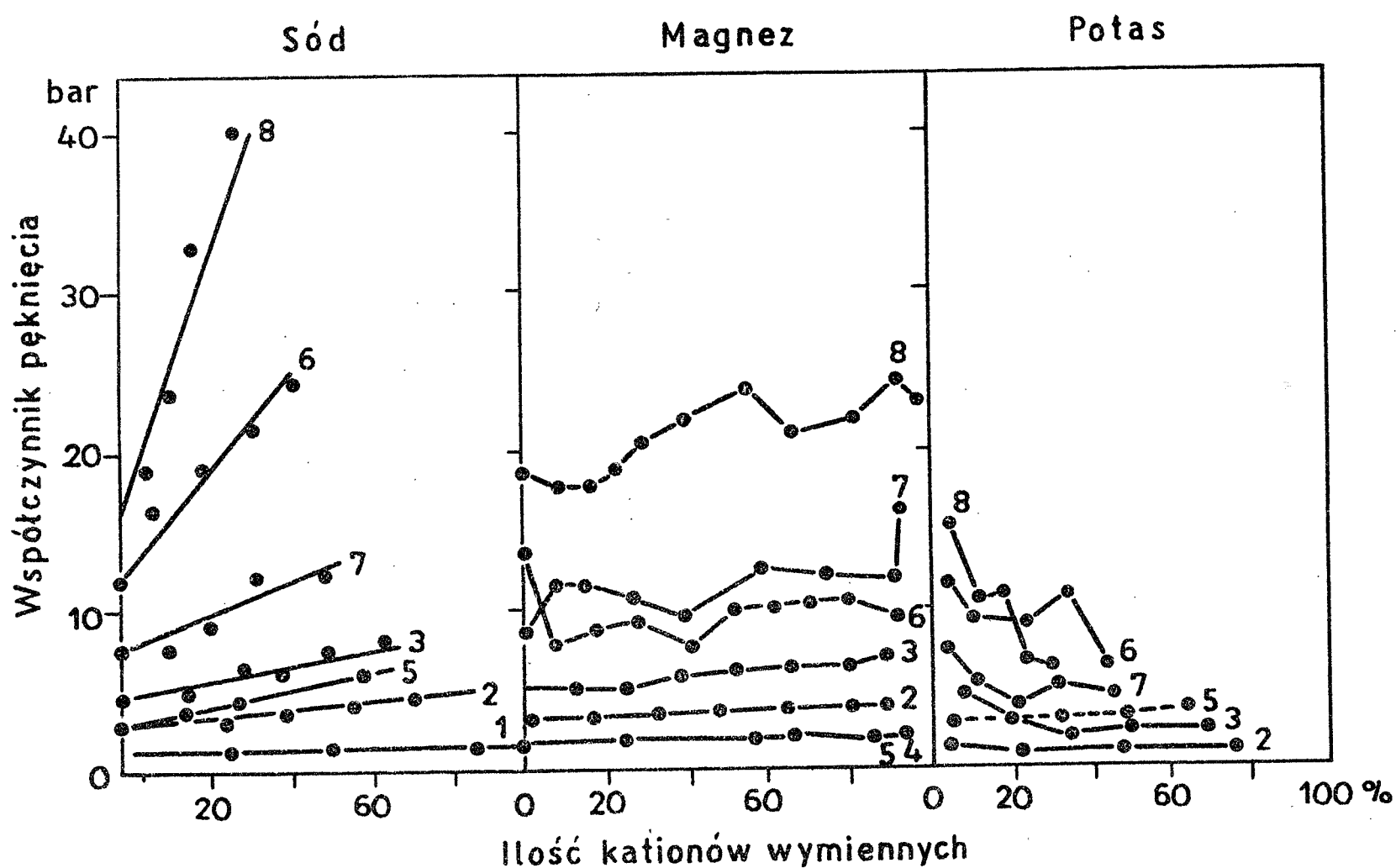
3) przy przekształcaniu gleb alkalicznych:



Wpływ pozostałych kationów: K^+ i Mg^{++} jest właściwie mniej poznany, a istniejące dane o ich oddziaływaniu na właściwości sko-

rupy glebowej są sprzeczne. Brooks (16) podaje na przykład, że jakkolwiek istnieje ujemny wpływ wymiennego Mg^{++} na właściwości struktury przy większym stężeniu tych jonów w glebie (powstaje skorupa o większej oporności mechanicznej), to wyniki badań wskazują, że jego działanie nie odbiega od wpływu jonów Ca^{++} i K^+ na strukturę niektórych gleb. Jedynie jony K^+ powodowały obniżenie wytrzymałości mechanicznej skorupy w kilku glebach (ryc. 10).

W kombinacji różnych poziomów Na^+ i K^+ wykazano, że wymienny K^+ sam lub w obecności wymiennego Na^+ ma bardzo mały wpływ lub prawie żaden na przepuszczalność skorupy, a w kilku glebach obniżał jej wytrzymałość mechaniczną.



Ryc. 10. Wpływ zawartości kationów wymiennych na wytrzymałość mechaniczną skorupy wg Brooksa (16).

1. Traver, 2. Esquatzel, 3. Chilcott, 4. Umapine, 5. Aiken, 6. Huntley, 7. Sebree, 8. Chino

Tak więc największy wpływ na destrukcję agregatów, a tym samym na właściwości skorupy, wywierają jony Na^+ i zależność ta jest wprost proporcjonalna. Allison (3,4) przeprowadził doświadczenie na glinie „Pachappa”, która zawierała 14% iłu a 3% Na^+ wymiennego. Wartość współczynnika pęknięcia wynosiła 1350 mb, ale przy zawartości 54% Na^+ wymiennego wynosiła już > 3700 mb. Również doświadczenia Kempera (56), Reeva (81) i Rose (84) wykazały, że skorupa zawierająca większą ilość jonów Na^+ posiadała większy spływ powierzchniowy, mniejszą szybkość infiltracji w porównaniu do gleb wysyconych jonami Ca^{++} .

OCENA WŁAŚCIWOŚCI SKORUPY GLEBOWEJ I JEJ WPŁYWU NA NIEKTÓRE PROCESY ZACHODZĄCE W GLEBACH

Ocena wytrzymałości mechanicznej skorupy

Ocenę wytrzymałości mechanicznej skorupy glebowej można przeprowadzić co najmniej trzema sposobami. Pierwszym najbardziej popularnym wydaje się być zastosowanie testu współczynnika pęknięcia (ang. modulus of rupture), inaczej określanego jeszcze jako wytrzymałość na rozciąganie, umowna wytrzymałość na zginanie, współczynnik łamania brykietów itd., do określenia sił kohezji gleby suchej, uformowanej w odpowiednie brykiety w sposób naturalny bądź też sztuczny. Użycie współczynnika pęknięcia jako wartości charakteryzującej zaskorupienie gleb oparto na dwu założeniach: 1) fizyczne właściwości wytworzonych brykietów symulują właściwości skorupy, 2) współczynnik pęknięcia reprezentuje siłę, jaką powinny posiadać rośliny, aby przełamać tą skorupę.

Carnes (18) pierwszy zaproponował użycie współczynnika pęknięcia jako wskaźnika wytrzymałości mechanicznej skorupy i wy-

kazał jej proporcjonalną zależność z powierzchnią właściwą cząstek glebowych. Jednakże dopiero Richards (82) opracował metodykę przygotowywania sztucznych brykietów, symulujących naturalną skorupę glebową oraz pomiarów ich wytrzymałości. Wcześniej współczynnik ten używany był dla określania wytrzymałości różnych materiałów na złamanie. Metoda Richardsa polega na uformowaniu prostokątnego brykietu gleby w specjalnej formie, nawilżaniu go przez 1 godzinę w wodzie, suszeniu w temperaturze 50°C do stałej wagi i oznaczeniu siły potrzebnej do przełamania brykietu na aparacie skonstruowanym przez autora. Dla brykietów prostokątnych współczynnik pęknięcia, oznaczany literą S, jest wyliczany z równania:

$$S = \frac{3 F L}{2 b d},$$

gdzie: F - siła potrzebna do przełamania brykietu (dyna/cm²),
 L - odległość pomiędzy dwoma podporami brykietu (cm),
 b - szerokość brykietu (cm),
 d - grubość brykietu (cm).

Wielu badaczy końcowy wynik przedstawia w różnych jednostkach: barach, dynach, G siła itd., gdzie 1 bar = 10⁶ dyn = 10³ mb = 1,019716 · 10³ cm H₂O, a 1 mb ≈ 1G. Hillel (46) podaje również wzór, według którego można wyliczyć współczynnik pęknięcia dla skorup naturalnych o różnej grubości przy zachowaniu kształtu prostokąta, gdzie grubość jest wyrażana jako średnia geometryczna grubości maksymalnej i minimalnej:

$$S = \frac{3 F L}{2 b T_{\max} T_{\min}},$$

gdzie: T_{max} T_{min} - oznacza grubość maksymalną i minimalną skorupy. Współczynnik pęknięcia był używany już przez wielu badaczy jako

wskaźnik zaskorupiania gleb (3,4,5,18,24,29,42,46,62,82), ale wyniki ich należy przyjąć z pewnym zastrzeżeniem, gdyż warunki przygotowywania brykietów były różne, co nie daje możliwości porównywania wyników i sprawdzenia metod. Twardość skorupy i jej właściwości nie są skorelowane z jedną cechą gleby, lecz wynika ze współdziałania całego kompleksu procesów fizycznych i fizykochemicznych, a nie uwzględnianie ich prowadzi w efekcie końcowym do różnych wyników. Współczynnik pęknięcia jest wyższy dla iłów montmorylonitowych niż kaolinowych (11,62). Hanks podaje natomiast wprost przeciwną zależność (42). Wartość jego wzrasta, gdy szybkość wysychania gleby maleje (46,62), odwrotnie jednak podaje Arndt (6,7). Cały szereg zależności współczynnika pęknięcia podano już w rozdz. poprzednim, dlatego też wspomniano tutaj tylko o pewnych rozbieżnościach w wynikach doświadczeń różnych autorów i wynikających prawdopodobnie z nie ustalonej dotychczas metodyki jego pomiarów. Użycie tej wartości jako jedynego wskaźnika zaskorupiania spotyka się z krytyką. Arndt (7) podaje, że wartości współczynnika, które odzwierciedlają wytrzymałość skorupy na złamanie, stanowią tylko 20% rzeczywistych sił potrzebnych kiełkującym roślinom na przebicie skorupy in situ, a więc określanie wytrzymałości skorupy powinno obejmować potrzeby kiełkujących roślin. Jest to drugi sposób oceny oporności mechanicznej skorupy. Jednak bezpośrednie użycie kiełkujących roślin jako wskaźników wielkości zaskorupienia jest niezadawalające, gdyż zbyt wiele czynników ma bezpośredni wpływ na energię kiełkowania każdej rośliny (odmiana, wilgotność, zawartość O_2 i CO_2 , pH gleby, składniki pokarmowe, światło, mikroorganizmy itd.), (40,54,97). Dlatego też Morton, Arndt, Holder i in. (6,7,50,71) opracowali penetrometry, które rejestrowały siłę

potrzebną kiełkującym roślinom na przejście strefy o grubości kilkunastu milimetrów, zagęszczanej do różnych wartości ciężaru objętościowego. Używając różnych przekrojów stożka dla odzwierciedlenia różnych średnic kiełkujących roślin, wykazali, że energia kiełkowania wiązała się bezpośrednio ze średnicą kiełków, stopniem ubicia gleby, początkową zawartością wody i głębokością wysiania nasion. Badali oni jednak przejście kiełków przez mechanicznie zagęszczaną warstwę gleby, a nie przez warstwę zaskorupioną. Z badań Lemos (62) wynika, że współczynnik pęknięcia skorupy o ciężarze objętościowym 1.29 g/cm^3 , wytworzonej wskutek działania deszczu wynosi 331 mb., a skorupy o tym samym ciężarze objętościowym, ale wytworzonej przez mechaniczne zagęszczenie - 156 mb. Tackett (88) dokonał penetrometrycznego pomiaru skorupy wytworzonej pod działaniem deszczu symulowanego o wielkości 5 cm i skorupy po mechanicznym ubiciu gleby do ciężaru $1,50 \text{ g/cm}^3$. Wartości wyrażone w G/cm^2 wynoszą odpowiednio: dla gleby piaszczystej: 41 i 6 G/cm^2 , gleby nienaruszonego poziomu A_0 : 289 i 164 G/cm^2 , gleby zrekonstruowanej poziomu A_0 (piasek + 5,7% iłu, + 22,6% pyłu): 350 i 250 G/cm^2 . Wartości oporności mechanicznej skorupy gleby zrekonstruowanej są dużo wyższe niż gleb poziomów naturalnych. Różnice te mogą być powodowane a) różnicą w zawartości kationów, b) różnicą w wymieszaniu i ułożeniu cząstek glebowych i agregatów oraz zniszczeniem otoczek koloidalnych, c) usunięciem niektórych rozpuszczonych lub zdyspergowanych składników w procesie frakcjonowania gleby.

Jako trzeci sposób oceny wytrzymałości mechanicznej wytworzonej skorupy przyjęto pomiary penetrometryczne, ale wykonywane przyrządami służącymi do pomiaru zwięzłości gleby, używane między innymi przez Taylora, Parkera i in. (70,90,93).

Charakterystycznymi właściwościami skorupy są również: porowatość, ciężar objętościowy i przepuszczalność. Dwie pierwsze właściwości i ich współzależności z innymi cechami gleby omówiono przy opisie mechanizmu powstawania skorupy glebowej.

Przepuszczalność wytworzonej skorupy glebowej

Badania mikrofotograficzne przeprowadzone przez McIntyre, Evansa i in. (30,66,67,88) wykazały, że skorupa składa się z dwu oddzielnych warstw a) cienkiej otoczki powierzchniowej o grubości 0,1 mm i b) strefy wmycia - grubości 2-3 mm o różnej przepuszczalności. McIntyre (67) podaje sposób wyliczeń wartości przepuszczalności oddzielnie dla dwu warstw skorupy i gleby leżącej pod nią. Skorupa wytwarzana była przez autora w dwu różnych warunkach: przy spływie rozbitej gleby przez deszcz symulowany oraz przy zatrzymywaniu 70-80% gleby rozbitej przez zastosowanie zabezpieczających krat powierzchniowych na 3 glebach. Wartości przepuszczalności wytworzonych skorup wyliczał autor z równania Darcy:

$$Q = K A (h_1 - h_2) / L, \quad (1)$$

gdzie: Q - ilość wody w cm^3 przechodzącej w ciągu 1 sek przez glebę o powierzchni A ,

K - przepuszczalność w cm/sek ,

A - powierzchnia gleby w cm^2 ,

$(h_1 - h_2) / L$ - gradient hydrauliczny w cm wody / cm

$L = l_1 + l_2$, całkowita grubość skorupy.

Wartość K przy 30 minutach opadu należy najpierw przeliczyć według równania Darcy, używając rzeczywistej grubości skorupy, w przypadku doświadczeń McIntyre wynosiła ona 1,5 mm bez zabezpieczenia spływu oraz 2,5 mm z kratą zabezpieczającą. Po

przeliczeniu, całkowita przepuszczalność wynosiła odpowiednio $3,2 \times 10^{-6}$ cm/sek i $3,7 \times 10^{-6}$ cm/sek. Tak więc przepuszczalność k_1 , tj. otoczki powierzchniowej, wyniesie: $k_1 = 5 \times 10^{-7}$ cm/sek, a warstwy wmywania $k_2 = 5 \times 10^{-6}$ cm/sek. Oznacza to, że warstwa pierwsza posiada 10-krotnie większy wpływ na obniżenie przepuszczalności niż strefa wmycia. Przepuszczalność warstwy gleby leżącej pod skorupą wynosi około 10^{-3} cm/sek, tzn. jest 200 razy większa od przepuszczalności strefy wmywania i około 2000 razy wyższa niż otoczki powierzchniowej. Doświadczenie podobne przeprowadził także Tackett (88), lecz uzyskane różnice w przepuszczalności różnych warstw były znacznie mniejsze - około 5 razy. Przepuszczalność zagęszczonej mechanicznie warstwy gleby do ciężaru objętościowego równego ciężarowi skorupy powstałej pod działaniem 5 cm opadu symulowanego nie różniła się w ogóle od przepuszczalności warstw głębszych.

Infiltracja a zaskorupianie gleb

Infiltracja rozpatrywana najczęściej jako ruch wody w głąb profilu glebowego jest jednym z najważniejszych procesów wyznaczających właściwości wodne gleb. Infiltracja w glebach jednorodnych, tzn. glebach jednakowych pod względem struktury i składu mechanicznego, jest stosunkowo dobrze poznana i opracowana. Mniej znane są zagadnienia infiltracji w glebach warstwowych, a za takie właśnie możemy przyjąć gleby zaskorupione ze zmienną w czasie opornością hydrauliczną cienkiej warstwy powierzchniowej. Teorię przepływu wody w profilu dwuwarstwowym podał Tokagi (89). Wynika z niej, że gdy przepuszczalność wierzchniej warstwy jest mniejsza od przepuszczalności warstwy dolnej, powstają w niej pewne zmiany wywołane podciśnieniem. Zachodzą one głów-

nie na styku warstw. Badania Gardnera, Hillela i wielu innych (1,2,25,26,31,32,47,48,49,58,66,67,70) wykazały, że obniżona przepuszczalność powstałej skorupy może znacznie obniżyć infiltrację. Autorzy ci podali szereg rozwiązań matematycznych, częściowo sprawdzonych w doświadczeniach, dla stałego i chwilowego przepływu wody w glebach zaskorupionych. Dla stałego przepływu wody do jednorodnego profilu glebowego musi istnieć gradient potencjału w obrębie gleby leżącej pod skorupą, a więc warunki przepływu stałego wymagają, aby przepływ przez skorupę (q_c) był równy przepływowi przez leżącą pod skorupą strefę przejściową (q_s), (31,48):

$$q_c = q_s$$

lub

$$K_c \left(\frac{d\phi}{dz} \right)_c = K_s \left(\frac{d\phi}{dz} \right)_s, \quad (2)$$

gdzie $K_c(d\phi/dz)_c$, $K_s(d\phi/dz)_s$ odpowiadają kolejno przewodności hydraulicznej skorupy i gradientowi wysokości hydraulicznej strefy przejściowej. Gradient przez strefę przejściową zmierza do jedności, gdy osiągnie się stały przepływ wody, jeśli gradient ciśnienia obniża się ze wzrostem głębokości nawilżania, ewentualnie pozostawiając gradient grawitacyjny jako jedyną siłę napędową. Przy nieobecności gradientu wysokości ssania poniżej skorupy otrzymamy (zakładając powierzchnię gleby jako nasz poziom odniesienia):

$$q = K_s(\Psi_i) = K_c [\Psi_o + \Psi_i + L_c] / L_c, \quad (3)$$

gdzie $K_s(\Psi_i)$ wyraża zależność pomiędzy nienasyconym przewodnictwem hydraulicznym a potencjałem macierzystym gleby poniżej skorupy, Ψ_i - funkcja wysokości ssania, które powstaje w tej

strefie, rozpoczynając się bezpośrednio pod hydraulicznie oporną skorupą, Ψ_0 - dodatnie ciśnienie wywierane na górną powierzchnię gleby przez wodę zalewową, L_c - grubość skorupy.

Gdy głębokość wody zalewowej jest płytka, nieistotna, $\Psi_0 \approx 0$, a skorupa jest bardzo cienka i o niskiej przewodności $L_c \approx 0$ (tj. gdy L_c jest bardzo małe w stosunku do ciśnienia Ψ_i , które tworzy się pod powierzchnią skorupy), możemy przyjąć przybliżenie:

$$q_s = q_c = K_c \Psi_i / L_c. \quad (4)$$

Warunek, że skorupa pozostaje nasycona nawet wtedy, gdy jej niższa część będzie pod ciśnieniem jest taki, by jej krytyczna zdolność do przepuszczania powietrza Ψ_a nie była przekroczona, to jest: $|\Psi_i| < |\Psi_a|$. To, łącznie z warunkiem, że gradient hydrauliczny gleby pod skorupą zbliża się do jedności, prowadzi do przybliżenia:

$$\frac{K_s}{\Psi_i} = \frac{K_c}{L_c} = \frac{1}{R_c}, \quad (5)$$

tj. stosunek przewodności hydraulicznej gleby leżącej pod strefą przejściową do jej ciśnienia jest w przybliżeniu równy stosunkowi przewodności hydraulicznej (nasyconej) skorupy do jej grubości. Ostatni stosunek jest odwrotnością oporności hydraulicznej do jednostki powierzchni skorupy R_c . Tak więc:

$$q = K_s (\Psi_i) = \Psi_i / R_c, \quad (6)$$

gdzie przewodnictwo nienasycone gleby leżącej pod skorupą nosi znaną, pojedynczo określoną zależność do ciśnienia i jest możliwe wyliczenie szybkości filtracji stałej ciśnienia w strefie

pod skorupą, na podstawie dającej się zmierzyć oporności hydraulicznej skorupy. Gdy znany jest także stosunek ciśnienia macierzystego do zawartości wody, istnieje możliwość wywnioskowania zawartości wody pod skorupą podczas stałego przepływu wody.

Hillel i Gardner (48) przeprowadzili eksperyment dla dwu modeli: model I, którego opory hydrauliczne skorupy i warstwy dolnej są równe, w takich przypadkach przy wzroście oporu skorupy maleje infiltracja i wzrasta siła ssąca warstwy dolnej; model II o stałych właściwościach skorupy, a zmiennych właściwościach warstwy dolnej. Dla tego przypadku wielkość infiltracji zależy od właściwości hydraulicznych warstwy dolnej. Niestety, zgodność pomiędzy mierzonymi wartościami (q) i (Ψ_i) nie była tak dobra jak oczekiwano. Rozbieżności te wskazują na nieoczekiwane niski kontakt pomiędzy skorupą a warstwą dolną gleby i możliwe błędy w zakładanych zależnościach $K_s(\Psi_i)$ dla warstwy zagregowanej, wynikające z ograniczonego wejścia, a nawet całkowitego zamknięcia powietrza.

Dla określenia chwilowego przepływu wody przez glebę zaskorupioną znajdujemy w literaturze kilka metod. Edwards i Larson (26) zmodyfikowali metodę numeryczną rozwiniętą przez Hanksa i Bowersa (43), której główne założenie polega na włączeniu płytkiej powierzchniowej warstwy gleby, mającej małą pojemność zatrzymywania wody i przewodności, jako zależnej od czasu. Określili oni przewodnictwo hydrauliczne skorupy wytworzonej na glinie ilastej pod działaniem symulowanego deszczu o różnej intensywności. Na podstawie przeprowadzonych wyliczeń przewodnictwa przewidzieli, że wytworzona przy dwugodzinnym deszczu skorupa obniży całkowite pobranie wody o około 50%. Metody te mogą być użyte dla badania wpływu wytworzonej skorupy na infiltrację

w glebach. Została również opracowana przez Wanga i in. (96) metoda numeryczna dla określenia ruchu wody w profilach glebowych, charakteryzujących się stopniowo zmiennymi właściwościami fizycznymi. Metoda ta, po pewnych modyfikacjach, może być również zastosowana w badaniach infiltracji gleb zaskorupionych. Jednakże ograniczone i niestałe warunki początkowe i graniczne oraz brak powszechności rozwiązań numerycznych wpłynęły na przystosowanie uproszczonych rozwiązań analitycznych procesu infiltracji w glebach zaskorupionych. I tak, metoda Green-Ampt była wykorzystana jako podstawa w kilku rozwiązaniach przedstawionych w ostatnich latach (1,2,31,32,48,49,58,78).

Metoda Green-Ampt przyjmuje stały potencjał macierzysty na granicy nawilżania, a jednakową zawartość wody i stałą przewodność hydrauliczną dla gleby nawilżanej. Dla jednolitego profilu glebowego, wynikająca współzależność pomiędzy pionową infiltracją I , a czasem t , może być zapisana jako (31):

$$K_t = I - (\Psi_o - \Psi_i)(\Theta - \Theta_n) \ln \left[1 + I \frac{(\Psi_o - \Psi_i)(\Theta - \Theta_n)}{K_t} \right], \quad (7)$$

gdzie: K_t - rzeczywiste przewodnictwo hydrauliczne,

Ψ_i - potencjał macierzysty na granicy nawilżania,

Θ_n - początkowa wilgotność gleby (przyjmowana jako stała),

Ψ_o - potencjał macierzysty na powierzchni gleby,

Θ - średnia wilgotność dla zwilżanego profilu glebowego.

Hillel i Gardner (49) otrzymali następujące wyrażenie dla poziomej i pionowej infiltracji w glebie zaskorupionej o stałej oporności hydraulicznej skorupy R_c , leżącej nad jednolitym profilem glebowym:

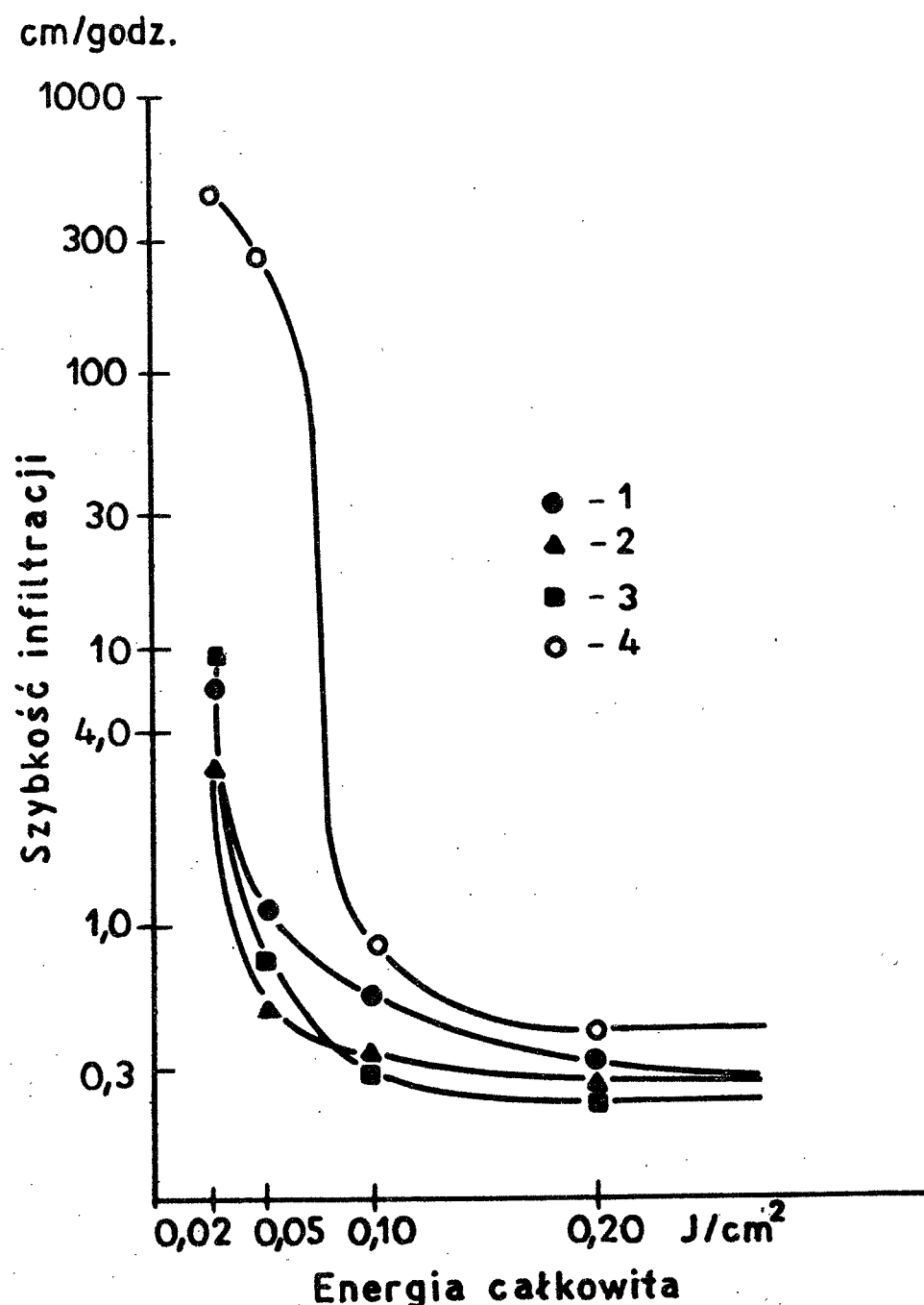
$$I = \Delta\Theta \left\{ \left(K^2 R_c^2 + 2K \Psi_i \right) / \Delta\Theta - K R_c \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

$$K_t = I + (K R_c + \Psi_i) \Delta\Theta \ln \left\{ 1 - I / (\Delta\Theta \Psi_i) \right\}, \quad (9)$$

gdzie $\Delta \Theta = \Theta - \Theta_n$. Równania 4 i 5 zakładają istnienie prawie stałej wilgotności na granicy skorupa-gleba. Autorzy potwierdzają doświadczalnie to przypuszczenie na glinie drobno-pylastej (less), jednakże dodatkowe doświadczenia przy użyciu mniej przepuszczalnych gleb pozwoliłyby ustalić ogólną ważność równania 5. Uproszczoną metodę Green-Ampt dla badań infiltracji w glebach powierzchniowo zaskorupionych używali również Farrell i Larson (31,32). Badali oni reakcję układu gleba-woda na rozkład opadów, zmieniając w czasie przewodność hydrauliczną skorupy i hydrauliczne właściwości dolnej warstwy gleby. Określili również zmiany oporności hydraulicznej skorupy jako wykładniczą funkcję czasu oraz wyprowadzili równanie opisujące infiltrację pionową i poziomą w glebie zaskorupionej. Jednakże, aby opracować te rozwiązania, należało przyjąć, że oporność hydrauliczna skorupy jest stała. Założono więc, że istnieje stała zawartość wody na granicy skorupa-gleba. W rzeczywistości jednak zawartość wody wzrasta przez cały czas, szybciej w pierwszym okresie, a następnie wolniej, aż do uzyskania stałej szybkości infiltracji (2,58). Doświadczenie Ahuja (2) potwierdziło metodę rozwiązań podaną przez Hillela i Gardnera (49), ale tylko dla małej oporności hydraulicznej, dawała natomiast duże błędy dla wyższych wartości. Rozwiązanie przedstawione przez Ahuja zakładające, że istnieje ciągły wzrost granicy wilgotności, daje dobre wyniki, ale również tylko dla niskiej oporności skorupy. Zagadnienie to wymaga dalszego opracowania.

Oprócz wspomnianych wyżej zależności, szybkość infiltracji w glebie zaskorupionej zależy również od szybkości spływu powierzchniowego rozbitego materiału glebowego. Moldenhauer i in. (69,70) stwierdzili, że infiltracja na glinie ilasto-pylastej

wynosiła tylko $1/6$ do $1/10$ wartości infiltracji dla tej samej gleby o 9% spadku. Ponadto, szybkość ruchu wody w glebie zależy także od rozkładu wielkości agregatów, energii uderzeniowej deszczu itd. (ryc. 11). Inne zależności zostały szerzej przedstawione w rozdziale pierwszym.



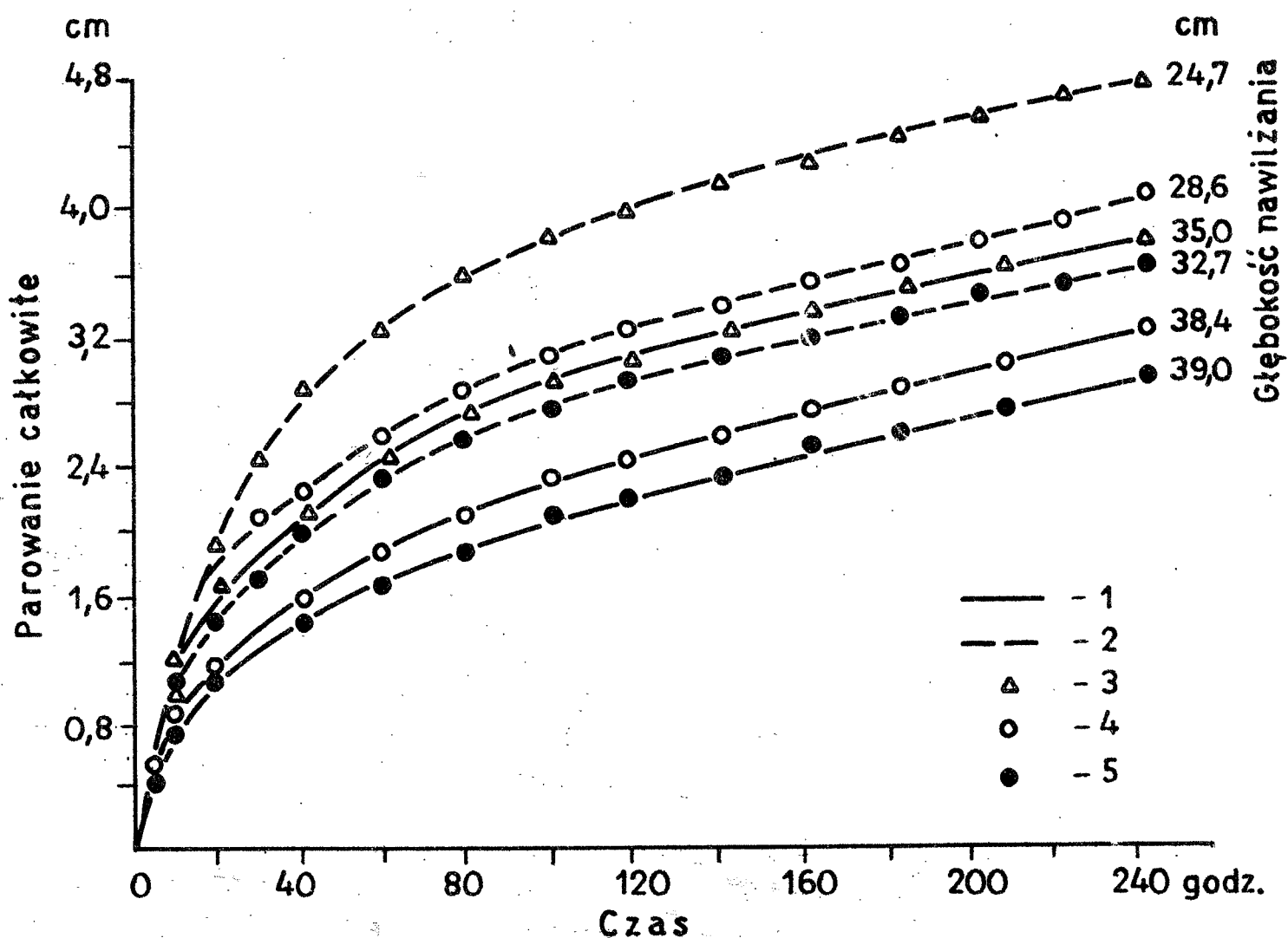
Ryc. 11. Zależność szybkości infiltracji na glinie od wielkości energii kinetycznej deszczu wg Moldenhauera (70).
Frakcje agregatów: 1. 0,5 - 2,0 mm, 2. 2,0 - 4,7 mm, 3. 4,7 - 8,0 mm, 4. 8,0 - 20 mm

Parowanie wody z gleb zaskorupionych

Warunki w powierzchniowej warstwie gleby odgrywają ważną rolę w szybkości tworzenia się suchej warstwy i obniżaniu paro-

wania (61,74). Do niedawna sądzono, że uprawki pielęgnacyjne, które niszczą wierzchnią warstwę powietrznie suchej gleby, skutecznie zapobiegają stratom wody w wyniku parowania nieużytecznego. Jednakże liczne badania wykazują, że stratom wody z gleby bardziej zapobiega sucha skorupa glebowa niż warstwa rozluźniona (15,17,20,22). Zjawisko obniżonego parowania z gleb zaskorupionych Bresler (15) tłumaczy tym, że pomiędzy warstwą powierzchniową a warstwą niższą istnieją duże różnice w wielkości porów, w wyniku całkowitego zniszczenia struktury warstwy zewnętrznej oraz, że powstała skorupa powoduje niższą szybkość nawilżania, w konsekwencji wywołuje więc obniżone parowanie. Małe pory w cienkiej warstwie powierzchniowej gleby są całkowicie zapełnione roztworem we wczesnym stadium wysychania i utrzymują transport wody do powierzchni w takich ilościach, jak następuje wyparowywanie, nawet jeżeli ciśnienie w strefie położonej bezpośrednio pod skorupą jest wystarczająco duże, aby usunąć wodę z większych porów w glebie. Jednak duża oporność na przepływ wody strefy położonej bezpośrednio pod skorupą wywołuje w efekcie końcowym obniżenie ilości wody dostarczonej do skorupy, która bardzo szybko wysycha i razem z kilkumilimetrową warstwą poniżej stanowi barierę dla dalszego ruchu wody do powierzchni gleby i żeby następowało jej dalsze wyparowanie musi przechodzić w fazę gazową pod skorupą powierzchniową. Badania laboratoryjne wykazały ponadto, że parowanie z gleb, których skorupa wytworzona została pod działaniem wody zalewowej było 25-30% wyższe niż gleb zaskorupionych po deszczu, a nawet 30-40% wyższe aniżeli gleb zaskorupionych w wyniku działania deszczu i soli NaCl. Około 25-30% więcej wody wyparowywało z gleb, w których proces parowania rozpoczął się bezpośrednio po infiltracji, niż gleb po czterech

dniach od zakończenia infiltracji. Szybkość i ilości wyparowywanej wody zależą także od głębokości nawilżania profilu glebowego (ryc. 12).



Ryc. 12. Parowanie całkowite jako funkcja czasu, metod nawilżania i stadium, w którym rozpoczyna się proces osuszania wg Breslera i in. (15).

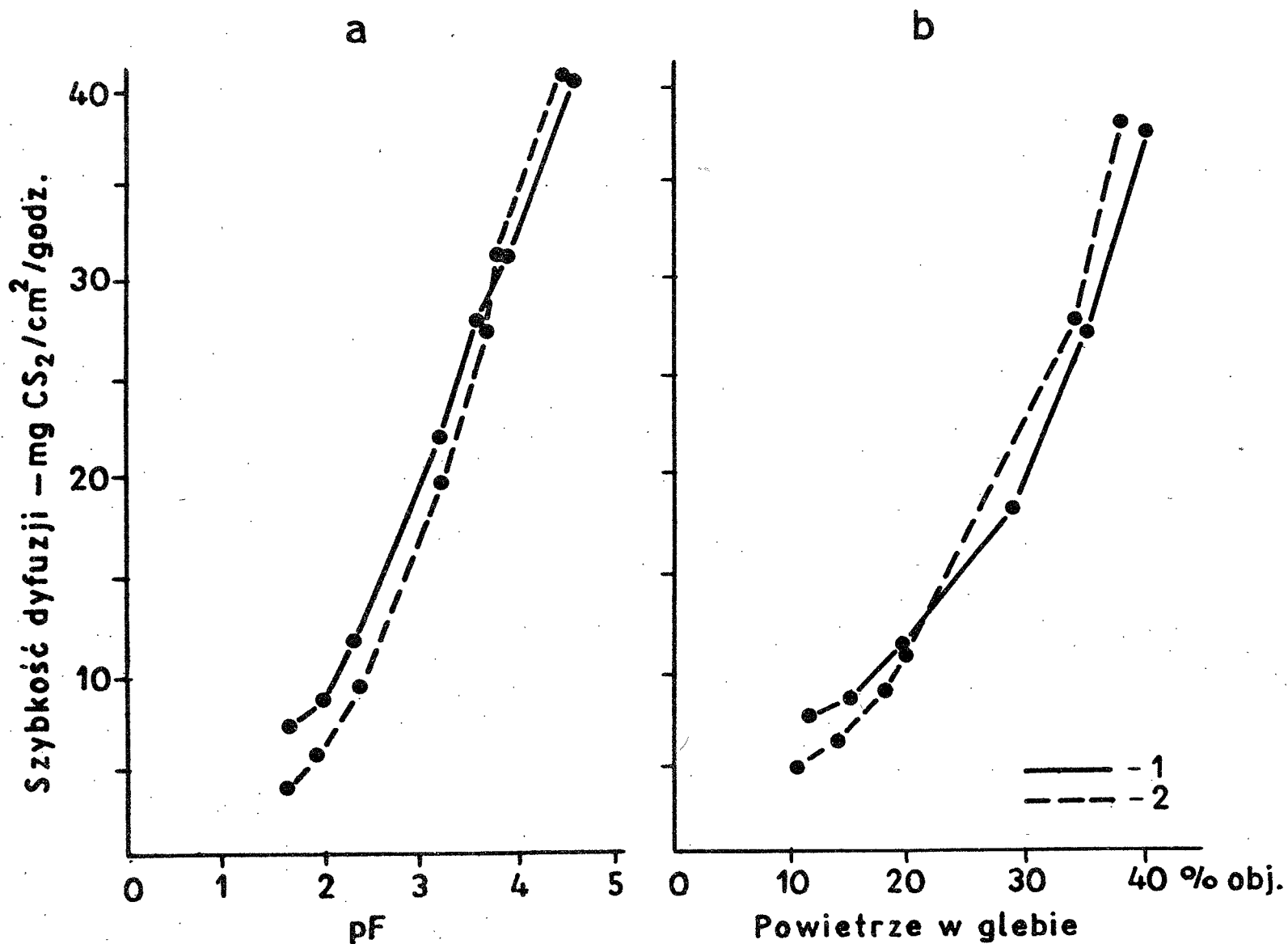
1 - po 4 dniach, 2 - po infiltracji, 3 - zalewowe, 4 - deszcz, 5 - deszcz + NaCl

Qayyum i Kemper (80) przedstawili dane, z których wynika, że szybkość parowania może być modyfikowana przez sole zakumulowane na powierzchni. Z pomiarów przewodnictwa elektrycznego ich badań wynika, że większość soli, których dodawano na powierzchnię gleby, została wymyta w głąb do granicy nawilżania, a małe ilości soli pozostały w pobliżu powierzchni, gdzie mogły bezpośrednio wpływać na zróżnicowaną szybkość parowania.

Tak więc skorupa glebowa może oddziaływać jako pewnego rodzaju mulcz naturalny na powierzchni gleby, który zmniejsza szybkość bezużytecznego parowania wody.

Wpływ skorupy powierzchniowej na dyfuzję gazów w glebie

Jednym najbardziej dyskusyjnych zagadnień jest dyfuzja gazów w glebie zaskorupionej. Dane z literatury wskazują, że zbi-
ta, powierzchniowa warstwa gleby obniża dyfuzję gazów lub też, że dyfuzja nie zależy od właściwości tej warstwy. Według Domby (25) stwierdzenie, że skorupa obniża dyfuzję jest oparte na dwu wątpliwych przypuszczeniach. 1. Jeżeli skorupa ogranicza wejście wody do warstwy powierzchniowej, musi także obniżać przejście gazów przez tą warstwę. 2. Struktura tej warstwy gleby oddziałuje w ten sam sposób na ruch wody i gazów. Domby podaje, że istnieje kilka powodów, dla których nie zawsze skorupa wpływa jednakowo na infiltrację i aerację, np. gdy woda znajduje się na powierzchni gleby, infiltracja może być dobra, ale brak gradientu ciśnienia uniemożliwia dyfuzję gazów przez skorupę. Ponadto wielkość porów glebowych ma znaczny wpływ na infiltrację, ale wydaje się być nieistotna przy dyfuzji. Doświadczenie autora wykazało, że jeśli powierzchnia nie jest całkowicie nieprzepuszczalna, szybkość dyfuzji przez glebę nie zależy od właściwości tej warstwy (23). Gdy różne części skorupy pokryto parafiną, szybkość dyfuzji nie obniżała się proporcjonalnie do powierzchni zakrytej. Nie stwierdzono również różnic w szybkości dyfuzji przez warstwy gliny pylastej o różnym stopniu zaskorupienia (ryc. 13a i b). Natomiast wpływ skorupy na dyfuzję zaznaczył się w glebach wilgotnych, ale tylko przy niskich wartościach pF ($pF < 2,5$), tzn., że im wilgotniejsza gleba, tym większy jest wpływ skorupy na dyfuzję gazów.



Ryc. 13. a) Wpływ wartości pF na dyfuzję gazów na glinie pylastej: 1) niezaskorupionej, 2) zaskorupionej, b) zależność pomiędzy zawartością powietrza a dyfuzją gazów w glebie wg Domby (23)

Van Bavel (96) podał teorię dyfuzji gazów w glebach, z której wynika, że fizyczne właściwości powierzchniowej warstwy gleby nie są ważne dla aeracji gleb. Doświadczenia ostatnich lat wskazują jednak, że współczynnik dyfuzji jest funkcją porowatości gleby i jej struktury. Bakker i in. (9) podają, że przy małych przestrzeniach powietrznych gleby widoczne jest zamulenie powierzchniowej warstwy i powstaje skorupa, która znacznie obniża współczynnik dyfuzji w porównaniu z glebami strukturalnymi. Różnice te wzrastają wraz ze zmniejszaniem się przestrzeni powietrznej, przy czym skorupa gleby mokrej nawet bardzo silnie ogranicza dyfuzję gazów.

WŁAŚCIWOŚCI SKORUPY A KIEŁKOWANIE I WSCHODY ROŚLIN UPRAWNYCH

Zaskorupienie gleb jest wskazywane przez wielu badaczy jako ważny czynnik wpływający na kiełkowanie nasion roślin uprawnych (6,7,10,13,33,40,41,42,50,51,52,52,71,82,86,90,91,92,93). Jednak wiele czynników wpływa na przebieg kiełkowania i dlatego trudno jest oddzielić wpływ oporności mechanicznej i zbitości skorupy glebowej, gdyż każdy z czynników może w pewnym stopniu ograniczać wschody, a nawet je całkowicie zahamować. Zmiana zbitości gleby powoduje nie tylko zmiany oporności mechanicznej, ale i zmiany porowatości, szybkości dyfuzji gazów, dostępność wody glebowej, tlenu itd. Hanks i Thorp (40) podają, że wschody pszenicy były obniżane zawsze, gdy wydatek dyfuzji tlenu-ODR (mierzony mikroelektrodą platynową) był niższy niż $80\text{g}\times 10^{-8}\text{cm}^3/\text{min}$. Tą ograniczoną szybkość dyfuzji otrzymano przy porowatości 16% w glinie ilastej, 17% w glinie pylastej i 25% w glebie piaszczystej. Inne badania wskazują, że kiełkowanie i wschody roślin są stałe tak długo, dopóki wilgotność waha się pomiędzy pojemnością polową a punktem wędnięcia roślin (92). Mechanizm wpływu oporności mechanicznej skorupy na przebieg kiełkowania jest zróżnicowany. Gdy kiełkująca roślina dotyka zaskorupionej warstwy gleby może nastąpić: 1) odwrócenie kiełka i jego poziomy rozwój do momentu aż natrafion na pęknięcie skorupy, przez które wykiełkuje (7,10), 2) kiełek może wzrastać do góry przez pęknięcie, które jest wystarczająco duże, aby zmieściły się części wschodzącej rośliny. W obydwu przypadkach rozkład pęknięć w skorupie oraz rozmiary kiełków są ważniejsze niż oporność mechaniczna skorupy (6,7,10,92). Tak więc wzrost roślin może następować w tych przypadkach nawet przy dużych wartościach wytrzymałości mechanicznej. 3) kiełkujące rośliny natrafiają na skorupę o małej oporności,

ale wystarczającej, by opóźnić wschody (33), chociaż można uzyskać nawet wschody całkowite (76,91,92), 4) gdy kiełki natrafiają na taką wytrzymałość mechaniczną skorupy, że w ogóle uniemożliwia ona wschody roślin (90).

Siła parcia kiełków roślin jest różna i była obiektem kilku badań i doświadczeń. Podaje się np., że siła parcia dla kiełków kukurydzy wynosi około $2,9 \times 10^5$ dyn (24), ponadto jest ona inna dla pojedynczego kiełka, a inna dla dwu lub trzech i wynosi odpowiednio: $3,8 \times 10^5$, $5,8 \times 10^5$ i $8,5 \times 10^5$ dyn (90). Parcie kiełków jest skoncentrowane w jednym kierunku i może powodować pęknięcie skorupy (6,7,71), dlatego właśnie różni autorzy doszli do wniosku, że penetrometryczne pomiary oporności mechanicznej skorupy będą dobrymi wskaźnikami sił potrzebnych kiełkującym roślinom na przebicie się przez powierzchniową skorupę (50,52,76,91). Taylor i in. (91) podają, że ilość wschodzących kiełków sorgo, bawełny, kukurydzy i pszenicy zmniejsza się ze wzrostem oporności skorupy począwszy od 3 barów (3000 mb), a zanika całkowicie przy oporności 13-18 barów w zależności od gatunku gleby, mimo że inne warunki kiełkowania są sprzyjające. Huges i in. (52) stwierdzają, że wschody niektórych gatunków traw nie były obniżane przez skorupę nawet o wytrzymałości 11 barów (pomiary penetrometryczne) w glebie zawierającej 56% ilów. Ocenę wytrzymałości skorupy i jej wpływu na wschody roślin dokonywano również za pomocą współczynnika pęknięcia określanego zmodyfikowaną metodą Richardsa. Carnes (18) wykazał, że wschody bawełny zmniejszały się, gdy wytrzymałość skorupy wzrastała. Zależność tę potwierdziły również badania Richardsa (82), który podaje, że zwiększona twardość skorupy od 108 do 273 mb obniża wschody fasoli od 100-0%. Hanks i Thorp (41) podają, że pomiędzy wschodami roślin,

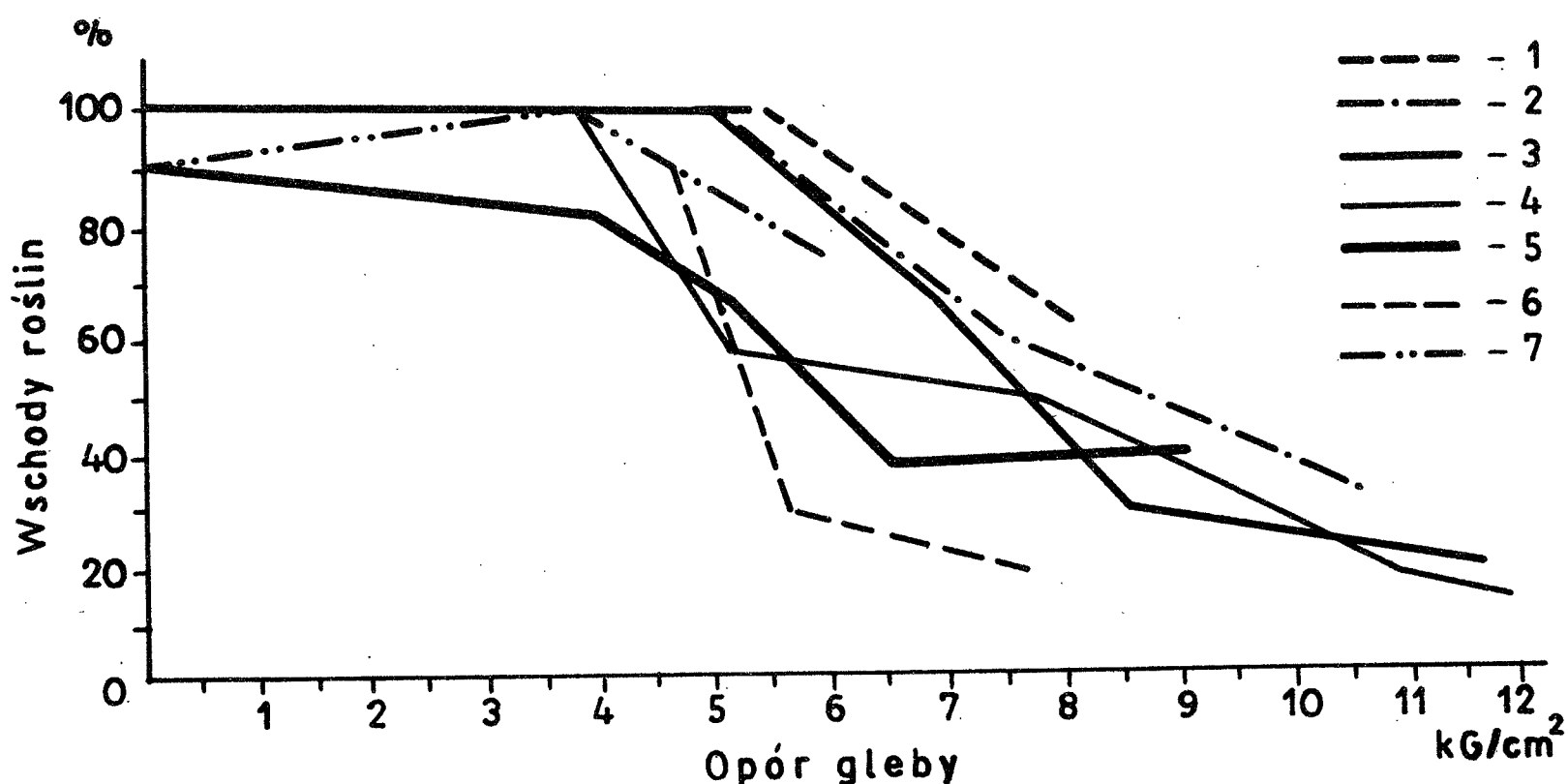
wytrzymałością skorupy a zawartością wody istnieje ścisła korelacja oraz podają krytyczne wartości wytrzymałości dla wschodów różnych roślin (tab. 6).

Tabela 6. Wpływ rośliny i zawartości wody na krytyczne wartości wytrzymałości skorupy na wschody roślin wg Hanksa (41)

Rośliny	Zakres wartości krytycznych współczynnika pęknięcia w mb.	
	wilgotność 2%	wilgotność 14,5%
Pszenica	3210 - 6410	800 - 1600
Sorgo	1610 - 3210	0 - 800
Soja	6410	0 - 800

Inne wartości krytyczne wytrzymałości istnieją na glebach zasobnych w jony Na^+ . Badania Allisona (4) wskazują, że krytyczne wartości dla wschodów kukurydzy na glinie zawierającej duże ilości Na^+ wynosiły od 1200 do 2500 mb. W literaturze napotykamy jeszcze kilka sposobów wyrażania i określania zależności wschodów roślin od wartości wytrzymałości skorupy, np. Bennett i in. (13) oceniają ją na podstawie wielkości siły potrzebnej do wyciągnięcia liny umieszczonej pod skorupą jednym końcem i podają wartości tej siły od $4,4 \times 10^5$ do $13,4 \times 10^5$ dyn jako krytyczne dla wschodów roślin.

W Polsce badania nad próbą wyznaczenia granicznych oporów gleby zbitej dla wschodów roślin prowadził, w warunkach laboratoryjnych, Trzecki (93). Stwierdza on m.in., że decydujący wpływ na wschody roślin ma rzeczywista wartość oporów mechanicznych (opór mierzono przy pomocy penetrometru glebowego w momencie pojawienia się kiełków na powierzchni gleby), a nie stopień zbitości gleby (ryc. 14).



Ryc. 14. Zależność ilości wschodzących roślin badanych gatunków od wzrastających oporów skorupy glebowej. Rośliny: 1) jęczmień jary, 2) pszenica ozima, 3) groch, 4) buraki cukrowe, 5) konieczyna czerwona, 6) rzepak ozimy, 7) lucerna siewna, wg Trzeckiego (93)

Wzrost oporów gleby do 5 kg/cm^2 nie wpływał na obniżenie ilości wschodów pszenicy ozimej, jęczmienia jarego oraz grochu. Natomiast buraki cukrowe, rzepak ozimy i lucerna siewna już poniżej 4 kg/cm^2 reagowały obniżeniem wschodów. Konieczyna czerwona nawet przez luźną glebę nie weszła w 100%, a opór 4 kg/cm^2 dawał ostry spadek wschodów. Ponadto autor podaje, że opór skorupy glebowej opóźniał pojawienie się pierwszej rośliny oraz rozciągał wschody.

Chociaż przeprowadzono już kilka doświadczeń dla znalezienia zależności wschodów roślin od wytrzymałości skorupy powierzchniowej, to jednak wyniki tych doświadczeń są praktycznie nieporównywalne i rozbieżne. Doświadczenia przeprowadzano różnymi sposobami, używając też różnych sposobów oceny wytrzymałości mechanicznej skorupy, w różnych warunkach środowiska glebowego i przy niejednakowym współdziałaniu innych czynników, które mają

znaczny wpływ na kiełkowanie i wschody roślin. Badano wschody roślin przez skorupę wytworzoną pod działaniem deszczu i przez warstwę gleby mechanicznie zagęszczanej do tego samego ciężaru objętościowego, a właściwości tych dwu warstw glebowych są istotnie różne i dlatego potrzebne jest znacznie więcej informacji dla oceny zależności wschodów roślin od właściwości gleb zaskorupionych. Morton i Buchele (71) oraz Taylor (92) podają kilka sposobów dla wyeliminowania lub zmniejszenia ujemnego oddziaływania skorupy na kiełkowanie roślin, które ogólnie można przedstawić następująco:

1. Zmniejszyć lub wyeliminować czynniki oddziałujące destrukcyjnie na powierzchniową warstwę gleby, ale zagęścić przy tym poziom umieszczenia nasion. Działania te obniżą zwężłość gleby przykrywającej nasiona, ale zapewnią dobry podsiąk wody do nich przez poziom zagęszczony.

2. Nasiona wysiewać na małych głębokościach, jeżeli pozwalają na to warunki wilgotnościowe i wielkość nasion oraz moczyć je przed wysiewem. Skróci to czas pomiędzy zasiewem a kiełkowaniem, a tym samym czas tworzenia się skorupy i jej ujemnego oddziaływania na kiełki zostanie skrócony.

3. Przykrywać warstwę gleby z nasionami dla zabezpieczenia jej przed wytwarzaniem dużej zbitości, zbrylenia lub też wysuszenia.

4. Przygotować glebę pod zasiew tak, aby już poprzez odpowiednie uprawy wyeliminować tworzenie się skorupy, np. mogą to być pewne formy skiby, bruzdy itp.

5. Przygotować dobre podłoże i ograniczenia boczne, aby rośliny osiągały przy kiełkowaniu maksymalną siłę parcia w jednym kierunku.

6. Dodać pewnych chemicznych substancji do powierzchniowej warstwy gleby, aby zredukować wytrzymałość mechaniczną skorupy np. polielektrolity lub też składników rozluźniających bezpośrednio nad nasionami np. wermikulit, perlit i inne.

7. Mechanicznie niszczyć skorupę przez stosowanie uprawek pielęgnacyjnych np. bronami, wałami, graczami itd.

METODY ZAPOBIEGANIA ZASKORUPIANIU GLEB UPRAWNYCH

Stosowane w chwili obecnej metody usuwania czy też zapobiegania zaskorupianiu gleb można by ująć w dwie grupy. Pierwsza - to metody naturalne, stosowane dla usunięcia skorupy bądź też częściowego wyeliminowania czynników powodujących zaskorupianie lub skrócenia czasu ich oddziaływania na glebę. Są to: zabiegi mechaniczne, tzn. odpowiednie uprawy i przygotowanie roli i nasion, stosowanie mulczów naturalnych i sztucznych oraz nawadnianie. Druga grupa metod to zastosowanie chemicznych substancji dla trwałej poprawy właściwości fizycznych gleby, które determinują zjawisko zaskorupiania i ustalenia optymalnych warunków wzrostu i rozwoju roślin. W zasadzie dalsze badania powinny zmierzać właśnie w kierunku poznania możliwości zastosowania drugiej grupy metod dla zapobiegania temu zjawisku.

Na glebie uprawnej pokrytej roślinami duża część kropel deszczu jest przechwytywana przez liście roślin i tracą one większość swojej energii kinetycznej jeszcze przed osiągnięciem powierzchni gleby. Rośliny spełniają tu więc rolę swoistego mulczu naturalnego, który zabezpiecza glebę przed niszczącym działaniem deszczu. Dlatego też skorupa wytworzona pomiędzy roślinami nie jest tak niebezpieczna dla dalszego rozwoju rośliny jak

w początkowym stadium rozwoju i gdy powierzchnia gleby jest jeszcze nieoskonięta przez rośliny. Zachodzi więc konieczność ingerencji rolnika w celu poprawienia warunków siedliska dla rozwoju rośliny.

Mechaniczne niszczenie skorupy glebowej

Jednym z najdawniejszych i najczęściej stosowanych sposobów usuwania powstałej skorupy jest mechaniczne jej niszczenie przy pomocy odpowiednich narzędzi uprawowych bądź też pielęgnacyjnych, jak: wały, brony, motyki itp. Z zabiegiem tym wiąże się jednak zwiększona ilość przejazdów ciągników i narzędzi po polu, a w efekcie końcowym odbija się to ujemnie na innych właściwościach fizycznych warstwy ornej. Ponadto istnieje niebezpieczeństwo mechanicznego urażania, kaleczenia kielków roślin przez większe płaty zerwanej skorupy lub też samych narzędzi. Czasokres przeprowadzania i trwania tego zabiegu jest również minimalny (18, 27,87). Holder (50) wykazał, że koszty mechanicznego usuwania skorupy są bardzo wysokie i działania te są nieefektywne. Jest to zabieg interwencyjny, krótkotrwały i nie zapobiega dalszemu tworzeniu się skorupy, ani też nieużytecznemu parowaniu wody z gleby. Inne czynniki, których zastosowanie przez rolnika eliminowałoby w pewnym stopniu potencjalne zagrożenie wschodów przez skorupę powierzchniową, podano w rozdz. poprzednim.

Mulczowanie (ściółkowanie)

Zastosowanie mulczu, a więc powierzchniowej okrywy gleby' celem zmniejszenia parowania, powstawania zbitej warstwy pod działaniem energii uderzeniowej opadów itd. zostało potwierdzone przez kilka doświadczeń (13, 17, 57). W tym celu stosuje się różne

materiały pochodzenia rolniczego oraz inne nie pochodzące z gospodarstwa. Z dużym powodzeniem są stosowane: słoma, liście, trociny, a także papier, folie plastikowe, emulsje bitumiczne, żywice i szereg innych substancji sztucznie wytwarzanych jak Hygromull, Styromull i in. (39,45). Opłacalność tego zabiegu zależy oczywiście od rodzaju materiału użytego oraz rośliny, na której został zastosowany. Jednakże ścisłych badań dla określenia wpływu mulczowania na zjawisko zaskorupiania jest niewiele. Bennett (13) dokonał porównania kilku sposobów zapobiegania zaskorupianiu gleb, używając między innymi czarnej taśmy foliowej do przykrywania rzędów obsianych roślinami i stwierdził, że jest to najskuteczniejszy sposób przeciwdziałania powstawaniu skorupy. Wpływ zastosowanych przez Bennetta (13) metod jest różny i można je ułożyć w następujący szereg: taśma foliowa czarna > środek rozluźniający glebę > wodna emulsja asfaltowa > wodna emulsja żywicy winylowej > siew w bruzdzie > siarczan wapnia > krilium > chlorek wapnia. Tak więc dodatni efekt mulczowania na wschody roślin został stwierdzony, ale należałoby w dalszym ciągu prowadzić badania nad tym zagadnieniem w odniesieniu do skorupy glebowej.

Zwiększanie zawartości wody w glebie

Wyniki badań (18,41,42,46,71) wskazują, że wytrzymałość mechaniczna skorupy zmniejsza się ze wzrostem wilgotności gleby. Jeżeli przed opadem atmosferycznym doprowadzimy glebę, przez częste nawadnianie, do większej wilgotności to wówczas, jak wykazały badania Hanksa i Hillela (42,46), niszczące działanie deszczu jest mniejsze niż w przypadku działania deszczu na glebę suchą. Jednakże brak jest ściślejszych badań, które dawałyby pod-

stawę do użycia tej metody w praktyce i nie wydaje się, że zastosowanie tylko zwiększonego nawadniania całkowicie rozwiąże problem zaskorupiania gleb.

Zastosowanie 12% roztworu kwasu fosforowego (H_3PO_4)

Podjęto, na razie nieliczne, próby zastosowania 12% roztworu kwasu fosforowego do walki z zaskorupianiem gleb (21). Zdaniem badaczy z Agricultural Research Service w USA, za pomocą oprysków kwasem fosforowym można znacznie ograniczyć tworzenie się skorupy na glebach wapniowcowych oraz zwiększyć wschody siewek. Kwas ten, przy zetknięciu z glebą, zostaje natychmiast adsorbowany i neutralizowany przez jony Ca^{++} i Mg^{++} obecne w glebie. Jony wapnia i magnezu łączą się z fosforem z kwasu i działają jako substancje cementujące agregaty glebowe. Spoiwo to zwiększa wodoodporność agregatów, przez co nie ulegają one szybkiemu i silnemu działaniu niszczącemu deszczu i nie tworzą skorupy. Ponadto kwas fosforowy wywiera korzystne działanie na rośliny. Dawki 12% roztworu H_3PO_4 są rzędu 1575 l/ha i może on być stosowany pasowo razem z zasiewem roślin uprawnych. Niestety, w literaturze brak jest szerszych danych potwierdzających słuszność zastosowania tego zabiegu.

Użycie płynnych i granulowanych środków chemicznych rozluźniających glebę

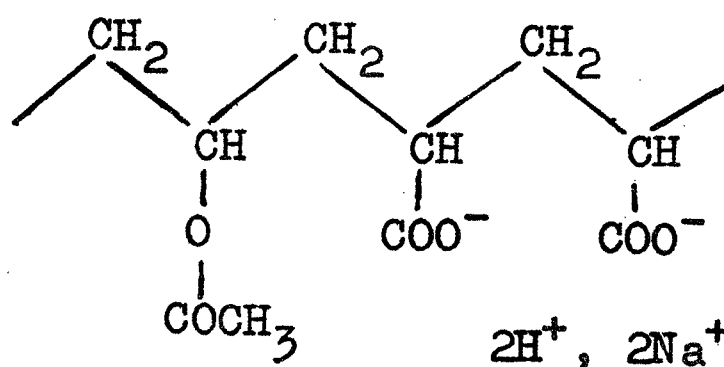
Do ochrony gleb ciężkich przed niekorzystnym oddziaływaniem czynników zewnętrznych używano również szereg płynnych, pienistych i granulowanych substancji z tworzyw sztucznych lub odpadów przemysłowych między innymi żużla, koksu, perlitu, Hygromullu, (polski Pianizol), alkoholi tłuszczowych, hexadekanolu itp.

(8,12,14,17,27,35,36,37,39,45,55,57,59,60,72,74,77,79,94). Skuteczność działania wymienionych materiałów, jak również opłacalność ich stosowania nie zawsze została potwierdzona w doświadczeniach. Ells i Qashu (27,79) podają, że jakkolwiek zastosowanie granulowanych substancji zmienia właściwości fizyczne, ale należy przeprowadzić dalsze metodyczne badania dla określenia ich rzeczywistego wpływu na zjawisko zaskorupiania, wschody i plonowanie roślin. Herzog (45) pisze, że zastosowanie polistyrenu w ilości 3,3 t/ha (około 200 m³) zwiększało nieco porowatość, przepuszczalność powietrzną, a także infiltrację nawet w drugim roku po zastosowaniu, ale nie wpływało to na wielkości plonów. Gora (36,37) z zebranego materiału badawczego na temat zastosowania tworzyw piankowych do poprawy właściwości gleb ciężkich wyciąga kilka wniosków, między innymi, że można niektóre niekorzystne warunki struktury i tekstury gleb poprawić przez odpowiednie dawki tych substancji, ale nie można właściwie jeszcze nic powiedzieć ani co do formy, ani co do ilości ich zastosowania i skutków oddziaływania. Należy, według Gory, przeprowadzić szereg doświadczeń ścisłych, które powinny te zależności wyjaśnić. Również Myhrman, Law, Olsen i in. (12,57,59,72,74) podają, że uzyskane efekty dodatnie, to znaczy obniżenie zaskorupienia i obniżenie wartości współczynnika pęknięcia, zwiększenie strukturalności gleby przez okres kilku miesięcy i wschodów roślin, uzyskane przy działaniu alkoholi tłuszczowych i innych niejonowych substancji powierzchniowo czynnych, jak zemulgowany alkohol tallowy, hexadekanol, wskazują na możliwość użycia ich jako środków zapobiegawczych powstawaniu skorupy powierzchniowej, ale dopiero dalsze badania pozwolą na ich ocenę i szersze zastosowanie w rolnictwie.

Zastosowanie polielektrolitów (kondycjonerów glebowych) do walki z zaskorupianiem powierzchniowym gleb uprawnych

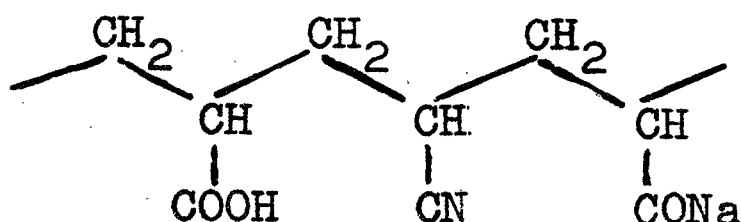
Istnieje już bardzo bogate piśmiennictwo dotyczące zastosowania polielektrolitów dla poprawy właściwości fizycznych i fizyko-chemicznych gleb uprawnych, ale w nawiązaniu do zjawiska zaskorupiania i jego zwalczania znajdujemy tylko nieliczne prace (3,4,13,44,53,65).

Z dużym powodzeniem zastosowano polielektrolity, zwane ostatnio kondycjonerami glebowymi, jako środki przeciwdziałające zaskorupianiu i wpływające dodatnio na szereg właściwości fizycznych, które determinują wzrost roślin. Wprawdzie badania dotyczyły tylko dwu znanych kondycjonerów: VAMA i HPAN, ale uzyskane wyniki, szczególnie w badaniach Allisona (3,4), stwarzają podstawy do podjęcia dalszych prób wykorzystania i innych kondycjonerów w tym celu. Kondycjoner VAMA jest to kopolimer octanu winylu i kwasu maleinowego występujący najczęściej w postaci soli sodowej lub wapniowej (57). VAMA i jego różne sformułowania nazywano „Krilium” przez firmę produkującą ten preparat, Monsanto Chemical Company lub też CRD-186.



VAMA (kopolimer octanu winylu i kwasu maleinowego)

HPAN lub inaczej CRD-189 jest to sól sodowa zhydrolizowanego nitrilu, który przez firmę Monsanto sprzedawany jest jako „Bendite”.



HPAN (zhydrolizowany poliakryloamid)

Allison (4) zastosował kondycjonery w dawce 0,1% suchej masy gleby. Powodowało to zwiększenie ilości agregatów $> 0,10$ mm, 10-krotnie większą infiltrację oraz znacznie obniżało wartości wytrzymałości mechanicznej (współczynnik pęknięcia obniżał się z 3000 do 500 mb) w glebach nawet o wysokiej zawartości jonów sodu, a w efekcie końcowym następowało zwiększenie plonów rośliny kontrolnej - kukurydzy, aż do 125%.

To niewątpliwie ciekawe zagadnienie nie znalazło jednak jeszcze szerszego zastosowania, gdyż na przeszkodzie temu stoją dosyć wysokie ceny preparatów, które w odniesieniu do cen produktów rolnych są ekonomicznie nieopłacalne. Dalsze prace badawcze pozwoliłyby może na znalezienie takich metod i środków, których zastosowanie do gleby będzie efektywne i będzie skutecznie zapobiegać występowaniu zjawiska powierzchniowego zaskorupiania.

P O D S U M O W A N I E

Dotychczasowy stan badań nad mechanizmem tworzenia się skorupy glebowej wskazuje, że powstaje ona w wyniku współdziałania czynników zewnętrznych, dostarczających energii, z właściwościami gleb, na które oddziałuje ta energia. Stosunkowo dużo napisano dotychczas o czynnikach zewnętrznych, do których zaliczano głównie niszczące działanie kropel deszczu oraz cykliczne procesy nawilżania i osuszania. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt niezgodności w literaturze naukowej co do zależności wytrzymałości skorupy od szybkości wysychania powierzchni gleby. Spośród właściwości gleb związanych z ich procesem zaskorupiania omówione są w dotychczasowej literaturze naukowej głównie: skład me-

chaniczny, substancja organiczna, wilgotność gleby w czasie oddziaływania czynników zewnętrznych oraz kationy wymienne.

Większość autorów wskazuje, że skład mechaniczny warstwy powierzchniowej gleby oraz substancja organiczna odgrywają istotną rolę w tworzeniu i wytrzymałości mechanicznej skorupy glebowej. Jednakże brak jest jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dotyczące wpływu poszczególnych frakcji mechanicznych gleby na jej zaskorupienie. Niedostatecznie też wyjaśnione jest zagadnienie wpływu minerałów ilastych na tworzenie i wytrzymałość mechaniczną omawianej skorupy.

Stosunkowo zgodne są wyniki badań wskazujące na słabsze zaskorupianie gleby, jeśli jest ona lepiej uwilgotniona w czasie oddziaływania sił zewnętrznych, sprzyjających tworzeniu zbitej warstwy powierzchniowej. Na tej podstawie niektórzy autorzy proponują nawet nawadnianie gleby przed opadami w celu zmniejszenia zaskorupienia. Dodatkowych badań i wyjaśnień wymaga zagadnienie wpływu jonów potasu i magnezu na powstawanie właściwości skorupy glebowej, gdyż dotychczasowe wyniki badań są często sprzeczne.

W dotychczasowych badaniach w zakresie oceny właściwości skorupy glebowej i jej wpływu na niektóre procesy zachodzące w glebach brano pod uwagę szczególnie sposoby oceny wytrzymałości mechanicznej skorupy, jej przepuszczalność, współzależności infiltracji z zaskorupianiem gleb, parowanie wody z gleb zaskorupionych oraz wpływ skorupy powierzchniowej na dyfuzję gazów w glebie.

Stosowane dotychczas sposoby oceny wytrzymałości mechanicznej skorupy glebowej budzą szereg zastrzeżeń, które dotyczą zarówno różnych sposobów przygotowywania modeli skorupy, jak też niemożliwości porównywania wyników ze względu na różne parametry przyrządów pomiarowych.

Najbardziej dyskusyjnym zagadnieniem jest dyfuzja gazów w glebie zaskorupionej. Jedni autorzy uważają, że przechodzenie gazów przez skorupę glebową jest ograniczone tak samo jak wejście wody do jej warstwy powierzchniowej. Inni twierdzą, że fizyczne właściwości powierzchniowej warstwy gleby nie są ważne w jej aeracji. Ostatnie badania wskazują, że współczynnik dyfuzji jest funkcją porowatości gleby i jej struktury.

W dalszych badaniach dotyczących zależności wschodów roślin od wytrzymałości skorupy powierzchniowej gleby trzeba większą uwagę zwrócić na ujednolicenie metod badań, gdyż dotychczasowe wyniki uzyskiwane przez różnych autorów są mało porównywalne.

W literaturze naukowej, w zakresie zapobiegania zaskorupianiu gleb, najczęściej wskazuje się na takie metody, jak: mechaniczne niszczenie skorupy glebowej, mulczowanie, zwiększenie zawartości wody w glebie, stosowanie 12% roztworu kwasu fosforowego, płynnych i granulowanych środków chemicznych rozluźniających glebę oraz substancji chemicznych, takich jak: alkohole tłuszczowe, zemulgowany alkohol tallowy, hexadekanol, a także innych niejonowych substancji powierzchniowo czynnych.

Stosunkowo dobre rezultaty w przeciwdziałaniu zaskorupiania gleb wykazują polielektrolity, ale ich stosowanie jest nieopłacalne. Należy więc prowadzić prace badawcze nad znalezieniem takich metod i środków, które będą nie tylko skuteczne, ale także i efektywne.

1. Ahuja L.R.: A numerical and similarity analysis of infiltration into crusted soils. *Water Resources Res.* 1973, 9, 987.
2. Ahuja L.R.: Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration through surface crust. *Soil Sci.* 1974, 118, 283.
3. Allison L.E., Moore D.G.: Effect of VAMA and HPAN soil conditioners on aggregation, surface crusting and moisture retention in alkali soils. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1956, 20, 143.
4. Allison L.E.: Soil and plant responses to VAMA and HPAN soil conditioners in the presence of high exchangeable sodium. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1956, 20, 147.
5. Anter F., Hilal M.H.: Studies on the problem of surface crust in calcareous soils. I. Effect of petroleum mulch on the formation of surface crust and seedlings of some crops. *Agrochimica* 1972, 16, 370.
6. Arndt W.: The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals, *Austr. J. Soil Res.* 1965, 3, 45.
7. Arndt W.: The impedance of soil seals and the forces of emerging seedlings. *Austr. J. Soil Res.* 1965, 3, 56.
8. Atsatt P.R., Bliss L.C.: Some effects of emulsified hexa-octadecanol on germination, establishment, and growth of Kentucky bluegrass. *Agron. J.* 1963, 55, 533.
9. Bakker J.W., Hidding A.P.: The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Neth. J. Agric. Sci.* 1970, 18, 37.
10. Barley K.P., Greacen E.L.: Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Adv. Agron.* 1967, 19, 1-43.

11. Baver L.D., Gardner W.H., Gardner W.R.: Soil physics. (4th Edition, Chapter 5. Soil structure, 219-222), New York 1972.
12. Benkenstein H.: Ein Beitrag zu Problemen beim Flüssigmulchen mit synthetischen Bodenverbesserungsmitteln. A.Thaeer.-Archiv. 1970, 14, 245.
13. Bennett O.L., Ashley D.A., Doss B.D.: Methods of reducing soil crusting to increase cotton seedling emergence. Agron. J. 1964, 56, 162.
14. Boekel P.: The utilization of Styromull in agriculture and horticulture. Bedrijfs. Ed. Tuinb. 1970, 1, 59.
15. Bresler E., Kemper W.D.: Soil water evaporation as affected by wetting methods and crust formation. Soil Sci.Soc.Amer. Proc. 1970, 34, 3.
16. Brooks R.H., Bover C.A., Reeve R.C.: The effect of various exchangeable cations upon the physical condition of soils. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1956, 20, 325.
17. Buckman H.C., Brady N.C.: Gleba i jej właściwości. PWRiL Warszawa, 1971.
18. Carnes A.: Soil crust - method of study, their strength and a method of overcoming injury to cotton stands. Agr.Eng. 1934, 15, 167.
19. Cernuda C.F., Smith R.M., Vincente-Chandler J.: Influence of initial soil moisture condition on resistance of macro-aggregates to slaking and to water impact. Soil Sci. 1954, 77, 19-27.
20. Celiszczeva Ł.K.: Wlijanie tołszczyny i swobodnoj poristosti prosochszewo słoja na insparienije. Poczwow. 1965, 3, 52.
21. Combating soil crusts. Agric.Res. (Washington) 1972, 20, 13.

22. Damagnez J.: The effect of surface cultivation during the summer on the water economy of bare soils in the Mediterranean region. C.R. Acad. Agric.Fr. 1959, 45, 241.
23. Domby C.W., Kohnke H.: The influence of soil crust on gaseous diffusion. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1956, 20, 1-5.
24. Drew L.O., Garner T.H., Kish A.J.: Influence of soil crusting on seedling emergence and factors contributing to crusting. Trans. ASAE 1965, 65, 149.
25. Duley F.L.: Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1939, 4, 60.
26. Edwards W.M., Larson W.E.: Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. Trans. ASAE 1969, 12, 463-465.
27. Ells J.E.: Prevention of stand losses in tomato due to soil crust formation. Amer.Soc.Hort.Sci. 1965, 87, 433.
28. Epstein E., Grant W.J.: Soil losses and crust formation as related to some soil physical properties. Soil Sci.Soc.Amer. Proc. 1967, 31, 547.
29. Emerson W.W.: A classification of soil aggregates based on their coherence in water. Austr. J. Soil Res. 1967, 5, 47.
30. Evans D.D., Buol S.W.: Micromorphological study of soil crusts. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1968, 32, 19.
31. Farrell D.A.: The effect of soil crusts on infiltration: The effect of aggregate size and depth of tillage on steady infiltration through crust-topped soils. Meded.Facult.Landbouwwetensch. Gent, 1972, 37, 1132.
32. Farrell D.A., Larson W.E.: Dynamics of the soil water system during a rainstorm. Soil Sci. 1972, 113, 88.

33. Garner T.H., Bowen H.D.: Plant mechanics of seedling emergence. Trans. ASAE 1966, 9, 650.
34. Gerard C.J., Cowley W.R., Kunze G.W.: Influence of drying conditions on noncapillary porosity. Soil Sci. 1966, 102, 59.
35. Geyer B., Villwock I.: Zum Abbauverhalten von Harnstoff-Formaldehydharz-Schaum beim Einsatz als Bodenverbesserungsmittel. Arch.Gartenbau 1973, 21, 223.
36. Gora A.: Der Einfluss synthetischer Schaumstoffe auf die physikalischen Kennwerte einer Tonmergelrendzina (mc 2). Wiss.Z.Friedrich Schiller Univ. Jena/Thur. 1968, 17, 561.
37. Gora A.: Zur Melioration tonreicher Böden mit synthetischen Schaumstoffen. A. Thaer-Archiv. 1969, 13, 547.
38. Gorbunow N.I., Bekarewicz N.E.: Istota tworzenia się skorupy glebowej i środki zapobiegające temu zjawisku. Poczwow. 1951, 4, 193.
39. Grisse A.De., Moussa F., Heungens A.: Nematicidal effect of the soil conditioner „Hygromull” on the soil inhibiting nematodes in comparison with Dupont 1410 and Busan 881. Meded.Facult.Landbouwwetensch. 1971, 36, 1365.
40. Hanks R.J., Thorp F.C.: Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate, and crust strength. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1956, 20, 307-310.
41. Hanks R.J., Thorp F.C.: Seedling emergence of wheat, grain sorghum, and soybeans as influenced by soil crust strength and moisture content. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1957, 21, 357.
42. Hanks R.J.: Soil crusting and seedling emergence. Trans. 7th Int. Cong. Soil Sci.Madison 1960, I-34, 340.

43. Hanks R.J., Bowers S.A.: Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1962, 26, 530.
44. Hedrick R.M., Mowry D.T.: Effects of synthetic polyelectrolytes on aggregation, aeration and water relationships of soil. Soil Sci. 1952, 73, 427.
45. Herzog R., Bosse O.: Zur Wirkung von Polystyrol der Ackerkrume auf einige physikalische Eigenschaften und die Erträge einer unterschiedlich bearbeiteten Tieflerode. A. Thaer-Archiv. 1970, 14, 829.
46. Hillel D.: Crust formation in loessial soils. Trans. 7th Int. Cong. Soil Sci. Madison 1960, I-33, 330.
47. Hillel D.: Infiltration and rainfall-runoff as affected by surface crust. Trans. 8th Int. Cong. Soil Sci. Bucuresti 1964, I-7, 53-62.
48. Hillel D., Gardner W.R.: Steady infiltration into crust-topped profiles. Soil Sci. 1969, 108, 137.
49. Hillel D., Gardner W.R.: Transient infiltration into crust-topped profiles. Soil Sci. 1970, 109, 69.
50. Holder C.B., Brown K.W.: Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crust. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1974, 38, 705.
51. Hudspeth E.B., Taylor H.M.: Factors affecting seedling emergence of Blackwell Switchgrass. Agron. J. 1961, 53, 331.
52. Huges T.D., Stone J.F., Huffine W.W., Gingrich J.R.: Effect of soil bulk density and soil water pressure on emergence of grass seedlings. Agron. J. 1966, 58, 549.
53. Jamison V.C.: Changes in air-water relationships due to structural improvement of soils. Soil Sci. 1953, 76, 143.

54. Jensen E.H., Frelich J.R., Gifford R.D.: Emergence force of forage seedlings. *Agron. J.* 1972, 64, 635.
55. Kaufmann H., Starcke P., Vorverk R.: Bodenverbesserung durch Einsatz synthetischer Industrieprodukte. *Dtsch. Gärtnerpost* 1970, 22, s. 5.
56. Kemper W.D., Noonan L.: Runoff as affected by salt treatments and soil texture. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1970, 34, 126.
57. Kullmann A.: Synthetische Bodenverbesserungsmittel. Veb *Dtsch.Landwirtschaftsverlag*, Berlin 1972, 1-122.
58. Kutilek M.: Infiltration into crust-topped soil. *Pol. J. Soil Sci.* 1974, 7, 1, 3.
59. Law J.P.Jr., Bloodworth M.E., Runkles J.R.: Reactions of surfactans with montmorillonitic soils. *Soil Sci.Soc.Amer. Proc.* 1966, 30, 327.
60. Lehfeldt J., Kullmann A., Müller H.H.: Beziehungen zwischen Emulsion seigenschaften, Applikationstechnologie und Bodenoberflächenbeschaffenheit beim Flüssigmulchen. *Arch.Acker.-u.Pfl.Bodenk.* 1973, 17, 513.
61. Lemon R.R.: The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1956, 20, 120.
62. Lemös P., Lutz J.F.: Soil crusting and some factors affecting it. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1957, 21, 485.
63. Lyles L., Disryd L.A., Woodruff N.P.: Effects of soil physical properties, rainfall characteristics, and wind velocity on clod desintegration by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc.Amer.Proc.* 1969, 33, 302.
64. Mazurak A.P., Mosher P.N.: Detachment of soil particles by simulated rainfall. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* 1968, 32, 716.
65. Mazurak A.P., Mosher P.N.: Detachment of soil aggregates by

- simulated rainfall, Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1970, 34, 798.
66. McIntyre D.S.: Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. Soil Sci. 1958, 85, 185.
67. McIntyre D.S.: Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci. 1958, 85, 261.
68. Meyer L.D.: Simulation of rainfall for soil erosion research. Trans. ASAE 1965, 8, 63.
69. Moldenhauer W.C., Koswara J.: Effect of initial clod size on characteristics of splash and wash erosion. Soil Sci.Soc. Amer.Proc. 1968, 32, 875.
70. Moldenhauer W.C., Kemper W.D.: Interdependence of waterdrop energy and clod size on infiltration and clod stability. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1969, 33, 297.
71. Morton C.T., Buchele W.F.: Emergency energy of plant seedlings. Agr.Eng. 1960, 41, 428-431, 453-455.
72. Myhrman M.A., Evans D.D.: Hexadecanol in soil. Its locational stability and influence on modulus of rupture. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1969, 33, 203.
73. Neal J.H., Baver L.D.: Measuring the impact of raindrops. J.Amer.Soc.Agr. 1937, 29, 708.
74. Olsen S.R., Watanabe F.S., Clark T.E., Kemper W.D.: Effect of hexadecanol on evaporation of water from soil. Soil Sci. 1964, 97, 13.
75. Palmer R.S.: Water drop impact forces. Trans. ASAE 1965, 8, 69-70, 72.
76. Parker J.J.Jr., Taylor H.M.: Soil strength and seedling emergence relation. I. Soil type, moisture tension, temperature and planting depth effects. Agron. J. 1965, 57, 289.
77. Peczorski I.A., Echlakowa N.G.: Zmiana w składzie agregato-

wym gleb traktowanych żużłami. Trudy Sielch. Naucz. Inst. 1967, 3, 130.

78. Philip J.R.: An infiltration equation with physical significance. Soil Sci. 1954, 77, 153.
79. Qashu H.K., Evans D.D.: Effect of black granular mulch on soil temperature, water content and crusting. Soil Sci.Soc. Amer.Proc. 1967, 31, 429.
80. Qayyum A.M., Kemper W.D.: Salt-concentration gradients in soils and their effect on moisture movement and evaporation. Soil Sci. 1962, 93, 333.
81. Reeve R.C., Bower C.A., Brooks R.H., Gschwend F.B.: A comparison of the effect of exchangeable sodium and potassium upon the physical condition of soils. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1954, 18, 130.
82. Richards L.A.: Modulus of rupture as an index of surface crusting of soil. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1953, 17, 321.
83. Rose C.W.: Rainfall and soil structure. Soil Sci. 1961, 91, 49.
84. Rose C.W.: Some effects of rainfall, radiant drying and soil factors on infiltration under rainfall into soils. J. Soil Sci. 1962, 13, 286.
85. Sor K., Bertrand A.R.: Effects of rainfall energy on the permeability of soils. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1962, 26, 293.
86. Stout B.A., Buchele W.F., Snyder F.W.: Effect of soil compaction on seedling emergence under simulated field conditions. Agr.Eng. 1961, 42, 68.
87. Świętochowski B.: Ogólna uprawa roli i roślin. PWRiL Warszawa, 1965.
88. Tackett J.L., Pearson R.W.: Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. Soil Sci. 1965, 99, 407.

89. Takagi S.: Analysis of the vertical downward flow of water through a two-layered soil. Soil Sci. 1960, 90, 98.
90. Taylor H.M.: Seedling emergence of wheat, grain sorghum, and grass as affected by rigidity and thickness of surface crust. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1962, 26, 431.
91. Taylor H.M., Parker J.J.Jr., Roberson G.M.: Soil strength and seedling emergence relations. II. A generalized relation for gramineae. Agr.J.1966, 58, 393.
92. Taylor H.M.: Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In „Soil compact agriculture”, Chapter 6, 292.
93. Trzecki S., Kasztelan J.: Próba wyznaczenia granicznych oporów gleby dla wschodów niektórych gatunków roślin uprawnych (badania wazonowo-laboratoryjne). „Międz. Konf. Nauk nt. Współczesne kierunki w uprawie roli”. Warszawa, Olsztyn, Puławy, wyd. IUNG 1972, 69.
94. Urban V.: Docasná ochrana zemních svahu umělými prostrědky. Meliorace, Sb. UVTI 1971, 7, 139.
95. Van Bavel C.H.M.: A soil aeration theory based on diffusion. Soil Sci. 1951, 72, 33.
96. Wang F.C., Lakshminarayana V.: Mathematical simulation of water movement through unsaturated nonhomogenous soils. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 1968, 32, 329.
97. Williams W.A.: Evaluation of the emergence force exerted by seedling of small-seeded legumes using prohibit analysis. Agr. J. 1956, 48, 273.
98. Ziernicki S., Józefaciuk Cz.: Erozja i jej zwalczanie. PWRiL Warszawa, 1965.

S P I S T R E Ś C I

	Str.
W S T Ę P	5
MECHANIZM POWSTAWANIA SKORUPY GLEBOWEJ	6
Czynniki zewnętrzne:	
Niszczące działanie kropel deszczu	8
Powstawanie skorupy glebowej w wyniku cyklicz- nych procesów nawilżania i osuszania	17
Czynniki glebowe:	
Skład mechaniczny	22
Substancja organiczna	23
Wilgotność gleby w czasie oddziaływania czynników zewnętrznych wywołujących zaskorupianie	26
Zawartość kationów wymiennych a powstawanie sko- rupy glebowej	28
OCENA WŁAŚCIWOŚCI SKORUPY GLEBOWEJ I JEJ WPŁYWU NA	
NIEKTÓRE PROCESY ZACHODZĄCE W GLEBACH	30
Ocena wytrzymałości mechanicznej skorupy	30
Przepuszczalność wytworzonej skorupy glebowej	34
Infiltracja a zaskorupianie gleb	35
Parowanie wody z gleb zaskorupionych ,	41
Wpływ skorupy powierzchniowej na dyfuzję gazów w glebie	44
WŁAŚCIWOŚCI SKORUPY A KIEŁKOWANIE I WSCHODY ROŚLIN	
UPRAWNYCH	46
METODY ZAPOBIEGANIA ZASKORUPIANIU GLEB UPRAWNYCH	
Mechaniczne niszczenie skorupy glebowej	52
Mulczowanie (ściółkowanie)	52

	Str.
Zwiększanie zawartości wody w glebie	53
Zastosowanie 12% roztworu kwasu fosforowego . .	54
Użycie płynnych i granulowanych środków chemicz- nych rozluźniających glebę	54
Zastosowanie polielektrolitów (kondycjonerów glebowych) do walki z zaskorupianiem powierzch- niowym gleb uprawnych	56
P O D S U M O W A N I E	57
P I Ś M I E N N I C T W O	60

Dotychczas ukazały się następujące numery

PROBLEMÓW AGROFIZYKI

1. Jan Gliński, Witold Stępniewski - Zastosowanie chromatografii gazowej w badaniach gleboznawczych.
2. Piotr Kowalik - Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej.
3. Jan Gliński, Jerzy Duliban - Potencjał oksydoredukcyjny w glebach.
4. Małgorzata Dąbek-Szreniawska - Mikrobiologiczne aspekty tworzenia się agregatów glebowych.
5. Bogusław Szot - Rozwój badań właściwości fizycznych materiałów rolniczych.
6. Ignacy Dechnik, Janusz Stawiński - Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb.
7. Adam Pukos, Ryszard Walczak - Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb.
8. Bogusław Szot, Grażyna Kolemba - Metody oceny wylegania zbóż.
9. Janusz Haman, Bogusław Szot, Wanda Woźniak - Zagadnienie wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych.
10. Materiały seminarium poświęconego fizyce wody glebowej. Praca zbiorowa.
11. Henryk Czachor, Ryszard Walczak - Zamknięte źródła radioizotopowe w badaniach fizycznych właściwości gleb.
12. Zastosowanie analizy spektralnej w badaniach rolniczych. Praca zbiorowa.
13. Krystyna Konstankiewicz, Adam Pukos, Ryszard Walczak - Domenowa teoria histerezy dla termodynamicznych procesów w glebie.

14. Jerzy Szczypa, Zofia Sokołowska - Zastosowanie radioizotopów do badania fizykochemicznych właściwości gleb.
15. Janusz Haman, Adam Pukos - Aktualne zagadnienia mechaniki gleb.
16. Jan Gliński, Zofia Stępniewska - Zastosowanie elektrod selektywnych w badaniach gleboznawczych.
17. Ignacy Dechnik, Jerzy Lipiec - Zwięzłość gleby jako czynnik środowiska rozwoju roślin.
18. Ignacy Dechnik, Stanisław Tarkiewicz - Zmiany właściwości agrofizycznych gleb pod wpływem działania narzędzi aktywnych.
19. Ryszard Walczak, Barbara Witkowska - Metody badania i sposoby opisywania agregacji gleby.
20. Władysław Byszewski, Janusz Pala - Niektóre aspekty związku między poziomem mechanizacji produkcji roślinnej a właściwościami fizycznymi roślin.

Problemy Agrofizyki można nabyć w księgarni OR PAN
Pałac Kultury i Nauki, 00-901 Warszawa.