ISSN 0552-9778

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION

PAMIĘTNIK PUŁAWSKI

UWILGOTNIENIE GLEB I ZUŻYCIE WODY PRZEZ ROŚLINY W ZALEŻNOŚCI OD WYBRANYCH CZYNNIKÓW AGROTECHNICZNYCH

ROZPRAWA HABILITACYJNA

ZESZYT 123 2000

PUŁAWY

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION

Dyrektor: prof. dr hab. Seweryn Kukuła

Komitet Redakcyjny:

prof. dr hab. Seweryn Kukuła (przewodniczący), prof. dr hab. Mariusz Fotyma, prof. dr hab. Tadeusz Górski, prof. dr hab. Marian Jurzysta, prof. dr hab. Jan Kuś, prof. dr hab. Stefan Martyniuk, prof. dr hab. Jan Mazurek, prof. dr hab. Henryk Terelak

Praca habilitacyjna wykonana
w Zakładzie Gleboznawstwa, Erozji i Ochrony Gruntów
kierownik: dr Tomasz Stuczyński

Recenzję wydawniczą wykonał
prof. dr hab. Jerzy Lipiec

PAMIĘTNIK PUŁAWSKI – ROZPRAWA HABILITACYJNA

UWILGOTNIENIE GLEB I ZUŻYCIE WODY PRZEZ ROŚLINY W ZALEŻNOŚCI OD WYBRANYCH CZYNNIKÓW AGROTECHNICZNYCH

Ewa Antonina Czyż

ZESZYT 123 2000

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 7

2. PRZEGLĄD LITERATURY 8
2.1. Stosunki wodne gleb a plonowanie roślin uprawnych 8
2.2. Właściwości wodne gleb 10
2.3. Elementy bilansu wodnego gleb 12
2.4. Charakterystyka potrzeb wodnych roślin uprawnych 16
2.5. Zużycie wody przez rośliny 20

3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ 24
3.1. Opis doświadczenia 24
3.2. Schemat doświadczenia 24
3.2.1. Warianty glebowe 25
3.2.2. Warianty nawożenia mineralnego 27
3.2.3. Warianty nawadniania i nawożenia obornikiem 28
3.3. Zmianowanie roślin 30

4. APARATURA I METODYKA BADAŃ 31
4.1. Warunki meteorologiczne 31
4.2. Pomiary wilgotności gleb i określenie krzywej retencji pF 32
4.3. Pomiary przesiąku glebowego 35
4.4. Bilans wodny gleb 35
4.5. Plonowanie roślin 36
4.6. Wskaźniki zużycia i wykorzystania wody przez rośliny 36
4.7. Analiza statystyczna 37

5. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH 37
5.1. Temperatura powietrza 37
5.2. Opad atmosferyczny 40

6. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA 45
6.1. Warunki wodne gleb 45
6.1.1. Dynamika uwilgotnienia gleb w zależności od ich składu granulometrycznego 45
6.1.2. Dynamika uwilgotnienia gleb w zależności od poziomu nawożenia mineralnego 52
6.1.3. Dynamika uwilgotnienia w warunkach stosowania nawadniania interwencyjnego 60
6.1.4. Dynamika uwilgotnienia gleb w warunkach nawożenia obornikiem 69
6.2. Przesiąki glebowe na tle opadów atmosferycznych i badanych czynników 73
6.3. Plonowanie roślin uprawnych 79
6.4. Bilans wodny gleb i rzeczywiste zużycie wody (WU) przez rośliny w zależności od badanych czynników 93
6.5. Wskaźniki zużycia i wykorzystania wody przez rośliny uprawne 107

6.5.1. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez ziemniak 108
6.5.2. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez jęczmień jary 113
6.5.3. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rzepak ozimy 116
6.5.4. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez pszenicę ozimą 119
6.5.5. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny w zależności od badanych czynników 121
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 129
8. LITERATURA 131
9. STRESZCZENIE 140
10. OBJAŚNIENIA I SYMBOLE 142

1. WSTĘP

Gospodarowanie zasobami wodnymi gleb w produkcji roślinnej jest stale aktualnym problemem z uwagi na to, iż w warunkach klimatycznych Polski uwilgotnienie gleb oraz wielkość i rozkład opadów atmosferycznych determinują wzrost, rozwój i plonowanie roślin uprawnych. Ilościową analizę dostępności wody dla roślin charakteryzuje uwilgotnienie gleb i wielkość siły ssącej, określające retencję wodną niezbędną do wyznaczenia bilansu wodnego gleb. Zmiany systemów i technologii uprawy oraz użytkowania gleb uzasadniają potrzebę określenia parametrów retencji i bilansu wodnego gleb w nawiązaniu do agrotechniki. Badania te są niezbędne do oceny stosunków wodnych gleb i efektywnego ich wykorzystania w produkcji rolniczej.

Pomimo dużego zainteresowania bilansem wodnym gleb i wykorzystaniem wody przez rośliny uprawne brak jest badań nad rzeczywistym zużyciem wody. Badania krajowe i zagraniczne koncentrowały się głównie na analizie polowego a nie rzeczywistego zużycia wody. Opracowano również szereg modeli matematycznych szacujących zużycie wody. Najpowszechniej stosowanym w tym celu algorytmem są równania Penmana (13, 32, 136, 160).

Podstawowa trudność w ocenie rzeczywistego zużycia wody wynika z braku pomiaru ilości wody infiltrującej w głąb profilu glebowego w sezonie wegetacyjnym i w roku hydrologicznym. Stosowane metody dynamicznego pomiaru uwilgotnienia gleb pozwalają na pośrednie określenia ruchu wody w glebie. Uzyskane w ten sposób dane nie zawsze odzwierciedlają wartości rzeczywiste. Bezpośrednie straty ilości wód infiltrujących w głąb profilu glebowego możliwe są do określenia w warunkach doświadczeń lizymetrycznych odtwarzających profile glebowe (naturalne układy). Eliminuje to wpływ szeregu czynników losowych (1, 19). W badaniach własnych wykorzystana została do tego celu stacja lizymetryczna zlokalizowana w IUNG w Puławach, która jest dobrze przygotowanym obiektem umożliwiającym badania gospodarki wodnej gleb i roślin.

Dane dotyczące rzeczywistego zużycia wody przez rośliny i bilansu wodnego gleb są niezmiernie cenne zarówno z praktycznego, jak i z poznawczego punktu widzenia. W aspekcie praktycznym stanowią one podstawę optymalizacji gospodarki wodnej roślin uprawnych, zwłaszcza w warunkach nawadniania, a w poznawczym umożliwią pełną charakterystykę potrzeb wodnych poszczególnych gatunków roślin uprawnych w kontekście plonów rzeczywistych i potencjalnych.

Wyniki licznych badań krajowych i zagranicznych (6, 8, 10, 11, 19, 25, 67, 85, 99) nie wyjaśniają w pełni wpływu czynników agrotechnicznych (nawożenie mineralne i organiczne oraz interwencyjne uzupełnienie niedoboru wody) w powiązaniu z warunkami agrometeorologicznymi na gospodarkę wodną i plonowanie roślin (ziemniak, jęczmień jary, rzepak ozimy, pszenica ozima).

Dla wyjaśnienia tego zagadnienia przeprowadzono 16-letnie badania lizymetryczne, których celem było:

- określenie wpływu warunków glebowych, nawożenia mineralnego i organicznego oraz nawadniania interwencyjnego na warunki wodne gleb, odpływ wody w głąb profilu glebowego oraz plonowanie roślin uprawnych,
- wyznaczenie bilansu wodnego gleb w warunkach uprawy roślin i ugorowania gleb,
- określenie rzeczywistego zużycia wody przez ziemniak, jęczmień jary, rzepak ozimy i pszenicę ozimą w zależności od czynników agrotechnicznych i agrometeorologicznych,
- określenie plonotwórczego wykorzystania wody przez rośliny uprawne na podstawie wskaźników jej zużycia i wykorzystania w określonym układzie czynników agrotechnicznych.

Założono, że uzyskane wyniki prowadzonych badań dostarczą odpowiednich danych do oceny wykorzystania zasobów wodnych gleb oraz do modelowania zjawisk określających zachowanie się wody w układzie gleba – roślina – klimat (atmosfera). Będą one pomocne m.in. przy opracowaniu zaleceń optymalizacji nawożenia i nawadniania, jako podstawowych czynników decydujących o produkcyjności roślin uprawnych i racjonalizacji gospodarki wodnej gleb.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. STOSUNKI WODNE GLEB A PLONOWANIE ROŚLIN UPRAWNYCH

Woda jest czynnikiem niezbędnym do życia wszelkich organizmów. Najważniejsze funkcje, jakie spełnia woda w roślinie to: rozpuszczanie składników pokarmowych znajdujących się w glebie i ich transport w roślinie, udział w procesach asymilacji energii promienistej i CO_2 oraz w syntezie węglowodanów i innych związków organicznych, regulowanie procesów oddychania, transpiracji i utrzymanie turgoru komórek (33, 129, 135, 153). Woda w produkcji roślinnej potrzebna jest dla: samej rośliny, mikroorganizmów glebowych, utrzymania prawidłowej struktury roli w czasie uprawy, utrzymania odpowiedniego stanu wilgotności powietrza atmosfery przyziemnej, korzystnego dla gospodarki wodnej samej rośliny. Woda, jako ważny czynnik glebotwórczy, wywiera bardzo duży wpływ na przebieg procesów kształtujących właściwości gleb, procesów wietrzenia, humifikacji i mineralizacji związków organicznych, występowanie zjawisk deluwialnych i aluwialnych oraz życie roślin i mikroorganizmów glebowych. W stanie płynnym woda glebowa jest roztworem zawierającym związki organiczne, mineralne, organiczno-mineralne oraz gazowe – tlen i dwutlenek węgla (2, 31).

Zawartość wody w glebie decyduje o wielkości plonów i o ich jakości. Nawet jeśli suma opadów atmosferycznych mogłaby zaspokoić potrzeby wodne roślin, to

niekorzystny rozkład opadów w okresie wegetacji wpływa na zahamowanie wzrostu, rozwoju i plonowania roślin. Zwiększanie wilgotności gleby odnosi pozytywny skutek do momentu, w którym nie wystąpi zjawisko niedostatku tlenu w glebie (43, 144, 155).

Na stosunki wodne gleb można oddziaływać jedynie w pewnym zakresie, a szczególnie przez:

1. magazynowanie wód wiosennych odpowiednią orką zimową i wykonywanie zabiegów zatrzymujących śnieg (135, 163);
2. zwiększenie retencji wodnej gleb w wyniku poprawy ich struktury, wzrost zawartości próchnicy i substancji ilastych, zabiegi uprawowe (28, 33, 34, 153);
3. stosowanie odpowiedniego nawożenia mineralnego i organicznego (2, 20, 24-26, 60, 61, 68, 72, 76, 112, 153);
4. nawadnianie lub deszczowanie (15, 21, 24, 25, 30, 33, 37, 56, 65, 66, 101, 137).

Duży wpływ na gospodarkę wodną gleb mają zabiegi zmniejszające straty wody poprzez ograniczenie – zapobieganie parowaniu z powierzchni gleby oraz zwiększenie jej pokrycia roślinnością. Zawartość wody w glebie zależy od wielu czynników, w tym szczególnie od ilości opadów i parowania, składu granulometrycznego, rzeźby terenu, głębokości występowania poziomu wody gruntowej, uprawy roli, nawożenia i okrywy roślinnej (33, 96, 135-137).

Rozwój badań nad regulacją stosunków wodnych gleb w Polsce wiąże się z powstawaniem systemów deszczowni. Pierwsze deszczownie wykonane w 1908 r. przez Władysława Szczepkowskiego dały początek badaniom nad nawadnianiem roślin uprawnych w Polsce, najpierw w ówczesnym Księstwie Poznańskim, później w Wielkopolsce. Wyniki badań wskazują, że zwyżki plonów ziemniaków pod wpływem deszczowania wahały się od 36 do 186 q na hektar (przy sumie opadów od czerwca do sierpnia = 98–227 mm). Późniejsze badania z nawadnianiem ziemniaków wykazały również wzrost plonów tej rośliny w granicach 16–93%. Przy nawadnianiu zbóż otrzymano zwyżki plonów żyta o 71%, pszenicy ozimej i owsa o 89% oraz zielonek o 42–150% (156). W doświadczeniach z wpływem deszczowania na efektywność nawodnień roślin w warunkach przeciętnego i wysokiego nawożenia mineralnego uzyskano zwyżki plonów zbóż w granicach 30–65%, okopowych 15–50%, pastewnych 15–65% i motylkowatych 15–70% (36, 40).

W badaniach przeprowadzonych na madzie piaszczystej głębokiej w Swojcu z nawadnianiem 10 gatunków roślin uprawnych 40 mm dawką wody w różnych fenofazach, przy zróżnicowanym nawożeniu mineralnym D z i e ż y c i R o j e k (40) wykazali, że nawadnianie zbóż w fazach wcześniejszych (krzewienia, początku strzelania w źdźbło) zwiększyło plon słomy, a w fazach późniejszych (wykształcania ziarna, dojrzałości mleczno-woskowej) plon ziarna. Ziemniak nawadniany tuż po kwitnieniu, niezależnie od poziomu nawożenia mineralnego, plonował o 15–37% wyżej niż na kontroli, a burak cukrowy i marchew pastewna nawadniane w fazie grubienia korzenia nawet o 40%. W późniejszych badaniach przeprowadzonych w Swojcu na madzie piaszczystej całkowitej (V klasa bonitacyjna),

T r y b a ł a (156) wykazał, że największe zwyżki w stosunku do kontroli dawało równoczesne stosowanie nawożenia i nawadniania (zboża 80–100%, okopowe 40–70%, jednoroczne pastewne do 60%). W badaniach tych stwierdzono również, że jednorazowe dawki wody mniejsze od 20 mm niedostatecznie zwilżały glebę i nie wpływały istotnie na plonowanie roślin. Przeprowadzony przez autora rachunek ekonomiczny wykazał, że najbardziej efektywne były dawki wody w granicach 80–120 mm w połączeniu z potrójnymi dawkami nawozów mineralnych.

W ścisłych polowych doświadczeniach przeprowadzonych w latach 1971–1974 i 1972–1975 na glebach lekkich J a n k o w i a k (65) stwierdził, że na nawadnianie najlepiej reagowały rośliny okopowe, następnie pastewne, a najsłabiej zbożowe. Efekty nawadniania, zróżnicowane w latach, zależały od wielkości i rozkładu opadów atmosferycznych w okresie wegetacji. Największe przyrosty plonów wyniosły średnio: buraka cukrowego 12,0 t/ha korzeni i 13,3 t/ha liści, ziemniaka w plonie głównym – 9,6 t/ha, ziemniaka w plonie wtórym – 7,8 t/ha bulw, pszenicy ozimej 0,7 t/ha ziarna i 1,1 t/ha słomy.

D z i e ż y c i T r y b a ł a (41, 52), J a n k o w i a k (65) oraz P a n e k (104) wykazali, że nawadnianie zwiększa plon roślin uprawnych w Polsce średnio o 15 do 35%, a K a r c z m a r c z y k i in. (71) stwierdzili, że w latach o dużych niedoborach opadów wzrost plonów ziarna pszenicy na glebach lekkich pod wpływem nawadniania dochodził do 143%, wysokiego nawożenia do 94%, a łącznego stosowania tych zabiegów do 240%.

2.2. WŁAŚCIWOŚCI WODNE GLEB

Dostępność wody glebowej dla roślin zależy od zawartości wody w glebie i siły wiążącej ją z glebą (33, 94, 153). Z rolniczego punktu widzenia najważniejsza jest ilość wody zatrzymana w glebie w formie dostępnej dla roślin (153). Większość gleb uprawnych zatrzymuje w profilu od 90 do 250 mm wody dostępnej. Ilość ta zależy głównie od składu granulometrycznego i w warstwie 0–100 cm kształtuje się następująco (mm): piasek luźny – 90, piasek słabogliniasty – 117, piasek gliniasty lekki – 138, piasek gliniasty mocny – 155, glina lekka – 185, glina średnia – 200, glina ciężka – 240, ił – 220, pył zwykły – 200 i pył ilasty – 244 (149). Ś l u s a r c z y k (149) przyjmuje, że woda łatwo dostępna dla roślin stanowi tylko około 50% wody ogólnie dostępnej.

Woda jest z różną siłą wiązana przez fazę stałą gleby: najsilniej – woda wbudowana w krystaliczną sieć minerałów glebowych, słabiej – woda zaadsorbowana siłami molekularnymi na powierzchni fazy stałej, słabo – woda utrzymywana przez siły kapilarne (woda kapilarna) oraz woda nie związana zawarta w przestworach niekapilarnych (woda grawitacyjna). O dostępności wody glebowej dla roślin (zaopatrzeniu roślin w wodę) decyduje, poza jej ilością w glebie również forma w jakiej występuje lub siła z jaką jest wiązana przez fazę stałą gleby (siła ssąca); (94, 102). Siła ssąca gleby jest sumą sił osmotycznych, hydrostatycznych, grawita-

cyjnych i kapilarnych. Siły kapilarne występujące w porach glebowych na granicy faz: stałej, ciekłej i gazowej mają największe znaczenie. Siły te zatrzymują wody opadowe w glebie i decydują o podsiąku wód gruntowych ku powierzchni gleby (33, 153, 159). Przyjmuje się najczęściej, że woda higroskopowa jest związana siłami większymi niż 1,5–2,0 MPa, woda błonkowa – do 1,5 MPa, woda kapilarna – do 1,0 MPa, zaś woda grawitacyjna – mniejszymi niż 0,05 MPa. Tylko woda higroskopowa jest niedostępna dla roślin. Woda grawitacyjna, teoretycznie łatwo dostępna dla roślin, zwykle szybko uchodzi poza zasięg systemu korzeniowego i praktycznie jest słabo wykorzystywana przez rośliny (33).

Istnieje ścisła relacja między siłą ssącą gleby i zawartością wody w glebie a potencjałem wody glebowej ($pF = \log_{10} h$) tj. logarytmem siły ssącej utrzymującej wodę w glebie. Ssanie wody przez glebę wiąże się bezpośrednio ze ssaniem wody przez pory kapilarne. Pomiędzy siłą ssącą gleby (potencjałem wody glebowej) a jej wilgotnością istnieje zależność polegająca na większej skłonności do zasysania wody przez gleby bardziej suche i mniejszej, przez gleby bardziej wilgotne (94). Pobieranie wody przez rośliny jest tym trudniejsze, im większe jest ssanie wody glebowej (102).

Rozmieszczenie wody glebowej w porach glebowych ściśle wiąże się z jej potencjałem, im większy jest potencjał wody glebowej (większa siła ssania gleby), tym mniejsza jest średnica porów w których ona się znajduje. Woda użyteczna znajduje się tylko w porach glebowych o średnicy 300–0,2 μm, natomiast pory niekapilarne (>300 μm) w których nie może się utrzymać woda grawitacyjna wypełnione są powietrzem (94, 163). Gleby o dużej objętości makroporów mają dostateczną dla korzeni roślin zawartość powietrza nawet przy wysokim poziomie wody gruntowej (101). S h a r m a i U e h a r a (140) twierdzą, że zdolności retencyjne gleb przy małych wartościach ssania są w większości determinowane wielkością sił zatrzymujących wodę w przestworach kapilarnych oraz rozkładem porów glebowych.

Retencja wodna gleb jest to zdolność gleby do zatrzymywania i magazynowania wody (33, 149). Najczęściej zawartość wody (θ) w glebie stanowi podstawę badań bilansu wodnego, natomiast ciśnienie ssące określa dostępność wody dla roślin. Krzywe retencyjności mogą być pomocne do oceny aktualnego uwilgotnienia gleb, określenia polowej pojemności wodnej i porowatości gleb oraz obliczenia objętości porów o różnej średnicy i związanych z tym określeniem potencjalnej i efektywnej retencji użytecznej (102).

Krzywe retencji pF (θ) umożliwiają obliczenie: retencji wodnej użytecznej (potencjalnej rezerwy retencji): pF 2,0 – pF 4,2 i retencji wodnej produkcyjnej (użytecznej rezerwy retencji): pF 3,7 – pF 4,2 (64, 101, 102), stanowią one również informację o właściwościach fizycznych gleb, zwłaszcza właściwościach wodno-powietrznych, porowatości różnicowej (dyferencyjnej) i ilości wody zatrzymywanej w glebie (33, 94). Krzywe pF umożliwiają oznaczenie pełnej pojemności wodnej – pF 0, polowej pojemności wodnej – pF 2,0–2,5, wilgotności hamowania wzro-

stu roślin (wilgotność krytyczna) – pF 3,7 i wilgotności trwałego więdnięcia (punkt trwałego więdnięcia) – pF 4,2. Przebieg krzywej pF w zakresie odpowiadającym wysokim i średnim potencjałom wody w glebie (pF > 3,0) związany jest przede wszystkim ze składem granulometrycznym, powierzchnią właściwą i hydrofilnością koloidów glebowych (159). Wilgotność gleb przy określonym pF rośnie wraz ze wzrostem zawartości w glebie części spławialnych. Mniejsze pF mają piaski luźne, a największe – iły (33).

Woda dostępna dla roślin zawiera się w przedziale od pF 2, ewentualnie pF 2,5 (zależnie od poziomu wody gruntowej i składu granulometrycznego gleby) do pF 4,2 (33). Korzenie roślin w rzeczywistości mogą wywierać ssanie wody większe od pF 4,2, ale przewodność kapilarów glebowych staje się wówczas tak mała, że straty wody przez transpirację nie mogą być na czas uzupełniane. Dlatego optymalny wzrost większości roślin uprawnych przebiega przy wilgotności pF > 2,0, natomiast wilgotność początku hamowania wzrostu roślin odpowiada pF 2,85–3,0, a całkowite hamowanie wzrostu roślin następuje przy pF 3,7 (31, 33, 159). Wilgotność trwałego więdnięcia roślin odpowiada pF 4,2 (31, 159). Maksymalna higroskopowość gleby (pojemność higroskopowa) jest to całkowita ilość pary wodnej absorbowana z powietrza przez glebę przy wartości pF 4,7 (33).

Na wielkość sił utrzymujących wodę w glebie wpływa także zawartość próchnicy, koloidów, a nawet poszczególnych kationów, temperatura, nawożenie, zabiegi agrotechniczne itp. Czynnikami decydującymi o retencji wodnej gleb są: ogólna powierzchnia cząstek glebowych (33, 101, 149, 153), struktura gleby (102, 140, 153), zawartość minerałów ilastych (33, 153), zawartość substancji organicznej (33, 140, 153, 163), tekstura profilu glebowego (149, 153), głębokość występowania wód gruntowych (102, 149).

2.3. ELEMENTY BILANSU WODNEGO GLEB

Gospodarkę wodną gleby określa się na podstawie bilansu wodnego (159). Bilans ten obejmuje elementy wzbogacające gleby w wodę (wyjściowy zapas wody, opady, przesiąkanie kapilarne, kondensacja kapilarna pary wodnej i nawadnianie) i jej rozchody (parowanie wody z powierzchni gleby – ewaporacja, parowanie z powierzchni roślin – transpiracja, spływy powierzchniowe i odciek grawitacyjny). Obliczenie przychodów i rozchodów wody za ustalony okres dla danego obszaru określa się mianem bilansu wodnego (6, 7, 8).

Źródłem wody glebowej są: opady atmosferyczne (deszcz, śnieg, grad) i kondensacja pary wodnej (w profilach gleb lekkich dochodząca do 5% sumy opadów rocznych) oraz rosa i mgła (92), a także wody powierzchniowe i gruntowe oraz ewentualnie nawadnianie. Rosa uzupełnia około 5–7% dziennych strat wody u roślin i jest dodatkowym źródłem wody bezpośrednio pobieranej przez ich części nadziemne; szczególnie nabiera ona znaczenia w okresie posusznym. Ważny jest czas pozostawania wody na roślinach i zmniejszenie dzięki temu transpiracji. Zna-

czenie występowania rosy jest duże, gdyż ograniczenie transpiracji pozwala roślinie łatwiej uzupełnić deficyt wody (22, 24, 31, 35, 41, 42, 61, 65, 71-73, 109, 152).

Opady. Częstotliwość występowania niedoborów opadów dla roślin uprawnych maleje ze wzrostem zwięzłości gleb i zależy od potrzeb wodnych roślin w okresie od początku wegetacji do zbioru. W Polsce na glebach lekkich wynosi ona, zależnie od wczesności odmian, dla pszenicy 78%, dla ziemniaka 71–79%. Na glebach średnich częstotliwość niedoboru opadów jest mniejsza niż na glebach lekkich i w zależności od odmiany wynosi dla zbóż jarych około 6%, dla pszenicy ozimej 24%, a dla ziemniaka 31–71%. Na glebach ciężkich zboża ozime najczęściej nie odczuwają braku opadów, zboża jare – bardzo rzadko, okopowe – często (np. ziemniak 39–71%); (33).

Ilość opadów atmosferycznych docierających do powierzchni gleby w łanie roślin zależy od zjawiska intercepcji (75), polegającego na zatrzymaniu części wody opadowej na roślinie, co zmniejsza jej ilość docierającą do gleby. Woda ta wyparowuje w znacznym stopniu do atmosfery, zaś śnieg ulega sublimacji. Straty wody zachodzące w ten sposób wynoszą w przypadku zwartego łanu pszenicy w pełni rozwoju 15–42% opadu, ziemniaka 12–13% (75), a jęczmienia jarego w fazie maksymalnego ulistnienia do 46%, a nawet 52,3% (67, 75). O r z e ł (103) stwierdził, że średnia dla 4 lat intercepcja opadów przez łan pszenicy ozimej wyniosła nawet 38%. L e u n i n g i in. (91) w badaniach intercepcji wody, przy użyciu minilizimetrów (o powierzchni 100 mm x 150 mm) umieszczonych w międzyrzędziach pszenicy stwierdzili, że straty wody opadowej przez intercepcję pszenicy wyniosły 33% całkowitego opadu (114 mm). L e e n h a r d t i in. (89) podają, że intercepcja opadu w zależności od stadium roślin jest funkcją wskaźnika powierzchni liści (LAI), o stałym współczynniku proporcjonalności pomiędzy 0,15 a 0,25.

Przeciętna suma opadów w Polsce wynosi na równinach od 450 do 700 mm, w górach od 700 do 1200 mm (33). Wielkości te w poszczególnych latach mogą być większe o 100%, a nawet o 200%.

Parowanie jest to przejście wody ze stanu ciekłego w stan gazowy. Parowanie z wolnej powierzchni wody lub z gleby, nazywamy ewaporacją, a z wnętrza roślin przez aparaty szparkowe – transpiracją. Z uwagi na trudność oddzielnego określenia wielkości parowania z gleby i roślin, najczęściej wartości te podaje się łącznie jako ewapotranspirację (13). Według S c h m u c k a (cyt. za 33) wyparowanie wody z wolnej powierzchni gleby i powierzchni wody waha się w ciągu roku od 660 do 770 mm, w tym na okres lata przypada aż 75% tej wartości. Parowanie z powierzchni gleby i parowanie roślin (ewaporacja + transpiracja) są nieco mniejsze i zależą od pogody, pokrycia gleby roślinnością, rodzaju roślin, zmian temperatury, niedosytu wilgotności powietrza, podsiąkania (szybkości podsiąkania kapilarnego), głębokości zalegania wody gruntowej, wilgotności gleby, jej barwy, charakteru powierzchni, wystawy, warunków klimatycznych itp (9, 83). Im większa jest wilgotność gleb, tym silniejsze jest ich parowanie. W stanie suchym intensywniej parują gleby piaszczyste niż gliniaste, a w stanie wilgotnym gleby ciężkie intensywniej niż gleby lekkie (45).

Parowanie z gleby nie porośniętej roślinnością jest mniejsze niż z wolnej powierzchni wody. Przeciętna wartość parowania z gleby nieporośniętej w okresie wczesnej wiosny wynosi od 0,5 do 1,0 mm/dobę, zaś w okresie letnim może przekraczać 5,0–6,0 mm/dobę (33, 96).

Transpiracja to proces oddawania wody przez rośliny do otaczającej je atmosfery pod wpływem energii promieniowania (33, 119). Według D z i e ż y c a (33) na wyparowanie 1 g wody roślina zużywa około 2500 J ciepła. Transpiracja odbywa się głównie przez szparki, zajmujące 1–5% powierzchni liści. Ilość wytranspirowanej wody zależy od gatunku i fazy rozwoju rośliny oraz układu czynników środowiska. W warunkach dobrego zaopatrzenia w wodę w okresie letnim łan roślin uprawnych może tracić dziennie 20–60 m^3 wody z 1 ha (2–6 mm). Prawie cała ilość zużywanej przez roślinę wody musi być dostępna dla niej w ciągu dnia, bowiem transpiracja w nocy jest 20–30 razy mniejsza.

Czynnikami zwiększającymi transpirację są duża liczba aparatów szparkowych, cienka kutykula, duża powierzchnia liści, silne natężenie światła, podwyższona temperatura, obniżone stężenie dwutlenku węgla, zwiększona zawartość wody w liściach, wzrost niedosytu wilgotności powietrza, łatwo dostępna woda w glebie, duża zawartość potasu w roślinie, wiatr. Intensywna transpiracja prowadzi do rozrzutnej gospodarki wodnej. Odpowiednia regulacja wymienionych czynników może znacznie zmniejszyć transpirację bez szkody dla plonu. Nadmierne jednak ograniczenie transpiracji prowadzi do zmniejszenia fotosyntezy, a w rezultacie do obniżki plonu (33, 144).

Ewapotranspiracja jest rozumiana jako parowanie z: powierzchni roślin dobrze zaopatrzonych w wodę (transpiracja potencjalna) i powierzchni gleby w pełni nasyconej wodą (ewaporacja potencjalna); powierzchni roślin słabiej zaopatrzonych w wodę (transpiracja aktualna) i powierzchni gleby nienasyconej wodą (ewaporacja aktualna). Przy optymalnym stanie uwilgotnienia gleby, transpiracja i ewaporacja traktowane są łącznie i określane mianem ewapotranspiracji potencjalnej. Rozróżnia się ewapotranspirację potencjalną i aktualną. B a r a n o w s k i i M a z u r e k (13) definiują ewapotranspirację potencjalną (ET_p) dla danego rodzaju uprawy jako sumaryczne parowanie z roślin i z gleby, przy nieograniczonym dostępie wody glebowej dla roślin. Ewapotranspiracja potencjalna jest to maksymalna intensywność ewapotranspiracji. W definicji tej przyjmuje się, że powierzchnia jest duża w związku z czym eliminowany jest wpływ lokalnej adwekcji na przebieg ewapotranspiracji (33). Definicja ta nie uwzględnia rodzaju roślinności i stadium rozwojowego roślin. Ewapotranspiracja aktualna (ET_a) to ilość wody odprowadzana do atmosfery wskutek parowania z gleby oraz z masy roślinnej w wyniku transpiracji w istniejących warunkach meteorologicznych i przy aktualnym stanie uwilgotnienia gleby. Zależy ona od czynników meteorologicznych, glebowych, biologicznych i agrotechnicznych (9). D z i e ż y c (33) uważa, że jeśli podaż wody jest mniejsza od zapotrzebowania roślin mamy do czynienia z ewapotranspiracją rzeczywistą. Badania P r z y b y ł y (115) nad wpływem uwilgotnienia

gleby na wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej, będącej podstawą sterowania deszczowaniem, wykazały, że dynamika uwilgotnienia gleby zależała od opadów, zastosowanego deszczowania, zużycia wody przez rośliny, budowy profilu glebowego oraz rzeźby terenu. R i c h i (116) zastosował model statystyczny do oszacowania wartości ewapotranspiracji rzeczywistej wykorzystując w tym celu dane meteorologiczne, fazy rozwojowe roślin i sposób użytkowania gleby.

Oprócz ewapotranspiracji aktualnej i potencjalnej D z i e ż y c (33) wyróżnia jeszcze ewapotranspirację maksymalną i stwierdza, że jest ona charakterystyczna dla danego gatunku czy odmiany rośliny w określonej fazie rozwojowej. Ma ona miejsce wówczas, gdy w danej fazie rozwojowej roślin ilość wody dostępnej dla roślin jest nieograniczona. Związek między poszczególnymi wartościami ewapotranspiracji: maksymalnej (ET_{max}), rzeczywistej (ET_r), potencjalnej (ET_p), optymalnej (ET_{opt}), minimalnej (ET_{min}) D z i e ż y c (33) przedstawił następująco: $ET_p > ET_{max} > ET_{opt} > ET_r > ET_{min}$.

Przesiąki glebowe (przesącza glebowe, odcieki grawitacyjne, odpływy wgłębne wody) stanowią istotną pozycję bilansu wodnego gleb, tworzą się one z wody opadowej (lub z nawodnień) przenikającej w głąb profilu glebowego do wód glebowo-gruntowych. Ilość przesiąku glebowego jest różna i zależy od opadów atmosferycznych i temperatury (123, 124, 126, 127, 147), składu granulometrycznego gleby (97, 127, 147, 152) i miąższości gleby (97, 123), pokrycia szatą roślinną lub ugorowanania gleb (127, 130), nawożenia mineralnego i organicznego (97, 147), nawadniania (123, 152). R u s z k o w s k a i in. (123) wykazali, w doświadczeniu lizymetrycznym, że ilość przesączającej się wody w glebie w 53% zależała od ilości i rozkładu opadów atmosferycznych, a nawożenie mineralne, nawadnianie i wapnowanie nie miało tu istotnego wpływu.

Istnieje wiele metod obliczania bilansu wodnego, lecz ze względu na dostępność i jakość danych wyjściowych posługujemy się głównie metodami empirycznymi i kombinowanymi (13). W Polsce najbardziej znana jest metoda deterministyczna B a c a (7, 8), a w innych krajach dość powszechnie stosowana w modelach jest metoda separowania parowania wody z powierzchni roślin i z gleby, wykorzystująca różne wersje równań wywodzących się z prac Penmana (13, 136, 160). Równania te stosowane są przy określaniu bilansu wodnego gleb w sytuacji, gdy niemożliwe jest określenie ilości przesiąku wody glebowej.

Do obliczania strat parowania w modelach deterministycznych wykorzystuje się ewaporacją rzeczywistą (aktualną) gleby i transpirację rzeczywistą (aktualną) łanu roślin, gdy aktualna jest niższa od potencjalnej. Ze względu na trudności z określeniem oddzielnie tych zjawisk, przyjmuje się najczęściej, że ewaporacja aktualna jest funkcją ewaporacji potencjalnej i liczby dni jakie minęły od ostatniego deszczu, w którym ewaporacja ta była równa potencjalnej (145). W literaturze podawana jest wartość opadu warunkującego ewaporację potencjalną zmieniająca się w granicach 3–21 mm w zależności od rodzaju gleby (14, 16). Przy oblicze-

niu transpiracji rzeczywistej (aktualnej) ważne jest ustalenie miąższości warstwy gleby z której rośliny efektywnie pobierają wodę. Ze względu na brak zgodności poglądów w tym zakresie (146, 160) przyjmuje się najczęściej wartość jednego metra, niezależnie od gatunku uprawianych roślin i rodzaju gleby.

W modelach deterministycznych obliczeń bilansu wodnego gleb, których podstawą jest matematyczny opis procesów zachodzących w danym przedziale czasowym w układzie: gleba – roślina – atmosfera, nie uwzględniano przesiąku wody (odpływu wgłębnego wody) poza strefę korzeniową roślin. Badania lizymetryczne (125, 127, 147) wykazały, że ilość przesączającej się wody w głąb profilu glebowego, w zależności od pory roku, przebiegu wegetacji, rodzaju gleby i sposobu jej użytkowania może wynosić nawet do 50% ilości wody opadowej.

2.4. CHARAKTERYSTYKA POTRZEB WODNYCH ROŚLIN UPRAWNYCH

Potrzeby wodne roślin zależą od ich cech genetycznych, rodzaju, gatunku i odmiany. W Polsce potrzeby wodne roślin od siewu do zbioru są często znacznie większe od opadów i dlatego opady atmosferyczne w głównej mierze decydują o poziomie plonów (63). Potrzeby wodne roślin zależą od długości okresu wegetacyjnego, fazy rozwojowej, nasłonecznienia, temperatury, opadów, wilgotności gleby i natężenia wiatru. Największe potrzeby wodne roślin występują równocześnie z fazami największej ich wrażliwości na nawadnianie i noszą nazwę ***okresów krytycznych gospodarki wodnej roślin***. Potrzeby wodne wynikają z: zaspokojenia wymagań wodnych związanych z procesami życiowymi roślin (głównie z transpiracją), pokrycia strat wody spowodowanych parowaniem roli i utrzymaniem w glebie optymalnego zapasu wody niezbędnego dla danej rośliny. Zapotrzebowanie roślin w wodę zwiększa się wraz z przyrostem zielonej masy (przeważnie do fazy kwitnienia), a potem szybko maleje. W fazie dojrzałości pełnej transpiracja przeważa nad pobieraniem wody z gleby. Największą wrażliwość na niedobory wody w glebie wykazują rośliny w okresie zawiązywania pąków kwiatowych i wytwarzania organów generatywnych. Niedostatek wody w tym czasie zwiększa ilość bezpłodnych kwiatów i źle wykształconych nasion, hamuje wzrost roślin, skraca okres dojrzewania i pogarsza wypełnianie nasion a w efekcie końcowym powoduje obniżanie plonu roślin (33, 35).

Największe potrzeby wodne roślin występują w pierwszych fazach rozwojowych, odpowiadających na ogół maksymalnemu przyrostowi masy. Niedobór wody, nawet niezbyt duży i przejściowy, w tych fazach rozwojowych – zwanych okresami krytycznymi, szczególnie niekorzystnie wpływa na plonowanie roślin. Okres krytyczny, związany z największym zapotrzebowaniem na wodę, przypada u roślin na czas największego przyrostu masy i nasilenia transpiracji, czyli pod koniec fazy wegetatywnej i na początku fazy generatywnej. Niedobór wody ogranicza wtedy nie tylko fotosyntezę, ale i pobieranie składników pokarmowych (33). Z badań D z i e ż y c a (33, 35) i N a g o w i e c k i e j (98) wynika, że najbardziej wrażliwe

na brak wody są: ziemniak – w okresie kwitnienia, zawiązywania, wykształcania i formowania bulw, jęczmień jary – w okresie od strzelania w źdźbło do kwitnienia, rzepak ozimy – w okresie od kwitnienia do początku wiązania łuszczyn, pszenica ozima – w okresie od strzelania w źdźbło do kwitnienia.

W pracy Ruszkowskiej i Terelakowej (129) za okresy krytyczne dla wzrostu roślin uważa się takie, w których niedobory wody wywołują największą redukcję plonu roślin. W przypadku zbóż okres ten dotyczy terminu między strzelaniem w źdźbło i osadzaniem ziarna, a roślin pastewnych i okopowych – fazy kwitnienia i początku formowania owoców (organów zapasowych – bulw, korzeni). Deficyt wody w okresie krytycznym powoduje m.in. wykształcenie pustych kłosów u zbóż i niezawiązywanie owoców u innych roślin. Dzieżyc (33) podaje, że deficyt wody we wcześniejszych fazach rozwojowych powoduje więdnięcie roślin lub ich usychanie, zaś w późniejszych ogranicza rozwój organów generatywnych. Według Kusia (85) największe różnice w zapasie wody spowodowane nawożeniem mineralnym występowały w okresie intensywnego przyrostu wegetatywnego pszenicy ozimej (maj i czerwiec). W okresie wegetacji każdej rośliny wyróżnia się fazy maksymalnego zapotrzebowania na wodę, które dla różnych gatunków i niektórych odmian roślin przypadają w różnych terminach kalendarzowych, w okresie letnim gdy temperatura dobowa przekracza 15°C. W warunkach tych ewapotranspiracja rzeczywista jest większa od potencjalnej i określa się ją mianem ewapotranspiracji maksymalnej (33, 35, 36, 41, 98). Analiza dobowych wartości polowego zużycia wody wykazała, że okresy krytyczne dla zbóż przypadały na fazy kłoszenia się i kwitnienia roślin. Najwyższe dobowe zużycie wody ziemniaka bardzo wczesnego odnotowano w fazie rozwoju owoców, a w przypadku odmian średnio późnych, w fazie kwitnienia oraz rozwoju owoców (60, 62, 132, 133). Z badań Roguskiego i Gabrycha (119) wynika, że zboża zużywają dużo wody w maju i czerwcu, natomiast Dzieżyc (34) podaje, że największe zapotrzebowanie na wodę ziemniaków wczesnych przypada na czerwiec, a ziemniaków późnych na czerwiec, lipiec i sierpień. Riley (118) stwierdził, że bardziej wrażliwe na niedobory wody są ziemniaki niż zboża.

Potrzeby wodne roślin uprawnych można zdaniem Dzieżyca (33) oceniać za pomocą opadów optymalnych, polowego zużycia wody, ewapotranspiracji łanu i wymaganego uwilgotnienia gleby. Wskaźnikiem optymalnego wykorzystania opadów przez rośliny w okresie wegetacyjnym jest ich suma w okresach krytycznych. Opady optymalne, w zestawieniu z rzeczywistymi, pozwalają ocenić z pewnym przybliżeniem niedobory, ewentualnie nadmiary opadów dla poszczególnych roślin uprawnych. Obecnie często do określania wielkości optymalnych opadów (w mm) dla poszczególnych roślin, przyjmuje się dane wyznaczone przez Klatta za Dzieżycem (33). Z badań Dzieżyca (33) wynika, że na glebach lekkich potrzeby wodne w okresie wegetacji dla pszenicy ozimej wynoszą 400 mm, dla pszenicy jarej 350 mm, dla ziemniaków wczesnych 250 mm a dla ziemniaków późnych 400 mm.

Niedobór wody hamuje procesy transpiracji i fotosyntezy, ogranicza wykorzystanie składników pokarmowych, powoduje słabe wschody i zły rozwój roślin oraz obniża plon i jego jakość. W warunkach długotrwałego niedoboru wody dla roślin następuje w pierwszej kolejności zmniejszenie tempa wzrostu elongacyjnego komórek, potem osłabienie syntezy elementów ścian komórkowych i syntezy białek, a następnie ustają podziały komórek i maleje poziom niektórych enzymów, np. reduktazy azotanowej. Deficyt wody powoduje zmniejszenie intensywności asymilacji dwutlenku węgla i procesów oddychania oraz przemieszczania asymilatów i jonów. W tkankach roślinnych mogą nagromadzać się wolne aminokwasy, zwłaszcza prolina. Pomaga to roślinie przeżyć stres wodny przez zmniejszenie wewnętrznego potencjału osmotycznego (129).

Według D z i e ż y c a (33) niedobór opadów w jesieni powoduje zmniejszenie plonów zbóż ozimych o 10–30%, natomiast ich nadmiar o 10%. Największy ze zbóż spadek plonów, na wszystkich glebach, przy niedoborze opadów w okresie od początku kwietnia do końca lipca wykazuje pszenica jara. Średni spadek plonów jęczmienia jarego i ozimego przy niskich opadach dochodzi do 22%. Przy opadach mniejszych od 150 mm przeciętny spadek plonu ziemniaków wczesnych wynosi na glebach lekkich około 25%, na średnich 45% i na ciężkich 35% w stosunku do plonu uzyskanego przy opadach optymalnych. Przy opadach poniżej 200 mm spadek plonu ziemniaków średnio wczesnych wynosił odpowiednio 25, 22 i 29%, ziemniaków średnio późnych 28, 36 i 18% oraz późnych 29, 22 i 18%. R u s z k o w s k a i T e r e l a k (129) podają, że zahamowanie wzrostu roślin w warunkach stresu wodnego spowodowane jest nie tylko bezwzględnym brakiem wody w glebie, lecz także ograniczeniem dyfuzji jonów. W badaniach nad wpływem okresowej suszy glebowej na jęczmień jary K a m i ń s k a i M a z g a l s k a (70) wykazały, że roślina ta w porównaniu do innych zbóż, jest szczególnie plastyczna w zakresie adaptacji do warunków stresu wodnego. Związane jest to z wytwarzaniem przez jęczmień jary zmiennej liczby kłosów przypadających na roślinę, jednostkę powierzchni lub różnej masy ziarniaków w kłosie. Zdaniem D z i e ż y c a (36) i P a n e k (104) susza w fazie generatywnej jęczmienia jarego przyczynia się do redukcji liczby pędów w roślinie, liczby ziarn w kłosie i ich masy. S a l a m i in. (131) stwierdzili, że większy wpływ na redukcję plonu jęczmienia przy deficycie wodnym, ma termin jego występowania, niż długość trwania.

Nadmiar wody powoduje wypłukiwanie składników mineralnych w głąb gleby i zwiększa jej zakwaszenie, usuwa powietrze z przestworów glebowych, ogranicza rozwój systemu korzeniowego i hamuje wzrost roślin, opóźnienia proces dojrzewania roślin, sprzyja rozwojowi chwastów wodolubnych, szkodników i chorób oraz jest przyczyną wymakania, wylegania i gnicia roślin (144). S z y m a ń s k i i K o s t r z e w a (148) podają, że z nadmiarem wody mamy do czynienia gdy jej zawartość w glebie przekracza 85–90% polowej pojemności wodnej. W glebie musi bowiem znajdować się pewien zapas powietrza potrzebny do życia roślin i mikroorganizmów oraz do prawidłowego przebiegu rozkładu i syntezy masy orga-

nicznej. Zapas ten dla jęczmienia powinien wynosić przynajmniej 15–20%. Gleba zbyt wilgotna jest zimna, nie może do niej wnikać ani ciepłe powietrze, ani ciepłe wody opadowe. Powoduje to opóźnienie prac wiosennych i skrócenie okresu wegetacji roślin. Gleby wilgotne nagrzewają się wolno, lecz szybciej przewodzą ciepło, natomiast gleby suche szybko się nagrzewają i wolno przewodzą ciepło.

W glebach zbyt wilgotnych rośliny korzenią się zbyt płytko. Obniżenie zwierciadła wody gruntowej w okresach suszy zmusza rośliny do szukania wody. Powoduje to rozrastanie się korzeni roślin i hamowanie rozwoju części nadziemnych. Na glebach nadmiernie uwilgotnionych skuteczność nawożenia jest niska, a plony zależą od czynników klimatycznych. Objawem nadmiaru wody w glebie jest niedobór powietrza, a ściślej niedobór tlenu. Dla normalnego rozwoju roślin uprawnych powietrze powinno zajmować w glebie nie mniej niż 10% jej objętości. W przypadku roślin łąkowych powietrze glebowe w strefie korzeniowej (0–30 cm) powinno stanowić 6–8% objętości gleby (101).

Nadmiar wody w glebie ogranicza dostępność tlenu dla korzeni roślin, co powoduje występowanie stresu tlenowego. Warunki glebowe mogą powodować u roślin zarówno stres tlenowy, jak i wodny. ***Stres tlenowy*** związany jest z niedostatkiem tlenu w strefie korzeniowej roślin i może być złagodzony przez odprowadzenie nadmiaru wody z gleby. ***Stres wodny*** związany jest natomiast z niedoborem wody w strefie korzeniowej roślin i może być złagodzony nawadnianiem gleby. Niedostatek tlenu w glebie hamuje procesy życiowe roślin uprawnych w wyniku upośledzenia oddychania tlenowego, co prowadzi do zmian w metabolizmie, a także gromadzenia się substancji toksycznych w roślinie. Niedostateczne natlenienie powoduje zakłócenia i zmiany w aktywności procesów mikrobiologicznych w środowisku glebowym, powstanie w nim gazów i produktów toksycznych dla roślin (43). Niedostatek tlenu w glebie wpływa na zmianę jej odczynu, stopnia utlenienia pierwiastków, barwy gleby, pobierania składników pokarmowych przez rośliny i na ich skład ilościowy i jakościowy (155). Dlatego w warunkach ograniczonej ilości tlenu rośliny żółkną, więdną, zahamowany jest ich wzrost i rozwój; może dochodzić do obumierania tkanek i całych roślin (52, 144). Przekroczenie optymalnej sumy opadów powoduje również spadek plonów ziemniaków. Spadek ten w zależności od zwięzłości gleby wynosi: dla ziemniaków wczesnych 0–21%, średnio wczesnych 17–25%, średnio późnych 7–11% i późnych 10–16% plonu uzyskanego przy opadach optymalnych. Nadmiar opadów na glebach zwięzłych jest bardziej szkodliwy niż na lekkich (33). Badania przeprowadzone przez P a s e l a i Z a w o r a (106) na madzie ciężkiej wykazały, że zarówno nadmierne, jak i niedostateczne uwilgotnienie gleby podczas wegetacji przyczynia się do spadków plonów jęczmienia. Nadmiar wody w glebie w krytycznym okresie rozwojowym roślin powodował jednak większy spadek plonów niż jej niedobór.

Uwilgotnienie gleby nie powinno być zbyt małe, gdyż nie zaspakaja wówczas potrzeb wodnych roślin, ani zbyt duże gdyż pogarsza przewietrzanie gleby, a ponadto może wpłynąć niekorzystnie, a nawet szkodliwie na przebieg procesów chemicznych i mikrobiologicznych w glebie (19).

2.5. ZUŻYCIE WODY PRZEZ ROŚLINY

W dotychczasowej literaturze polowe zużycie wody określane jest najczęściej dla całego okresu wegetacyjnego roślin (6, 7, 26, 34, 36, 37, 42, 152), okresów kalendarzowych: np. dekada, miesiąc (14, 16), okresów fenologicznych (9), jak również dla okresów faz rozwojowych roślin (60, 63, 64). Rośliny uprawne powinny we wszystkich fazach rozwojowych mieć odpowiedni bilans wodny, czyli stosunek między ilością wody pobranej z otoczenia a ilością wody wydalonej (33).

Zużycie wody przez rośliny determinują następujące warunki: meteorologiczne – opad (ilość, intensywność i rozkład), temperatura (34-37, 44, 46, 48, 57, 98, 137, 157); warunki przyrodniczo-środowiskowe – rodzaj gleby, skład mechaniczny (34-37, 39, 48, 49, 95, 119, 132, 134, 137, 157), głębokość występowania lustra wody gruntowej (51, 108, 149); zabiegi agrotechniczne – nawadnianie (37, 57, 80, 107, 113, 132, 139, 161), nawożenie i nawadnianie (33, 37, 78-80, 99, 132), nawożenie mineralne (17, 26, 34, 37, 44, 46, 61, 68, 80, 85, 100, 105, 109, 134, 137, 141, 151, 152), nawożenie organiczne (2, 86, 105, 122), uprawa roli (62, 87, 122,); roślina – gatunek i odmiana (34-37, 132, 134, 137), intercepcja roślin (75, 91, 133), faza rozwojowa roślin (33, 60, 62, 133), zasięg systemu korzeniowego roślin (10, 33, 34, 87, 88, 93, 117, 118, 121, 122, 134).

Grabarczyk i in. (57) podają, że polowe zużycie wody w okresie od siewu roślin do zacienienia gleby zależy głównie od **sumy opadów (i nawodnień)**. W badaniach tych polowe zużycie wody było wysoko skorelowane z ewapotranspiracją potencjalną jedynie w okresie intensywnego wzrostu roślin, z wyjątkiem zbóż. Fotyma (44) badała efektywność nawożenia zbóż jarych i ozimych (pszenica, jęczmień, owies) w warunkach suszy. W przypadku zbóż jarych, najwyższej plonował jęczmień a najniżej owies. W warunkach suchych najwcześniej dojrzewający jęczmień wykorzystywał zasoby wody glebowej i wydawał najwyższe plony. W warunkach wilgotnych plonowanie jęczmienia ograniczane było występowaniem chorób. Większe plony zbóż przy mniejszej efektywności nawożenia uzyskiwano w warunkach wilgotnych.

Marcilonek (95) i Trybała (57) wykazali, że polowe zużycie wody zależało od **składu granulometrycznego** i na glebach luźnych było przeważnie mniejsze niż na glebach zwięzłych. Z badań Dzieżyca (34), Sarnackiej (134) i Trybały (157) przeprowadzonych na glebach piaszczystych wynika, że polowe zużycie wody przez zboża na glebie nienawadnianej, w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji do zbioru roślin wyniosło 280 do 320 mm, a przez rośliny okopowe i pastewne wahało się w granicach od 350 do 400 mm. W badaniach Rogu skiego i Gabrycha (119) przeprowadzonych na glebach wytworzonych z piasków gliniastych mocnych, polowe zużycie wody przez pszenicę ozimą kształtowało się na poziomie 330–450 mm, a na glebie wytworzonej z piasków gliniastych, w okresie od maja do lipca wyniosło 240–330 mm według badań Fotymy i in. (49) i było wyższe od zużycia wody przez jęczmień jary (48). Dzieżyc i in.

(39) podają, że największe zużycie wody przypada w miesiącach największego przyrostu biomasy jęczmienia.

Poziom wody gruntowej jest istotnym czynnikiem decydującym o polowym zużyciu wody, ale trudnym do jednoznacznego sprecyzowania (51, 108). G i a n q u i n t o i in. (51) w doświadczeniu lizymetrycznym badali wpływ głębokości występowania poziomu lustra wody gruntowej (0,45, 0,85 i 1,20 m p.p.t.) oraz wahań wody gruntowej (0,40–1,30 m) na wielkość fotosyntezy, plon ziemniaków i jakość bulw oraz wydajność zużycia wody. Kontrolę stanowiły obiekty z nawadnianiem metodą kropelkową. Stwierdzono spadek plonu ziemniaków związany z zmniejszeniem się liczby bulw w wariancie o poziomie wody gruntowej 0,45 m i w wariancie o zmiennym poziomie lustra wody w zakresie 0,40–1,30 m, redukcję masy bulw w wariancie z poziomem lustra wody na głębokości 0,85 m oraz obydwu tych parametrów w wariancie przy poziomie wody 1,20 m.

D z i e ż y c (33) uważa, że zużycie wody przez rośliny zależy zarówno od **rozwoju i zasięgu systemu korzeniowego**, jak też od warunków wodnych i cieplnych w glebie oraz stężenia soli mineralnych w roztworze glebowym i niedosytu powietrza. K u ź n i a r (88) oraz S p y c h a l s k i i in. (143) podkreślają również związek rozwoju systemu korzeniowego z pobieraniem wody z poszczególnych warstw profilu glebowego. W wielu publikacjach autorzy wykazują, że zasadnicza część masy korzeniowej zbóż i ziemniaków zawarta jest w warstwie ornej gleby i stosunkowo rzadko sięga poniżej 60 cm (93, 118). W świetle tych danych zrozumiałe są wyniki badań D z i e ż y c a (34) który wykazał, że polowe zużycie wody z warstwy 0–100 cm jest tylko o 10% większe od zużycia wody z głębokości gleby 0–60 cm. K u ź n i a r (87) w pracach dotyczących wpływu uwilgotnienia gleby piaszczystej na wzrost i plonowanie pszenicy ozimej i jarej, żyta jarego, gryki, prosa i koniczyny czerwonej stwierdził bardzo wyraźną współzależność między zawartością wilgoci w glebie w warstwie 0–5 cm a plonowaniem wymienionych roślin. Późniejsze wyniki badań K u ź n i a r a (88) przeprowadzone na glebach piaszczystych i gliniastych wykazują, że warstwa gleby zaopatrująca rośliny w wodę ogranicza się do 50 cm, w której mieściło się około 90% masy korzeniowej roślin. Z poziomów głębszych gleby woda pobierana jest tylko w nieznacznej ilości, głównie w okresach suszy glebowej. D z i e ż y c (33) wykazał natomiast, że 80–90% masy korzeniowej większości roślin mieści się w 30 cm ornej warstwie gleby, niewielka ilość sięga do około 50 cm, a jeszcze mniejsza do 100 cm. O wysokości plonu decyduje głównie wilgotność gleby w warstwie od 0 do 30 cm. Zdaniem R u s s e l l a (122) słabe uwilgotnienie warstwy ornej gleby w początkowym okresie wzrostu i rozwoju roślin zapewnia szybki wzrost wgłębny korzeni i zwiększa odporność roślin na suszę. Początkowy rozwój roślin w warunkach wysokiego uwilgotnienia warstwy ornej gleby zmniejsza ich tolerancję na suszę. Przy prawidłowym uwilgotnieniu gleby około 80% suchej masy korzeni znajduje się w górnej, 15 cm warstwie profilu glebowego (121). Maksymalny zasięg korzeni określa się na 120–140 cm, przy czym efektywne pobieranie wody dotyczy najczęściej war-

stwy do 100 cm głębokości, a w przypadku gleb lekkich warstwy nieco głębszej (122). Strefę korzeniową zaopatrującą w wodę system korzeniowy roślin (w której znajduje się 80% korzeni) R i j t e m a (117) nazwał efektywną strefą korzeniową. Efektywna strefa korzeniowa, w zależności od typu systemu korzeniowego roślin, wynosi (w cm): 25 dla płytkiego (trawy), 40 dla średnio płytkiego (ziemniak), 60 dla średnio głębokiego (zboża) i 80 dla głębokiego (lucerna).

Nawożenie mineralne i organiczne a szczególnie nawożenie azotem silnie różnicuje polowe zużycie wody w glebie. Dane literaturowe (34, 69, 100, 109, 134, 137) wykazują, że wzrost dawek azotu nie wpływa istotnie na polowe zużycie wody, liczone od początku do końca wegetacji roślin. I g r a s (61) w dwuletnich badaniach nad polowym zużyciem wody przez: rzepak ozimy, pszenicę ozimą i jarą, pszenżyto ozime, burak cukrowy, kukurydzę, ziemniak bardzo wczesny i średnio późny stwierdził, że w okresie wegetacji nie zależało ono od wysokości stosowanych dawek nawozu, a produkcyjne zużycie wody malało wraz ze wzrostem plonu roślin. Również S h a r m a (141) wykazał, że zużycie wody przez rzepak ozimy z poszczególnych warstw profilu gleb wytworzonych z piasków gliniastych nie zależało od poziomu nawożenia azotem. D z i e ż y c (37) porównując polowe zużycie wody przez zboża ozime i jare oraz rośliny okopowe nawożone różnymi dawkami azotu stwierdził również, że nie różnicowały one polowego zużycia wody w poszczególnych fazach rozwojowych roślin. Natomiast B u n i a k i in. (17) oraz K a r c z m a r c z y k i in. (72, 73) wykazali wzrost polowego zużycia wody przez rośliny zbożowe i okopowe uprawiane na glebach lekkich pod wpływem nawożenia azotowego. Ś l u s a r c z y k (151) zwraca uwagę na różnicowanie się aktualnego zapasu wody glebowej pod pszenicą ozimą i rzepakiem ozimym na skutek różnic plonu roślin spowodowanych nawożeniem mineralnym. Zdaniem autora zależność pomiędzy polowym zużyciem wody i nawożeniem azotowym ujawnia się w fazach intensywnego nagromadzania biomasy. Brak istotnych różnic w polowym zużyciu wody pod wpływem dawek azotu w początkowych i końcowych fazach wzrostu roślin wynika z faktu, że przyrost biomasy jest niewielki, a o polowym zużyciu wody decyduje parowanie glebowe, które przeważa nad transpiracją.

Różnicowanie polowego zużycia wody pod wpływem **nawożenia mineralnego i nawadniania** przez rośliny uprawne (m.in. ziemniaki, jęczmień, pszenica ozima i rzepak) było przedmiotem nielicznych badań (69, 78-80, 99, 161, 162). W badaniach tych określono gospodarkę wodną i chemiczne właściwości gleby oraz plon i skład chemiczny roślin.

W licznych opracowaniach (10, 26, 80, 132) zarówno krajowych, jak i zagranicznych, przedstawiono interesujące opracowania dotyczące zużycia wody i plonowania roślin pod wpływem współdziałania nawadniania i nawożenia głównie azotowego. K o s z a ń s k i i in. (80) w doświadczeniach na glebie kompleksu żytniego dobrego nawozili ziemniaki azotem w ilości: 0, 75, 100, 125 i 150 kg/ha oraz stosowali nawadnianie co 10 dni. Badania wykazały, że nawadnianie i wzra-

stające nawożenie azotem zwiększyło masę plonu i polowe zużycie wody, ale sumaryczna ilość wody potrzebna do wyprodukowania jednostki suchej masy plonu spadała przy wyższych dawkach azotu. P a t o i n e i F o r t i n (107) używając modelu do nawodnień kalibrowali wilgotność gleb przy uprawie ziemniaków, uzyskali oni wysoką wrażliwość modelu na zmiany zawartości wody dla polowej pojemności gleb. C z y ż (26) w doświadczeniu lizymetrycznym badając zużycie wody przez rośliny uprawne na glebie piaskowej przy zastosowaniu obornika pod ziemniaki (30 t/ha) i 3 poziomów nawożenia mineralnego, uzyskała maksymalny plon roślin przy najwyższym poziomie nawożenia mineralnego i zużyciu wody (w dm^3/kg plonu): 40,3 dla ziemniaków, 486,5 dla ziarna jęczmienia, 554 dla nasion rzepaku, 305,8 dla pszenicy.

Nawadnianie, zwiększając ewapotranspirację roślin, wpływa istotnie na dynamikę polowego zużycia wody, zależne jest od fazy rozwojowej roślin. W e s s o l e k i R e n g e r (161) badając wpływ nawodnień na zużycie wody przez jęczmień i buraki cukrowe na glebie piaskowej wykazali, że uwilgotnienie gleby w strefie korzeniowej i suma nawodnień wpływała na wielkość ewapotranspiracji i plon roślin. Jeśli nawadnianie rozpoczęto od 50% PPW, ewapotranspiracja była o około 50 mm większa niż przy nawadnianiu rozpoczętym przy 30% PPW. Autorzy uważają, że rośliny o dużym zapotrzebowaniu na wodę, należy nawadniać regularnie mniejszymi dawkami. Przy optymalnym nawadnianiu suma przesiąku wody jest mniejsza od 12% całkowitej ilości nawodnień. D z i e ż y c (37) stwierdził, że układ krzywych polowego zużycia wody w okresie wegetacji roślin nie zależy od dynamiki przyrostu masy. Przyrost plonu następuje w wyniku nawadniania. W badaniach przeprowadzonych przez P r a d a s a i in. (97) kukurydza i ziemniak były nawadniane (IW) w takiej ilości, aby stosunek IW do sumy ewapotranspiracji (CPE) wynosił 1,4; 1,2; 1,0; 0,8; 0,6. Badania wykazały, że plon kukurydzy w czystym siewie był najwyższy (5,38 t/ha) przy stosunku IW:CPE równym 1,0, podczas gdy plon ziemniaków wzrastał przy stosunku IW:CPE równym 1,2 i wyniósł 11,25 t/ha. Również B a c (8) i Ż y r o m s k i (165) w badaniach dotyczących zasobów wodnych gleb przedstawili korzystny wpływ bilansu wodnego gleb przy uprawie ziemniaków, jęczmienia jarego i pszenicy jarej w warunkach nawadniania. W doświadczeniu z jęczmieniem jarym, żytem ozimym i pszenicą ozimą, S a m b o r s k i i K o ł o d z i e j (133) stwierdzili, że jęczmień jary i pszenica ozima, zużywają najwięcej wody w okresie od ruszenia wegetacji do strzelania w źdźbło i od strzelania w źdźbło do kłoszenia. Wartość polowego zużycia wody w znacznym stopniu zmniejszała się w zależności od wartości intercepcji i spływu wody po roślinach. Maksymalne wartości higrometrycznego i termicznego współczynnika polowego zużycia wody u jęczmienia jarego występowały w okresie od strzelania w źdźbło do kłoszenia. Wymienieni autorzy (132) wykazali, że polowe zużycie wody przez ziemniak z poszczególnych warstw gleby zależało od fazy rozwojowej roślin i było największe z warstwy 60–110 cm.

Allison (2), Panek i in. (105) oraz Russell (122) wykazali pozytywny wpływ **nawożenia obornikiem** na stosunki wodne gleby lekkiej. Badania Kuziemskiej i Kalembasy (86) nie wykazały natomiast korzystnego wpływu obornika i nawożenia mineralnego na zmianę stosunków wodnych badanych gleb. Russell (122) uważa, że stosowanie obornika jest jedną z dobrych metod poprawy stosunków wodnych gleb lekkich, zabieg ten zmniejsza dużą przepuszczalność tych gleb, zwiększa ich zdolność utrzymywania wody. Panek i in. (105) w doświadczeniu na glebie płowej wytworzonej z gliny lekkiej badali dynamikę uwilgotnienia w warunkach zróżnicowanych dawek NPK i nawożenia obornikiem. Badania te wykazały, że stosowanie obornika spowodowało zwiększenie wilgotności gleby, szczególnie wiosną. Kuziemska i Kalembasa (86) badali zmiany zużycia wody przez kukurydzę, jęczmień jary, koniczynę czerwoną i pszenicę ozimą pod wpływem wapnowania, dawek i rodzajów osadów ściekowych oraz nawożenia NPK i obornikiem na plon. Stwierdzili, że nawożenie mineralne nie różnicowało istotnie plonu sumarycznego, natomiast w przypadku kukurydzy istotnie zwiększyło, a koniczyny istotnie zmniejszyło plon. Osady wpływały na plon roślin podobnie jak obornik, przy czym zwiększenie ich dawki do 60 t/ha istotnie obniżyło sumaryczny plon roślin.

3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

3.1. OPIS DOŚWIADCZENIA

Badania przeprowadzono w latach 1978–1994 w 70 betonowych lizymetrach, o wymiarach: 1 x 1 x 1,5 m, należących do stacji lizymetrycznej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach. Położenie stacji lizymetrycznej określone przez GPS wyniosło: 51° 24′ 51″N i 21° 57′ 33″E oraz wysokość 203 m n.p.m. Doświadczenie założono w roku 1977 metodą serii niezależnych w układzie kompletnie zrandomizowanym z dwiema replikacjami.

3.2. SCHEMAT DOŚWIADCZENIA

Doświadczenie lizymetryczne obejmowało 3 czynniki:
I czynnik – gleba {S}: piaskowa {S_1}, lessowa {S_2} i gliniasta {S_3}
II czynnik – poziom nawożenia NPK {F}: niski {F_1}, średni {F_2} i wysoki {F_3}
III czynnik
– ***w latach badań 1978–1990***
nawadnianie interwencyjne {I}: połowę lizymetrów z nawożeniem NPK podlewano wodą zdemineralizowaną w dawce jednorazowej 10 mm (gdy wilgotność gleby spadała <0,5 PPW dla warstwy 0–55 cm {I_1}, druga połowa lizymetrów nie była nawadniania {I_0}.

– ***w latach badań 1991–1994***

nawożenie obornikiem {M} zastosowano w pierwszym roku zmianowania:

połowę lizymetrów nawożonych NPK użyźniono obornikiem w ilości 30 $t.ha^{-1}$ $\{M_1\}$, natomiast na drugiej połowie lizymetrów nie stosowano nawożenia organicznego $\{M_0\}$.

Obiekt kontrolny {0} – gleba ugorowana (tzw. czarny ugór), bez roślin, nienawożona i nienawadniana stanowiła kontrolę dla wszystkich obiektów z uprawianymi roślinami.

3.2.1. Warianty glebowe

Lizymetry, według przyjętego schematu doświadczenia, napełniono trzema glebami {S} z zachowaniem naturalnych poziomów genetycznych:

- brunatną, wytworzoną z piasku (piaskową) o składzie granulometrycznym piasku gliniastego lekkiego $\{S_1\}$,
- brunatną, wytworzoną z lessu (lessową) o składzie granulometrycznym utworu ilastego (w poziomie C – utworu pyłowego) $\{S_2\}$,
- płową, wytworzoną z gliny (gliniastą) o składzie granulometrycznym gliny lekkiej na glinie ciężkiej $\{S_3\}$.

Dla uproszczenia w dalszej części pracy używane będą nazwy rodzajowe gleb w skróconej formie jako: gleba piaskowa (piasek), gleba lessowa (less) i gleba gliniasta (glina).

Niektóre właściwości gleb użytych do badań przedstawiono w tabelach 1 i 2, a bardziej szczegółowa charakterystyka znajduje się w pracach Pondla i Sadurskiego (111) oraz Ruszkowskiej i in. (124-126).

Tabela 1

Skład granulometryczny gleb użytych w doświadczeniu wg Pondla i Sadurskiego (111)
Particle size distributions of the experimental soils acc. to Pondel and Sadurski (111)

Gleba Soil {S}	Poziom genetyczny Genetic horizon	Głębokość Depth (cm)	% frakcji o średnicy (mm) % of fraction with diameter (mm)			
			1,0–0,1	0,1–0,02	<0,02	<0,002
Piaskowa*	A_1	0–30	59	29	12	4
Sandy	(B)	31–70	57	31	12	3
{S1}	C	71–130	60	29	11	3
Lessowa**	A_1	0–30	11	51	38	8
Loess	(B)	31–90	13	51	36	12
{S2}	C	91–130	14	54	32	11
Gliniasta***	A_1	0–30	45	25	30	12
Loamy	A_3	31–55	35	21	44	25
{S3}	B_1C	56–130	20	20	60	37

* gleba brunatna wytworzona z piasku gliniastego; brown soil derived from medium sand
** gleba brunatna wytworzona z lessu; brown soil derived from loess
*** gleba płowa wytworzona z gliny; gray brown soil derived from loam

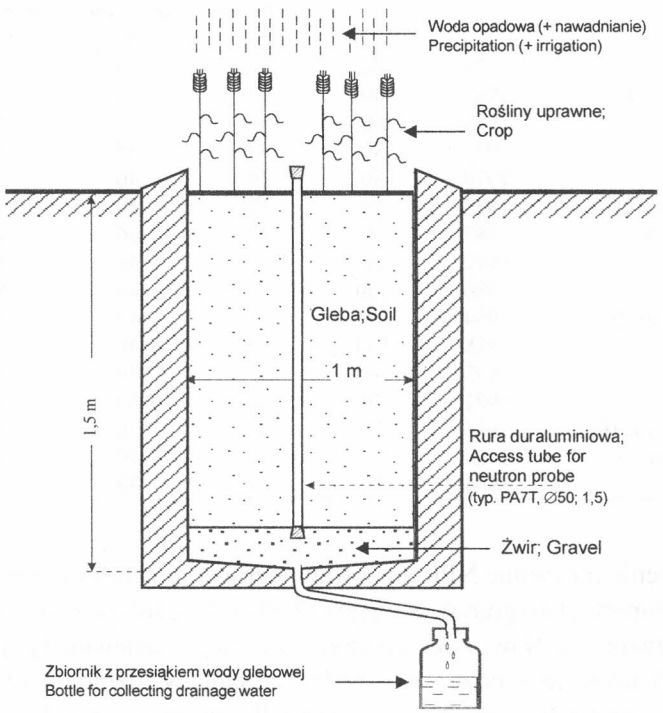
Tabela 2

Charakterystyka gleb użytych do doświadczenia lizymetrycznego wg Pondla i Sadurskiego (111), Ruszkowskiej i in. (126)
Characteristics of the soils used in the lysimeter experiments acc. to Pondel and Sadurski (111), Ruszkowska et al. (126)

Gleba Soil {S}*	Głębokość Depth (cm)	Gęstość Density ($Mg.m^{-3}$)	Porowatość ogólna Porosity (%)	Mikropory <0,02 µm Micropores (%)	Mezopory 0,2–30 µm Mesopores (%)	pH		Próchnica Humus (%)	Formy przyswajalne Available forms (mg/100 g)		
						H_2O	1 n KCl		P	K	Mg
Piaskowa	0–30	1,36	48,7	2,5	23,5	5,9	4,9	1,82	7,2	9,3	1,4
Sandy	31–70	1,80	30,9	2,0	22,5	5,4	4,5	0,49	1,7	5,8	0,7
{S_1}	71–130	1,86	34,3	2,2	22,9	5,6	4,6		1,3	4,6	0,6
Lessowa	0–30	1,46	44,9	4,5	31,5	6,6	5,8	1,52	4,1	3,6	4,9
Loess	31–90	1,57	40,8	12,0	23,0	6,1	4,8	0,42	4,0	3,0	10,0
{S_2}	91–130	1,56	41,4	7,0	24,5	5,8	4,5		2,8	3,3	12,7
Gliniasta	0–30	1,66	37,4	7,0	20,5	6,4	5,4	1,55	2,3	9,6	7,7
Loamy	31–55	1,69	36,2	15,0	16,0	6,5	5,2	0,56	0,1	4,1	21,3
{S_3}	56–130	1,52	42,6	18,0	19,5	5,9	4,4		0,2	7,1	44,0

* objaśnienia jak w tabeli 1; for explanations see tab. 1

Na dno każdego lizymetru (zaopatrzonego w otwór odpływowy do uzyskania przesiąków glebowych) wsypano 20 cm warstwę żwiru. W każdym lizymetrze umieszczono centralnie rury duraluminiowe o średnicy zewnętrznej 50 mm i grubości 1,5 mm, służące do pomiaru wilgotności sondą neutronową. Rury te zaślepiono od dołu korkami gumowymi, uszczelniając je żywicą epoksydową, a od góry zatkano korkami szklanymi uniemożliwiającymi przedostawanie się wody opadowej do ich wnętrza (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój pionowy przez lizymetr
Cross section of a lysimeter

3.2.2. Warianty nawożenia mineralnego

W doświadczeniu zastosowano trzy poziomy nawożenia mineralnego NPK {F}, wagowo wzrastające w stosunku 1:2:3 (niski $\{F_1\}$, średni $\{F_2\}$ i wysoki $\{F_3\}$). Przy najniższym poziomie nawożenia NPK I $\{F_1\}$ dawki nawozów wynosiły w przeliczeniu na 1 ha: 50–100 kg N, 30–50 kg P_2O_5, 50–80 kg K_2O i około 18 kg Mg. W obiektach NPK II $\{F_2\}$ wymienione dawki nawozów podwojono, w obiektach NPK III $\{F_3\}$ – potrojono.

Tabela 3

Nawożenie mineralne przy poziomie NPK I $\{F_1\}$ ($kg.ha^{-1}$)
Mineral fertilization for the first level $\{F_1\}$ of NPK I ($kg.ha^{-1}$)

Zmianowanie roślin uprawnych Crop rotation {C}	Lata Year	Dawki NPK I First level of NPK I $\{F_1\}$				
		N	P_2O_5			K_2O
			gleba piaskowa sandy soil $\{S_1\}$	gleba lessowa loess soil $\{S_2\}$	gleba gliniasta loamy soil $\{S_3\}$	
	1978	80	0	35	50	80
Ziemniak $\{C_1\}$	1982	80	30	35	35	80
Potato	1986	80	30	35	50	80
	1991	80	30	35	50	80
	1979	50	40	40	40	60
Jęczmień jary $\{C_2\}$	1983	50	40	40	40	60
Spring barley	1987	50	40	40	40	60
	1992	50	40	40	40	60
	1980	100	0	40	50	80
Rzepak ozimy $\{C_3\}$	1984	100	40	40	50	80
Winter rape	1988	100	40	40	50	80
	1993	100	40	40	50	80
	1981	70	0	30	40	50
Pszenica ozima (C_4)	1985	70	30	30	40	50
Winter wheat	1989	70	30	30	40	50
	1994	70	30	30	40	50

Nawożenie mineralne NPK stosowano corocznie w formie: saletry amonowej (34% N), superfosfatu granulowanego (17,7% P_2O_5), soli potasowej (51,6% K_2O), siarczanu magnezu. Nawozy azotowe stosowano przedsiewnie i pogłównie w rozdzielonych dawkach (zboża – w okresie strzelania w źdźbło i przed kłoszeniem), natomiast nawozy fosforowe i potasowe tylko przedsiewnie. Dawkę nawożenia mineralnego ustalono w zależności od uprawianej rośliny, a także zasobności gleby w dany składnik (tab. 3). Gleby piaskowej przy poziomie NPK I nie nawożono fosforem ze względu na dużą jej zasobność w ten pierwiastek, przy poziomie NPK II zastosowano 35 kg P_2O_5, a przy poziomie NPK III – 50 kg P_2O_5 na hektar.

Warstwę powierzchniową gleby zwapnowano przed obsiewem w roku 1977, według 0,75 Hh stosując czysty $CaCO_3$. Zabieg ten według 0,5 Hh, wykonano co 4 lata oraz wiosną w 1992 wg 0,75 Hh (125, 126).

3.2.3. Warianty nawadniania i nawożenia obornikiem

W latach badań 1978–1989 połowę lizymetrów nawadniano $\{I_1\}$, w każdym obiekcie nawożenia NPK, w okresie intensywnego wzrostu roślin (od kwietnia do sierpnia), natomiast drugą połowę lizymetrów pozostawiano bez nawadniano $\{I_o\}$. Lizymetry nawadniane podlewano wodą zdemineralizowaną, w dawce jednorazo-

Tabela 4

Terminy nawodnień badanych roślin (dawka 10 mm/lizymetr)
Dates of application of irrigation water (each application was 10 mm of water per lysimeter)

Roślina Plant {C}	Rok Year	Daty; Dates				
		Kwiecień; April	Maj; May	Czerwiec; June	Lipiec; July	Sierpień; August
C_1	1978		23, 31	2, 5, 9, 12, 14, 17, 20	5, 13, 15, 17, 19, 21, 24, 26, 28, 31	2, 4
C_2	1979		22, 24, 25, 28, 30	1, 4, 6, 9, 11, 13, 15, 19, 21, 23, 29	3	
C_3	1980		13, 17, 20, 23, 26, 28, 30, 31	9, 11, 13, 14, 27		
C_4	1981		14, 16, 18, 22, 26, 28	3, 6, 11, 15	3, 7	
C_1	1982			1, 3, 5, 9, 11, 18	3, 6, 9, 19, 20, 23, 30	2, 6, 9, 11, 13, 17, 20
C_2	1983		17, 19, 23, 27, 30	1, 4, 8, 10, 13, 15, 17, 20, 22, 24, 27, 30		
C_3	1984	16, 25	1, 21, 23, 27, 28	2		
C_4	1985		16, 20, 22, 24, 27, 29, 31	21, 23	4, 17	
C_1	1986				2, 3, 4, 5, 7, 15, 18, 23	2, 4, 6, 11
C_2	1987		4, 14, 23, 26, 28	1, 4, 12, 15, 19, 22, 26, 29	1, 3, 5, 8	
C_3	1988		2, 5, 6, 9, 12, 13, 14, 16, 28	6, 8, 19, 21		
C_4	1989		15, 17, 19, 23, 24, 26, 29	2, 9, 19, 21, 23, 26, 28, 30		
C_1	1991			3	10, 11, 12, 24	9
C_2	1992		21	5, 8, 10, 12, 16, 19, 23, 26, 29, 30	1, 3	
C_3	1993		4, 7, 10, 12, 14, 17, 19, 21	2, 7, 9	2	
C_4	1994			24, 28, 30	1	

{C_1} – ziemniak; potato {C_2} – jęczmień jary; spring barley {C_3} – rzepak ozimy; winter rape {C_4} – pszenica ozima; winter wheat

wej 10 $dm^3.m^{-2}$, gdy wilgotność gleby spadała poniżej 50% PPW w warstwie 0–55 cm. W tabeli 4 podano terminy nawodnień, natomiast w tabeli 5 ilość wody zdemineralizowanej zużytej do nawadniania w okresie wegetacji roślin. W pierwszej rotacji zmianowania (1978–1981) obiekty z nawadnianiem otrzymały łącznie 630 mm wody, w drugiej (1982–1985) 580 mm wody, w trzeciej (1986–1989) 570 mm i w czwartej (1991–1994) – 350 mm.

Tabela 5

Sumy nawodnień w okresie wegetacji (mm)
Total irrigation water applied – during the vegetation period (mm)

Zmianowanie roślin Crop rotation {C}	Okres nawodnienia Irrigation period	Suma nawodnień Total irrigation water (mm)
C_1 – ziemniak; potato	23 V–4.VIII 1978	210
C_2 – jęczmień jary; spring barley	22 V–3.VII 1979	170
C_3 – rzepak ozimy; winter rape	13 V–27 VI 1980	130
C_4 – pszenica ozima; winter wheat	14 V–7 VII 1981	120
Rotacja I; Crop rotation {C-I}	1978–1981	630
C_1 – ziemniak; potato	1 VI–20 VIII 1982	200
C_2 – jęczmień jary; spring barley	17 V–30 VI 1983	190
C_3 – rzepak ozimy; winter rape	16 IV–2 VI 1984	80
C_4 – pszenica ozima; winter wheat	16 V–17 VII 1985	110
Rotacja II; Crop rotation {C-II}	1982–1985	580
C_1 – ziemniak; potato	2 VII–11 VIII 1986	120
C_2 – jęczmień jary; spring barley	4 V–8 VII 1987	170
C_3 – rzepak ozimy; winter rape	2 V–21 VI 1988	130
C_4 – pszenica ozima; winter wheat	15 V–30 VI 1989	150
Rotacja III; Crop rotation {C-III}	1986–1989	570
C_1 – ziemniak; potato	3 VI–9 VII 1991	60
C_2 – jęczmień jary; spring barley	21 V–3 VII 1992	130
C_3 – rzepak ozimy; winter rape	4 V–2 VII 1993	120
C_4 – pszenica ozima; winter wheat	24 VI–1 VII 1994	40
Rotacja IV; Crop rotation {C-IV}	1991–1994	350

W latach 1991–1994 podczas intensywnego wzrostu roślin wszystkie lizymetry podlewano wodą zdemineralizowaną, również w dawce 10 $dm^3.m^{-2}$. W okresie badań, w roku 1991 pod ziemniaki zastosowano na połowie lizymetrów z nawożeniem mineralnym również nawożenie organiczne w dawce 30 ton obornika na hektar $\{M_1\}$. W drugiej połowie lizymetrów obornika nie stosowano $\{M_o\}$.

3.3. ZMIANOWANIE ROŚLIN

Kształtowanie się stosunków wodnych gleb, w różnych warunkach meteorologicznych, badano w czterech 4-letnich identycznych rotacjach płodozmianowych. W każdej rotacji zmianowania uprawiano kolejno następujące rośliny {C}:

– ziemniak {C_1}: w roku 1978, 1982, 1986, 1991
– jęczmień jary {C_2}: w roku 1979, 1983, 1987, 1992
– rzepak ozimy {C_3}: w latach 1979/80, 1983/84, 1987/88, 1992/93
– pszenicę ozima {C_4}: w latach 1980/81, 1984/85, 1988/89, 1993/94.

Terminy sadzenia, siewu i zbioru poszczególnych roślin w kolejnych rotacjach były następujące:

{C-I} – I rotacja zmianowania (lata 1978–1981)
ziemniak – sadzenie 24 IV 1978, zbiór 21 IX–4 X 1978
jęczmień jary – siew 5–6 IV 1979, zbiór 13–19 VII 1979
rzepak ozimy – siew 27 VIII 1979, zbiór 30 VII 1980
pszenica ozima – siew 6–7 X 1980, zbiór 21–23 VII 1981

{C-II} – II rotacja zmianowania (lata 1982–1985)
ziemniak – sadzenie 3 V 1982, zbiór 13 IX 1982
jęczmień jary – siew 7–8 IV 1983, zbiór 11–19 VII 1983
rzepak ozimy – siew 31 VIII 1983, zbiór 17–19 VII 1984
pszenica ozima – siew 18 X 1984, zbiór 29–30 VII 1985

{C-III} – III rotacja zmianowania (lata 1986–1989)
ziemniak – sadzenie 5 V 1986, zbiór 22–30 IX 1986
jęczmień jary – siew 13–14 IV 1987, zbiór 20–27 VII 1987
rzepak ozimy – siew 1–2 IX 1987, zbiór 15–18 VII 1988
pszenica ozima – siew 6–7 X 1980, zbiór 21–23 VII 1981

{C-IV} – IV rotacja zmianowania (lata 1991–1994)
ziemniak – sadzenie 21 IV 1991, zbiór 10 IX 1991
jęczmień jary – siew 8–9 III 1992, zbiór 14–15 VII 1992
rzepak ozimy – siew 3 IX 1992, zbiór 12–13 VII 1993
pszenica ozima – siew 22–23 IX 1993, zbiór 13–16 VII 1994.

Ziemniak sadzono po 4 rośliny na 1 m^2. Jęczmień jary, pszenicę ozimą i rzepak ozimy siano w rzędy; pozostawiano na 1 m^2 około 300 roślin jęczmienia i pszenicy i 100 roślin rzepaku. W razie potrzeby stosowano środki ochrony roślin według zaleceń agrotechnicznych (128).

4. APARATURA I METODYKA BADAŃ

4.1. WARUNKI METEOROLOGICZNE

Codziennie mierzono temperaturę i opad atmosferyczny w Stacji Meteorologicznej Zakładu Agrometeorologii IUNG w Puławach.

Temperaturę powietrza T (°C) mierzono na wysokości 2 m o godzinie 7^{00}, 13^{00} i 19^{00} za pomocą termometru „suchego", oraz termografu o godzinie 1^{00} (nocą). Średnią dobową temperaturę powietrza określano z 4 odczytów. Opad P (mm) określano za pomocą deszczomierza Hellmanna umieszczonego na wysokości 1 m

nad powierzchnią gruntu i śniegomierza wagowego oraz pluwiografu, umieszczonych na tej samej wysokości (1 m). Wykonano zestawienia średnich miesięcznych temperatur powietrza i miesięcznych sum opadów dla każdego roku, za okres 16 lat prowadzenia badań.

4.2. POMIARY WILGOTNOŚCI GLEB I OKREŚLENIE KRZYWEJ RETENCJI pF

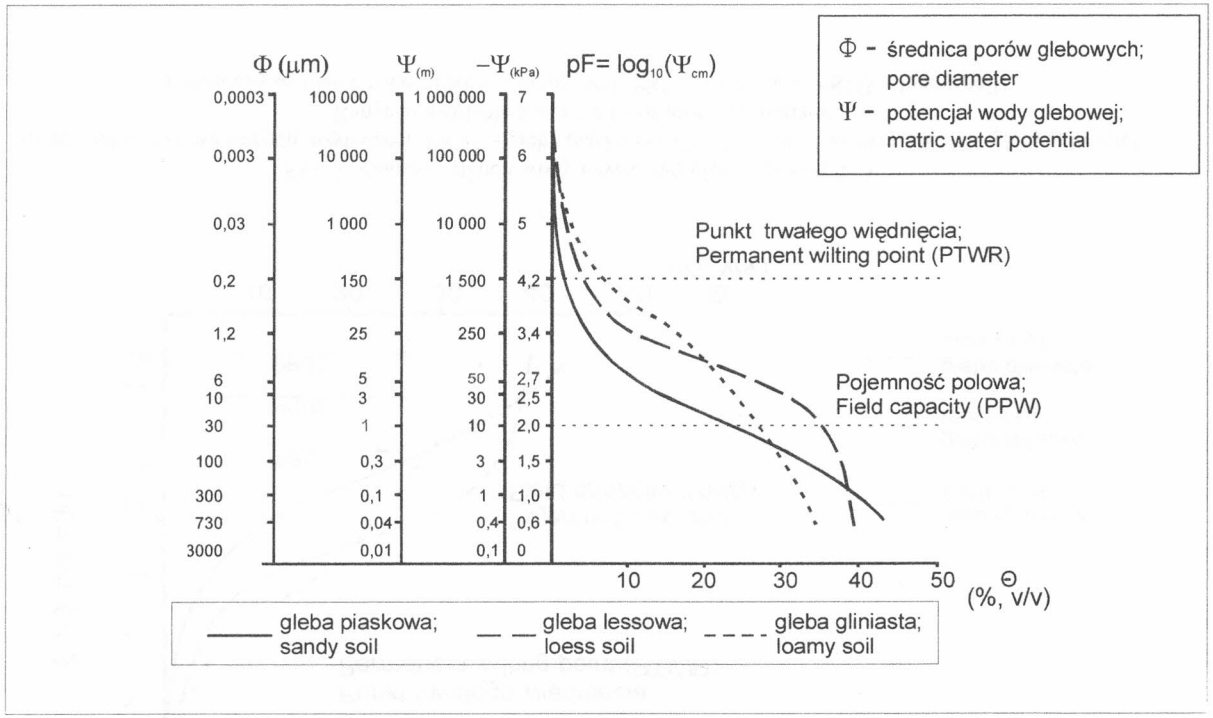
Wilgotność gleb θ (%, v/v) oznaczano metodą neutronową, w cyklu dwutygodniowym na głębokościach 30, 55 i 90 cm, wykorzystując do tego celu zainstalowane w każdym lizymetrze, pionowe rury duraluminiowe typu PA7T. Do badań wykorzystano sondę neutronową firmy Nuclear-Chicago, wyposażoną w źródło neutronów szybkich Am-Be o aktywności 30 mCi i helowy licznik proporcjonalny. Wilgotnościomierz współpracował z przelicznikiem model 5920 tej samej firmy. W badaniach wykorzystano metodykę pomiarową opracowaną przez Chmielewskiego (19). W latach 1991–1994 pomiary wilgotności gleb wykonano przy użyciu aparatury izotopowej typu PT-3 o wydajności $5{,}85.10^{-6}$ n/s oraz CPN-503 (źródło neutronowe Am-Be o aktywności 1,85 Gbq. W badaniach wykorzystano dane literaturowe (20-22, 25) dotyczące instalacji rur, metodyki pomiarów i kalibracji sprzętu do oznaczeń wilgotności w warunkach lizymetrycznych.

Krzywe retencji pF wyznaczono na blokach piaskowych i w komorach wysokociśnieniowych (31, 163). Na podstawie krzywej pF określono polową pojemność wodną (PPW) i wilgotność punktu trwałego więdnięcia roślin (PTWR) w badanych glebach. Przedziały wody dostępnej dla roślin uprawnych w poszczególnych glebach ustalono na podstawie wykonanych krzywych pF (rys. 2), wraz z potencjalną i efektywną retencją użyteczną (rys. 3).

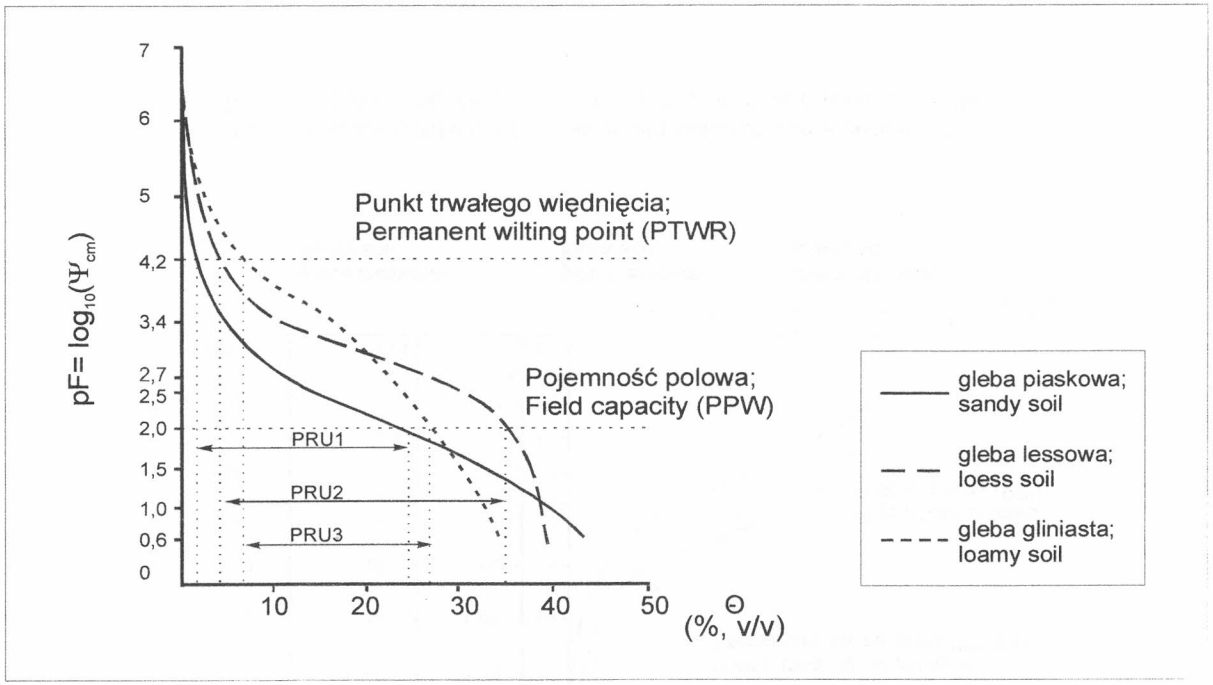
Oznaczenia retencji wodnej badanych gleb, w zakresie niskich wartości (pF 0–2,0) wykonano na blokach piaskowych wypierając wodę ze 100 cm^3 próbki glebowej umieszczonej na bloku piaskowym przy ciśnieniu ssącym -Ψ równym 0–100 cm słupa wody. Przy ciśnieniu ssącym równym -Ψ = 100 cm (pF 2,0) zawartość wody w % (v/v) w poszczególnych warstwach gleb wynosiła:

warstwa	0–30 cm	31–70 cm	71–130 cm
gleba piaskowa	25,8	24,0	25,2
gleba lessowa	36,1	34,8	31,8
gleba gliniasta	27,7	31,0	37,7 (rys.2, 3).

Wartości pF powyżej 2,0 oznaczono metodą wypierania wody z próbek glebowych, umieszczonych w komorach wysokociśnieniowych (*Eijkelkamp, Holandia*) przy użyciu zestawu urządzeń z zastosowaniem płyt ceramicznych (*Soil Moisture Inc., USA*) do określania retencji wodnej gleb. Przy ciśnieniu ssącym



Rys. 2. Charakterystyka retencji wodnej (pF) badanych gleb w poziomie A_1
Water retention charakteristics (pF) of the A_1 horizon of the experimental soils



Rys. 3. Zakresy retencji wody użytecznej gleb w poziomie A_1
(potencjalna rezerwa retencji użytecznej: PRU1 – gleby piaskowej, PRU2 – gleby lessowej, PRU3 – gleby gliniastej)
Range of available water for three soils – A_1 horizon
(potentially available water: PRU1 – sandy soil, PRU2 – loess soil, PRU3 – loamy soil)

15000 cm słupa wody pF 4,2 w warstwach badanych gleb stwierdzono następujące zawartości wody w % (v/v):

warstwa	0–30 cm	31–70 cm	71–130 cm
gleba piaskowa	2,6	2,0	2,2
gleba lessowa	4,5	12,1	7,1
gleba gliniasta	7,6	15,0	18,0 (rys.2, 3).

4.3. POMIARY PRZESIĄKU GLEBOWEGO

Przez cały okres prowadzenia doświadczenia zbierano przesiąki glebowe do kanistrów polietylenowych, umieszczonych pod każdym lizymetrem, w piwnicy, w temperaturze 2–10°C. Co miesiąc (lub częściej, w zależności od ilości opadów lub pory roku) przesiąki ważono i na tej podstawie określano ich objętość w $dm^3.m^{-2}$ lub mm.

4.4. BILANS WODNY GLEB

Bilans wodny gleb i polowe zużycie wody na ewapotranspirację (mm) obliczono dla całego okresu badań, na podstawie zapasów wody w poszczególnych warstwach gleb do głębokości 100 cm, mierzonych w czasie wschodów i zbioru roślin uprawnych.

Bilans wodny obliczono według równania B a c a (6-8) modyfikując wg nomenklatury międzynarodowej:

$$\mathbf{S_i + (P + I) - D = WU + S_f} \quad \text{(mm)}$$

gdzie: S_i – zapas wody w glebie (mm) na początku okresu bilansowania,
S_f – zapas wody w glebie (mm) na końcu okresu bilansowania,
P – suma opadów atmosferycznych (mm) w rozpatrywanym okresie,
I – suma nawadniania (mm),
D – suma odpływu wgłębnego wody – przesiąk wody glebowej (mm),
WU – rzeczywiste (polowe) zużycie wody na ewapotranspirację aktualną (mm).

Na podstawie równania bilansu wodnego gleb wyliczono rzeczywiste (polowe) zużycie wody (WU) ze wzoru:

$$\mathbf{WU = S_i + (P + I) - D - S_f}$$

gdzie: $\mathbf{S_i}$ – oznacza początkowy zapas wody w glebie (mm):

– dla ***n*** warstw: $$\mathbf{S_i} = \sum_{j=1}^{n} \mathbf{S_{ij}}$$

– dla poszczególnych badanych warstw gleby – $\{L_1\}$; $\{L_2\}$; $\{L_3\}$:

$$\mathbf{S_i = S_{i1} + S_{i2} + S_{i3}}$$

gdzie: S_{i1} – początkowy zapas wody dla I warstwy 0–30 cm $\{L_1\}$ (mm)
S_{i2} – początkowy zapas wody dla II warstwy 30–60 cm $\{L_2\}$ (mm)
S_{i3} – początkowy zapas wody dla III warstwy 60–100 cm $\{L_3\}$ (mm),

gdzie: S_f – końcowy zapas wody w glebie (mm):

– dla ***n*** warstw: $S_f = \sum_{j=1}^{n} S_{fj}$

– dla poszczególnych badanych warstw gleby – $\{L_1\}$; $\{L_2\}$; $\{L_3\}$:

$$S_f = S_{f1} + S_{f2} + S_{f3}$$

gdzie: S_{f1} – końcowy zapas wody dla I warstwy 0–30 cm $\{L_1\}$ (mm)
S_{f2} – końcowy zapas wody dla II warstwy 30–60 cm $\{L_2\}$ (mm)
S_{f3} – końcowy zapas wody dla III warstwy 60–100 cm $\{L_3\}$ (mm).

Wstawiając do wzoru różnice zapasu wody w glebie (ΔS_w) między początkową wartością (S_i) a końcową (S_f) okresu pomiarowego:

$$\Delta S_w = S_i - S_f \text{ (mm)}$$

otrzymano uproszczoną postać równania rzeczywistego (polowego) zużycia wody w glebie (WU) w warstwie 0–100 cm:

$$WU = \Delta S_w + (P + I) - D \text{ (mm)}$$

Zapas wody w glebie (S_w) w mm dla poszczególnych warstw gleby $\{L_1\}$; $\{L_2\}$; $\{L_3\}$ obliczono wg formuły:

$$S_w = 0{,}1 \times d \times \theta \text{ (mm)}$$

gdzie: d – grubość warstwy gleby (cm),
θ – wilgotność gleby ($m^3.m^{-3}$) × 100% dla warstw: $\{L_1\}$; $\{L_2\}$; $\{L_3\}$.

4.5. PLONOWANIE ROŚLIN

Każdego roku po zbiorze roślin określano plon:

- bulw ziemniaka (kg świeżej masy/lizymetr; g s.m./lizymetr);
- ziarna i słomy jęczmienia jarego i pszenicy ozimej (g s.m./lizymetr);
- ziarna i słomy rzepaku ozimego (g s.m./lizymetr).

4.6. WSKAŹNIKI ZUŻYCIA I WYKORZYSTANIA WODY PRZEZ ROŚLINY

Rzeczywiste zużycie wody (WU) w mm równa się wartości ewapotranspiracji aktualnej (ET) w mm.

Oceny zużycia i wykorzystania wody przez rośliny dokonano przy pomocy: wskaźników jednostkowego zużycia wody (UWC) i wydajności zużycia wody (WUE).

Dysponując rzeczywistym zużyciem wody (WU) i wartością plonu roślin (Y) określono rzeczywiste jednostkowe zużycie wody przez ziemniaki, jęczmień jary, rzepak ozimy, pszenicę ozimą (kg H_2O . kg^{-1} s.m. plonu) stosując wzór: UWC = WU/Y

Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) wyliczono ze stosunku masy plonu (w gramach) na jednostkę zużycia wody (w mm) z powierzchni (1 m^2) wyrażony w (g plonu suchej masy . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) według wzoru: WUE = Y/WU

4.7. ANALIZA STATYSTYCZNA

Uzyskane wyniki badań zapisane w programie Microsoft EXCEL 97 posłużyły do wykonania obliczeń statystycznych i graficznych opracowań komputerowych wykonanych w programie Microsoft EXCEL 97, Microsoft PowerPoint, StatGrafics, ver 2.7, Corel DRAW 8 oraz Minitab. Analizę statystyczną głównie przy zastosowaniu analizy wariancji, wykonano dla określenia zależności prostych między uzyskanymi danymi dotyczącymi: uwilgotnienia gleb, rzeczywistego zużycie wody, jednostkowego zużycie wody, wskaźnika wydajności zużycia wody, plonowania roślin w zależności od badanych gleb, poziomu nawożenia NPK, nawadniania interwencyjnego i nawożenia obornikiem, a także interakcji poszczególnych czynników. Uzyskany materiał badawczy poddano analizie wariancji w terminach pomiarowych, latach badań, a także opracowano syntezę za cały okres badawczy. Istotność różnic między średnimi badanych zmiennych ich zależności proste, jak i interakcje określono metodą Tukeya. Wartości przedziałów ufności wyliczono i oceniono na 3 poziomach istotności (wysoce istotny $\alpha = 0{,}001$, istotny $\alpha = 0{,}001$-$0{,}05$ i nieistotny $\alpha > 0{,}05$). Wyniki badań i najmniejsze istotne różnice (NIR) między badanymi obiektami podano przy poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Zależności między czynnikami doświadczenia a badanymi zmiennymi określono za pomocą analizy regresji prostej. Równania regresji przedstawiono dla tych par zmiennych, wykazujących istotność współczynników korelacji przy ($P < 0{,}05$). Istniejące zależności charakteryzowały równania regresji liniowej, dlatego też one zostały w pracy wykorzystane.

5. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH

5.1. TEMPERATURA POWIETRZA

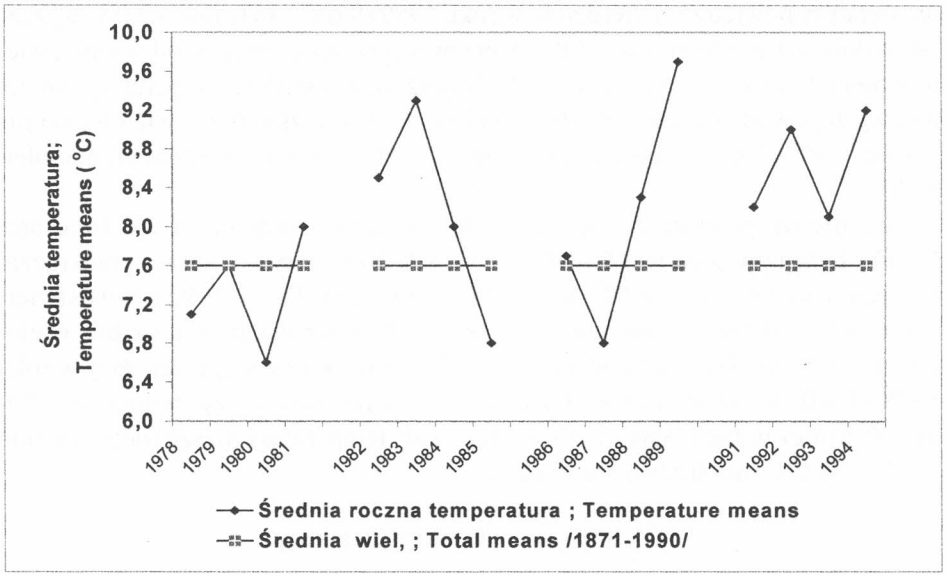
Temperaturę powietrza T (°C) przedstawiono w tabeli 6, w której porównano średnie miesięczne temperatury powietrza w okresie prowadzenia doświadczenia na tle średniej wieloletniej za okres 1871-1990 według G ó r s k i e g o i M a r c i n i a k a (53). Temperatura powietrza w poszczególnych latach badań (tab. 6) miała przebieg typowy, z występowaniem maksimum w miesiącach letnich (lipiec, sierpień) i minimum w okresie zimy (grudzień, styczeń, luty) – sezonowość temperatur powietrza potwierdzają badania T h o m p s o n a i T r o e h a (153). Najwyższą średnią temperaturą powietrza odznaczały się sierpień 1992 r. (22,1 °C) i lipiec 1994 r. (21,9 °C) – odpowiednio o 4,8 °C i o 3,6 °C wyższą od średniej wieloletniej, najniższą styczeń 1987 roku -12,4 °C (aż o 8,9 °C niższą od średniej wieloletniej).

Na rysunku 4 przedstawiono zróżnicowanie średnich temperatur powietrza na tle średnich wieloletnich temperatur za okres I–XII (7,6°C). Najwyższe średnie

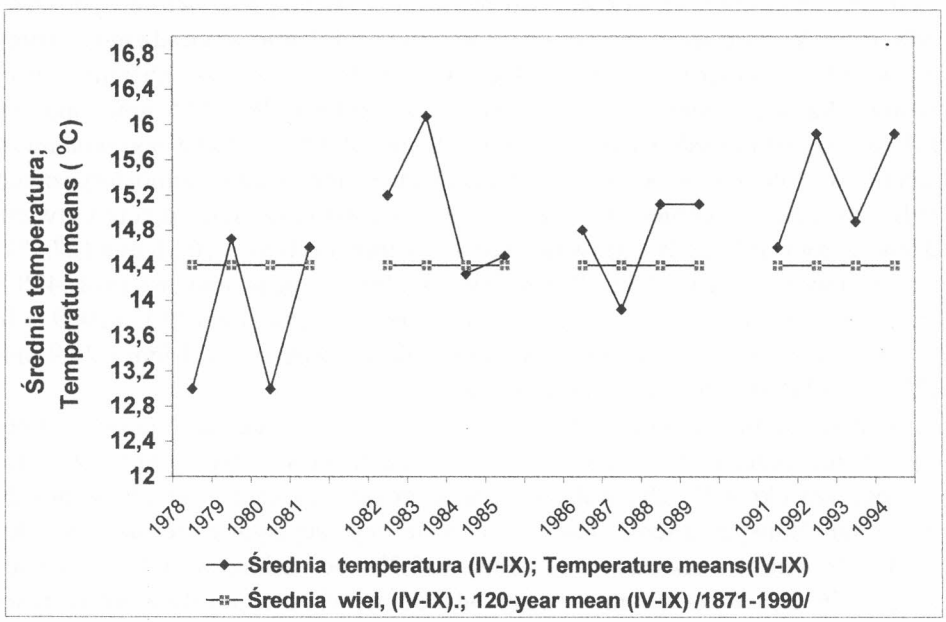
Tabela 6

Porównanie średniej miesięcznej temperatury powietrza (°C) za okres 1978–1989 i 1991–1994 ze średnimi wieloletnimi
Comparison of mean monthly air temperatures (°C) for the periods 1978–1989 and 1991–1994 with the 120-year means

Lata Years	Średnia miesięczna; Monthly mean												Średnia za okres Mean for period	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IV–IX	I–XII
1978	-1,9	-3,9	3,5	6,4	12,1	15,6	16,5	16,2	11,2	8,5	4,5	-3,8	13,0	7,1
1979	-5,7	-5,4	2,6	6,7	15,0	20,0	15,5	17,2	13,8	6,2	3,2	1,5	14,7	7,6
1980	-6,3	-1,3	-0,4	6,6	10,0	15,6	16,8	16,3	12,7	8,6	1,7	-1,0	13,0	6,6
1981	-3,9	-1,1	4,0	6,0	14,3	17,5	18,7	16,9	14,0	9,2	3,0	-2,8	14,6	8,0
1982	-3,8	-3,0	3,2	5,7	14,8	16,3	19,1	19,6	15,7	8,9	4,8	1,3	15,2	8,5
1983	2,7	-2,2	4,2	10,5	16,4	17,5	19,4	18,6	14,6	8,7	1,7	-0,5	16,1	9,3
1984	-0,2	-1,7	1,1	8,9	14,1	14,6	16,2	18,3	13,7	10,3	2,5	-1,3	14,3	8,0
1985	-8,8	-9,5	1,8	8,7	15,4	14,6	17,5	18,4	12,3	8,0	0,6	2,0	14,5	6,7
1986	-1,3	-9,4	1,9	9,9	14,8	17,3	18,0	17,7	11,2	8,0	4,9	-0,8	14,8	7,7
1987	-12,4	-0,9	-2,6	7,1	12,6	16,6	18,7	15,4	13,0	8,5	4,2	0,2	13,9	6,8
1988	0,4	0,2	0,8	7,5	15,2	16,8	19,7	17,7	13,5	7,7	-0,2	0,6	15,1	8,3
1989	1,7	3,9	5,4	9,5	14,5	15,8	18,8	17,9	14,4	10,4	2,1	1,4	15,1	9,6
1991	-0,3	-4,2	4,0	7,7	11,4	16,2	19,6	18,2	14,6	8,2	4,4	-1,7	14,6	8,2
1992	-1,3	0,7	3,9	7,8	13,8	18,6	20,2	22,1	12,7	6,1	3,7	-0,6	15,9	9,0
1993	-0,4	-1,4	0,9	9,1	16,8	16,2	17,4	17,2	12,5	8,9	-2,5	1,9	14,9	8,1
1994	2,3	-2,1	4,1	9,6	13,3	16,5	21,9	18,6	15,5	6,9	3,8	0,4	15,9	9,2
Średnia wieloletnia Means for years (1871–1990)	-3,5	-2,5	1,5	7,7	13,4	16,7	18,3	17,3	13,2	7,9	2,7	-1,4	14,4	7,6



Rys. 4. Zróżnicowanie średnich rocznych wartości temperatur powietrza na tle średniej wieloletniej (1871–1990) (średnia roczna temperatura za wielolecie = 7,6°C)
Differences between mean annual air temperatures and the long-term means (1871–1990). (long-term mean annual air temperature = 7,6 °C)



Rys. 5. Zróżnicowanie średnich temperatur powietrza w okresie wegetacji (IV–IX) na tle średniej wieloletniej (1871–1990) (średnia wiel. temperatura w okresie IV–IX = 14,4 °C)
Differences between mean air temperatures and the long-term means (1871–1990) during the growing season (months IV–IX) (long-term mean annual air temperature = 14,4°C)

temperatury powietrza stwierdzono w roku 1989 (9,6°C), były one o 2,0°C wyższe od średniej wieloletniej. Lata 1982 i 1994 były również cieplejsze od średniej wieloletniej odpowiednio o 1,7°C i 1,6°C. Najniższe zaś średnie temperatury powietrza występowały w roku 1980 (6,6°C) i były o 1,0°C niższe niż w wieloleciu oraz w roku 1985 i 1987 (odpowiednio niższe o 0,9°C i o 0,8°C od średnich wieloletnich).

Średnia temperatura powietrza w okresie sezonu wegetacyjnego (miesiące IV–IX) była najwyższa w roku 1983 i wynosiła 16,1°C (rys. 5) a więc przekraczała średnią wieloletnią (14,4°C) aż o 1,7°C. Również w latach 1992 i 1994 stwierdzono w tym okresie temperatury wyższe o 1,5°C w porównaniu ze średnią wieloletnią. Najniższe średnie temperatury powietrza w okresie wegetacji były w roku 1978 i 1980 i wynosiły 13,0°C (niższe o 1,4°C w porównaniu ze średnią wieloletnią). Również w roku 1984 i 1987 występowały temperatury niższe (odpowiednio o 0,1°C i 0,5°C) niż średnia wieloletnia.

5.2. OPAD ATMOSFERYCZNY

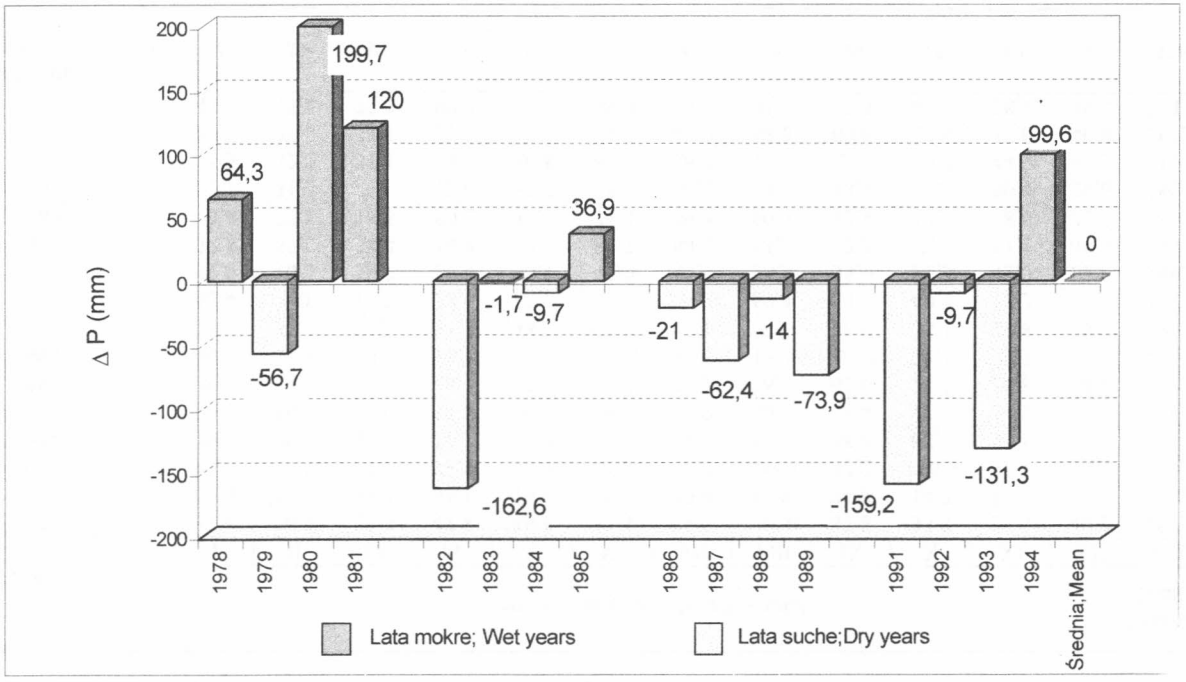
Porównanie miesięcznych i rocznych sum opadów atmosferycznych P (mm) na tle średnich wieloletnich opadów przedstawiono w tabeli 7 i rysunku 6. Dane wskazują, że suma opadów atmosferycznych dla poszczególnych lat badań (w okresie od I do XII) była najwyższa w roku 1980 i wynosiła 787,7 mm. Była ona aż o 199,7 mm (34,0%) wyższa w porównaniu ze średnią wieloletnią wynoszącą 588,0 mm. Wyższe sumy opadów na tle średniej wieloletniej stwierdzono również w roku 1981, większe o 120 mm (20,4%), i w roku 1994, wyższe o 99,6 mm (16,9%) w stosunku do średniej wieloletniej. Również w roku 1978 i 1985 sumy opadów były wyższe odpowiednio o 64,3 mm i o 36,9 mm (10,9% i 6,3%) w porównaniu ze średnią wieloletnią. W pozostałych latach badań sumy opadów atmosferycznych były niższe na tle średniej wieloletniej, przy czym najniższą sumę opadów stwierdzono w roku 1982, gdy wyniosła tylko 425,4 mm, czyli aż o 162,6 mm (27,7%) mniej od średniej z wielolecia. Również w roku 1991 suma opadów wyniosła 428,8 mm, tj. o 159,2 mm mniej od średniej wieloletniej (27,1%). Lata 1993 i 1989 były również suche i suma opadów była odpowiednio niższa o 131,3 mm i 73,9 mm (22,3% i 12,6%) na tle średniej wieloletniej.

Różnicowanie się sum opadów ΔP (mm) w okresie wegetacji na tle średniej wieloletniej przedstawiono na rysunku 7. Suma opadów w ciągu okresu wegetacyjnego (za okres IV–IX) wahała się w szerokim zakresie – od 218,4 mm do 510,3 mm. Najwyższą sumę opadów w okresie wegetacyjnym stwierdzono w roku 1980 (510,3 mm), większą aż o 134,3 mm (35,7%) od średniej wieloletniej wynoszącej 376 mm. Wyższą sumę opadów od średniej wieloletniej stwierdzono również w roku 1978, o 79,0 mm (21,0%) i w roku 1984 o 59,7 mm (15,9%). W latach: 1986, 1985, 1994 i 1981 sumy opadów w okresie wegetacji były wyższe od średniej wieloletniej odpowiednio o 26,2 mm (7,0%), 20,3 mm (5,4%), 18,8 mm (5,0%)

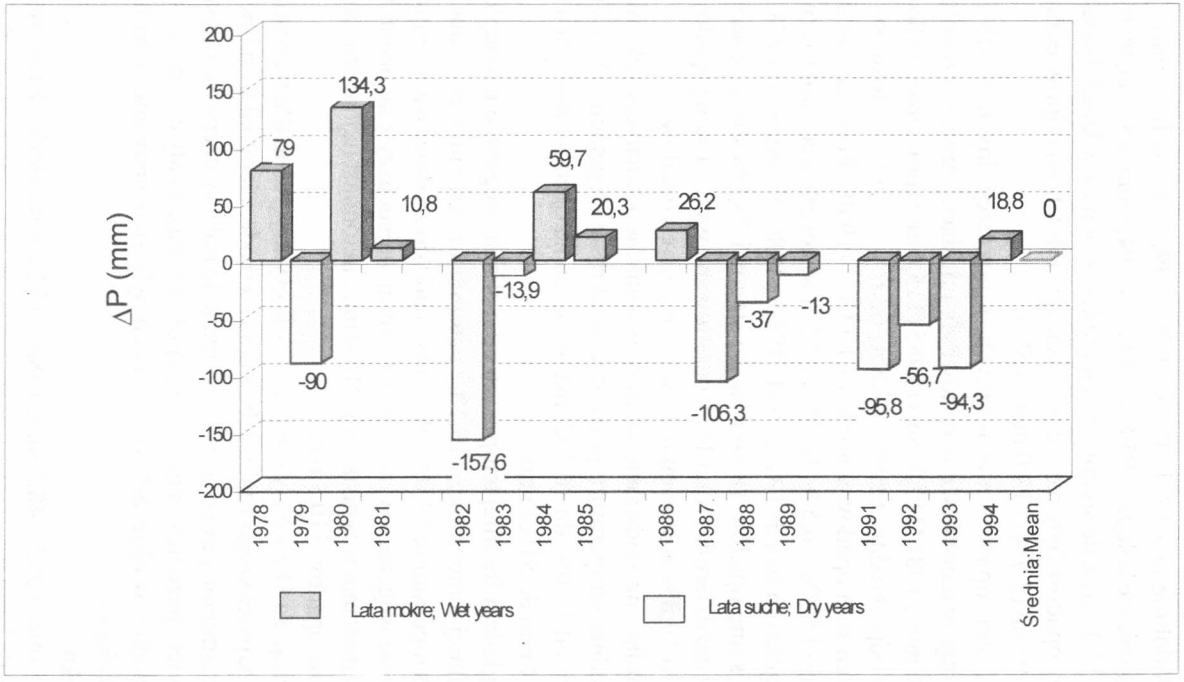
Tabela 7

Porównanie sum miesięcznych opadów atmosferycznych (mm) za okres 1978–1989 i 1991–1994 ze średnimi wieloletnimi
Comparison of the total monthly precipitation (mm) for the periods 1978–1989 and 1991–1994 with the 120-year means

Lata Years	Suma miesięczna; Monthly total												Suma za okres Total for period	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IV–IX	I–XII
1978	33,6	26,9	23,3	47,8	46,8	57,4	29,6	185,6	87,8	35,8	29,5	48,2	455,0	652,3
1979	66,0	10,7	48,2	66,1	26,1	26,9	49,9	82,8	34,8	14,7	41,3	63,8	286,6	531,3
1980	14,6	19,7	27,4	73,9	72,0	120,6	82,2	109,4	52,2	156,3	35,3	24,1	510,3	787,7
1981	39,2	20,9	59,8	10,3	53,7	117,0	88,2	59,2	58,4	68,1	58,5	74,7	386,8	708,0
1982	30,0	19,7	6,4	31,1	50,0	36,2	41,9	40,8	18,4	48,7	24,8	77,4	218,4	425,4
1983	49,5	34,6	55,0	48,1	83,5	32,7	99,2	36,6	62,0	23,5	26,8	34,8	362,1	586,3
1984	40,2	12,1	19,1	18,3	97,6	102,4	91,8	13,1	112,5	22,1	33,3	13,9	435,7	578,3
1985	28,4	32,6	26,4	31,3	48,2	115,4	77,1	77,4	46,9	33,1	29,8	78,3	396,3	624,9
1986	52,4	9,0	11,0	28,6	82,2	41,4	116,5	69,4	64,1	40,9	18,2	33,3	402,2	567,0
1987	47,6	10,5	58,7	29,4	50,1	47,9	44,9	58,5	38,9	31,3	42,0	65,8	269,7	525,6
1988	37,5	57,0	34,4	19,8	72,5	83,7	84,2	56,5	22,3	5,7	51,1	49,3	339,0	574,0
1989	13,4	23,5	18,5	50,2	33,3	77,4	89,4	60,3	52,4	14,8	58,6	22,3	363,0	514,1
1991	12,1	31,3	7,7	12,0	57,5	58,7	64,2	54,4	33,4	18,0	50,9	28,6	280,2	428,8
1992	15,3	32,2	31,1	54,3	40,8	63,2	26,5	10,4	124,1	90,2	44,9	45,3	319,3	578,3
1993	30,7	29,6	32,1	21,0	22,8	67,5	41,0	68,8	60,6	24,8	17,0	40,8	281,7	456,7
1994	43,1	13,8	72,2	90,0	66,9	49,9	19,7	81,0	87,3	86,3	28,1	49,3	394,8	687,6
Średnia wieloletnia Monthly means (1871–1990)	31	29	30	39	57	71	85	75	49	45	39	38	376	588



Rys 6. Zróżnicowanie rocznych sum opadów ΔP (mm) na tle średnich wieloletnich (1971–1990) (Wartość średniej wieloletniej – rocznej sumy opadów = 588 mm przyjęto za 0, ΔP=0)
Differences, ΔP(mm), between total annual precipitation and long-term (1971–1990) mean total annual precipitation. (At value of long-term mean 588 mm, ΔP=0)



Rys. 7. Zróżnicowanie sum opadów ΔP (mm) za okres wegetacji (IV–IX) na tle średnich wieloletnich (1971–1990)
(Wartość średniej wieloletniejsumy opadów w okresie IV–IX = 588 mm przyjęto za 0, ΔP=0)
Differences, ΔP(mm), between total precipitation in the growing period (months IV–IX) and long-term (1971–1990) mean total precipitation in the growing period (at value of long-term mean 376 mm, ΔP=0)

i 10,8 mm (2,9%). W pozostałych latach badań sumy opadów atmosferycznych dla okresu wegetacyjnego były niższe od średniej wieloletniej. Najniższą sumę opadów w okresie wegetacyjnym stwierdzono w roku 1982, aż o 157,6 mm (41,9%) mniej od średniej wieloletniej. W roku 1987 sumy opadów były niższe o 106,3 mm (28,3%). Podobnie lata 1991, 1993, 1979 i 1992 były suche. Sumy opadów były odpowiednio niższe kolejno o 95,8 mm (25,5%), 94,3 mm (25,1%), 90,0 mm (23,8%) i 56,7 mm (15,1%) na tle średniej wieloletniej. Również w latach badań 1988, 1983 i 1989 sumy opadów były niższe od średniej wieloletniej odpowiednio o 37,0 mm (9,8%), 13,9 mm (3,7%) i 13,0 mm (3,5%).

Rozkład sum opadów miesięcznych w poszczególnych latach był zmienny (tab. 7). Z reguły najobfitsze w opady były miesiące letnie, szczególnie czerwiec 1980 (120,6 mm), 1981 (117,0 mm) i 1985 (115,4 mm) oraz lipiec 1986 (116,5 mm), co stanowi odpowiednio 69,9%, 64,8%, 62,6% i 37,1% w stosunku do średnich miesięcznych sum opadów wieloletnich (1871–1990). Powyższe opady wyniosły odpowiednio 15,3%, 16,5%, 18,5% i 20,5% w stosunku do sum rocznych opadów w poszczególnych latach 1980, 1981, 1985 i 1986. W sierpniu 1978 zanotowano rekordową sumę opadów 185,6 mm, co stanowi 28,5% sumy opadów rocznych. Również w październiku roku 1980 odnotowano wysoką sumę opadów 156,3 mm, co stanowiło 19,8% w stosunku do sumy rocznych opadów.

Reasumując, na podstawie analizy warunków klimatycznych można stwierdzić, że średnia temperatura powietrza w okresie wegetacji (IV–IX) wahała się w granicach od 13,0°C do 16,1°C, natomiast suma opadów zawierała się w zakresie od 218,4 mm do 510,3 mm.

Pod względem średniej temperatury dla okresu wegetacji najcieplejszy był rok 1983 o średniej temperaturze 16,1°C, natomiast najzimniejsze – lata 1978 i 1980 o średniej temperaturze 13,0°C. W porównaniu do średniej wieloletniej sumy opadów w okresie wegetacji wynoszącej 376 mm, najsuchszy z lat badań był rok 1982 o sumie opadów mm w tym okresie 218,4 mm, natomiast najbardziej mokry był rok 1980 o sumie opadów 510,3 mm.

Przyjmując za D z i e ż y c e m (33) okresy krytyczne dla wzrostu roślin, pod względem największego zapotrzebowania na wodę: ziemniaka od lipca do połowy sierpnia, jęczmienia jarego od połowy maja do połowy czerwca, rzepaku ozimego maj i czerwiec, pszenicy ozimej druga połowa maja i cały czerwiec, stwierdzono, że sumy opadów w okresach krytycznych były zróżnicowane w badanych latach i wyniosły kolejno:

dla ziemniaka:
1978 – 73,5 mm, 1982 – 48,2 mm, 1986 – 152,5 mm, 1991 – 81,6 mm,
dla jęczmienia jarego:
1979 – 14,1 mm, 1983 – 6,1 mm, 1987 – 57,0 mm, 1992 – 85,1 mm,
dla rzepaku ozimego:
1980 – 192,6 mm, 1984 – 200,0 mm, 1988 – 156,2 mm, 1993 – 90,3 mm,
dla pszenicy ozimej:
1981 – 135,7 mm, 1985 – 142,3 mm, 1989 – 92,6 mm, 1994 – 109,3 mm.

6. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

6.1. WARUNKI WODNE GLEB

Warunki wilgotnościowe w badanych glebach w zależności od poziomu nawożenia NPK i nawadniania interwencyjnego stosowanego w okresie intensywnego wzrostu roślin analizowano dla okresu 1978–1989 i od nawożenia obornikiem dla okresu 1991–1994.

6.1.1. Dynamika uwilgotnienia gleb w zależności od ich składu granulometrycznego

Średnioroczne wartości uwilgotnienia i wahania wilgotności badanych gleb na głębokości 30, 55 i 90 cm za okres 1978–1989 i 1991–1994 przedstawiono odpowiednio w tabelach 8 i 9. Średnioroczne wartości uwilgotnienia badanych gleb w okresie 1978–1989 (n = 6048) i 1991–1994 (n=2016) wzrastały wraz z głębokością pomiarów w profilu glebowym. Wartości uwilgotnienia gleb dla całego profilu za okres 1978–1989 wyniosły dla gleby piaskowej 5,9–17,2, lessowej 9,5–28,2 i gliniastej 9,2–31,1 % (v/v), natomiast za okres 1991–1994 odpowiednio: 11,3–19,3, 17,1–28,2 i 21,3–32,6% (v/v). Wyniki te zgodnie z wcześniejszymi danymi C z y ż (24-26) wskazują, że średnie roczne wartości uwilgotnienia najmniej korzystnie dla roślin kształtowały się w glebie piaskowej, lepiej w lessowej i najlepiej w gliniastej.

Wahania uwilgotnienia badanych gleb (rys. 8) w poszczególnych terminach pomiarowych miały znacznie szerszy zakres wartości w porównaniu ze średniorocznymi wartościami uwilgotnienia i przedstawiały się następująco **za lata 1978–1989:** w glebie piaskowej od 0,9 do 26,7 % (v/v), w glebie lessowej od 1,9 do 40,6 % (v/v), w glebie gliniastej od 1,8 do 40,7 % (v/v), i **za lata 1991–1994:** w glebie piaskowej od 3,6 do 28,8% (v/v), w glebie lessowej od 4,4 do 36,6% (v/v), w glebie gliniastej od 11,9 do 45,5 % (v/v).

Porównując wartości uwilgotnienia badanych gleb w tych dwóch okresach stwierdzono wzrost dolnych zakresów uwilgotnienia w latach 1991–1994 z uwagi na wprowadzenie do gleby obornika. Średnie wartości uwilgotnienia na głębokościach 30, 55, 90 cm były znacznie wyższe w okresie 1991–1994 w porównaniu z 1978–1989 (rys. 9). Uzyskane wyniki wykazały wysoką dodatnią korelację uwilgotnienia wraz z głębokością badanych gleb. Stwierdzono liniową zależność między zawartością wody w glebach a głębokością pomiarową. Wraz ze wzrostem głębokości wzrastała zawartość wody we wszystkich glebach. Zależność tę opisują równania regresji liniowej (tab. 10), a potwierdzają uzyskane współczynniki determinacji (R^2) oraz korelacji (r). Wyznaczone metodą regresji prostej współczynniki korelacji (r), określające zależność zawartości wody od głębokości były wysoce istotne i w glebie piaskowej wyniosły r = 0,9939 (za lata 1978–1989) i r = 0,9997 (za lata 1991–1994), natomiast w glebie lessowej, odpowiednio: r = 0,9310 i r = 0,9452, a w glebie gliniastej r = 0,9767 i r = 0,9733. Wartości współczynników

Tabela 8

Zakresy i średnie roczne uwilgotnienie gleb θ (%, v/v) za okres 1978–1989
Range and mean annual of soil water contents θ (%, v/v) for period 1978–1989

Głębokość Depth (cm)	Gleba Soil	Lata; Years												
		1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1978–1989
30	piaskowa sandy	12,0 3,4–19,4	9,8 1,0–20,1	11,9 3,6–21,4	10,5 4,7–17,1	9,1 0,9–18,6	12,2 3,0–18,8	11,0 4,2–17,8	10,2 4,2–17,1	9,8 2,7–21,7	9,6 1,9–14,3	5,9 2,5–11,5	10,2 4,4–22,1	10,2 0,9–22,1
	lessowa loess	17,8 3,8–26,8	14,8 1,9–32,2	14,7 4,7–24,7	12,6 5,4–21,4	11,3 2,6–26,5	18,7 4,6–29,3	15,1 5,4–28,4	12,9 3,5–24,8	13,8 4,2–25,2	14,1 2,6–22,0	9,5 4,0–16,8	13,4 4,0–3,1	14,1 1,9–32,2
	gliniasta loamy	18,7 6,5–29,3	16,5 3,5–28,6	17,1 5,1–28,5	15,8 5,3–26,2	12,4 1,8–28,5	20,6 2,8–29,9	15,6 4,7–27,3	13,8 2,6–26,9	13,2 2,9–28,3	14,5 2,2–27,7	9,2 2,7–16,8	15,9 5,4–28,5	15,3 1,8–29,9
55	piaskowa sandy	14,2 4,3–20,5	10,4 2,1–20,7	13,6 4,5–25,3	10,4 4,3–17,3	11,4 3,9–22,1	13,3 4,5–21,2	12,5 4,3–20,9	13,0 4,4–19,9	13,0 5,1–21,9	13,8 3,4–20,4	9,8 4,2–16,4	11,8 5,5–17,7	12,3 2,1–25,3
	lessowa loess	25,0 12,4–32,2	18,6 8,5–36,5	20,2 9,3–27,1	17,2 7,5–26,9	18,7 9,1–30,0	21,5 11,3–33,9	20,8 8,9–30,9	18,4 10,1–26,2	20,4 11,1–30,0	22,2 11,3–30,8	17,4 10,1–26,2	19,1 9,6–31,4	20,0 7,5–36,5
	gliniasta loamy	26,2 15,7–32,9	21,7 11,1–32,7	23,0 13,9–32,7	21,2 13,2–29,8	21,5 13,7–33,9	24,9 14,7–34,5	23,5 15,2–31,7	20,5 12,9–27,5	25,1 14,5–34,5	24,4 13,7–31,9	18,6 12,2–28,1	22,8 13,3–30,2	22,8 11,1–34,5
90	piaskowa sandy	17,2 5,4–24,4	11,1 2,8–23,9	14,4 5,1–22,1	10,7 3,9–20,9	13,8 5,6–26,7	15,6 8,4–26,0	13,9 5,1–22,2	15,5 5,9–23,8	15,7 6,4–26,0	16,7 4,9–24,6	12,1 5,0–21,5	15,1 7,7–20,9	14,3 2,8–26,7
	lessowa loess	28,2 17,5–35,6	18,7 8,9–35,1	20,5 11,9–29,3	17,7 8,5–33,0	22,3 13,1–34,9	22,1 12,9–40,6	20,6 10,6–32,7	21,0 12,6–32,7	23,6 13,5–34,2	25,5 8,5–34,4	22,1 10,1–32,7	21,5 11,9–32,9	22,0 8,5–40,6
	gliniasta loamy	31,1 23,7–37,5	24,6 15,2–38,0	26,6 19,0–34,3	24,4 18,9–34,2	27,9 20,1–40,7	27,9 23,0–38,9	27,7 16,7–36,5	26,6 20,4–35,4	30,7 21,4–39,3	30,2 20,3–37,6	27,6 20,7–37,7	27,4 21,9–34,3	27,7 15,2–40,7

Tabela 9

Zakresy i średnie, roczne uwilgotnienie gleb θ (%, v/v) za okres 1991–1994
Range and mean annual of soil water content θ (%, v/v) for period 1991–1994

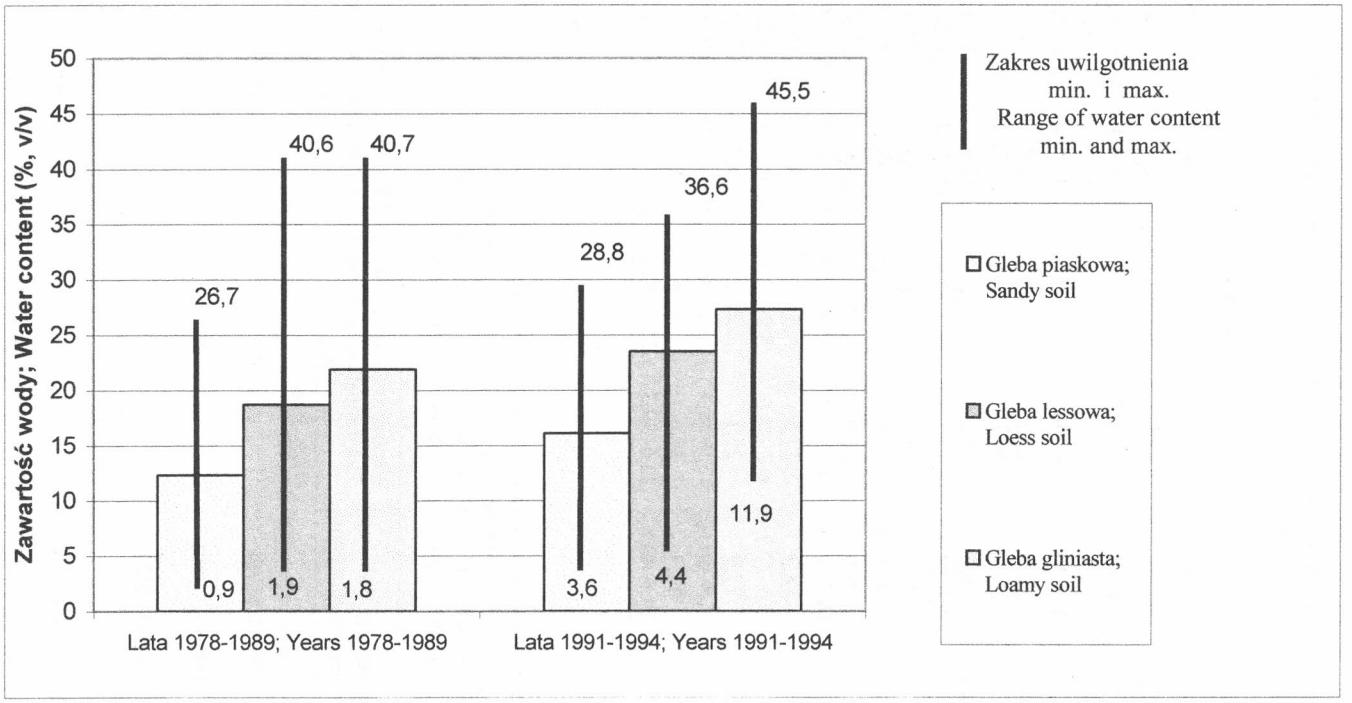
Głębokość Depth (cm)	Gleba Soil	Lata; Years				
		1991	1992	1993	1994	1991–1994
30	piaskowa sandy	13,7 4,4–21,4	11,3 3,6–20,5	13,7 4,7–22,4	16,3 8,1–24,4	13,8 3,6–24,4
	lessowa loess	19,3 4,4–30,5	17,1 5,6–29,1	19,7 7,6–28,1	20,1 11,1–29,4	19,0 4,4–30,5
	gliniasta loamy	22,9 12,2–31,6	21,3 11,9–31,9	23,0 14,1–30,2	22,9 13,2–32,1	22,5 11,9–32,1
55	piaskowa sandy	16,6 4,8–24,6	14,2 4,3–23,3	15,2 4,5–22,9	17,6 10,1–23,4	15,9 4,3–24,6
	lessowa loess	25,7 11,8–33,8	23,0 12,3–34,3	24,4 12,7–33,6	25,4 17,2–32,2	24,6 11,8–34,3
	gliniasta loamy	29,6 18,7–36,3	26,9 16,7–36,0	28,4 19,4–35,8	26,9 18,2–32,9	28,0 16,7–36,3
90	piaskowa sandy	18,7 5,0–27,7	17,6 6,7–28,8	19,3 5,9–27,9	18,9 10,1–25,1	18,6 5,0–28,8
	lessowa loess	27,9 12,9–36,6	25,1 13,9–36,4	28,2 13,2–36,1	26,4 16,2–31,9	26,9 12,9–36,6
	gliniasta loamy	32,3 20,5–40,5	32,0 23,6–39,3	32,6 21,3–39,4	28,7 20,9–34,6	31,4 20,5–40,5

Tabela 10

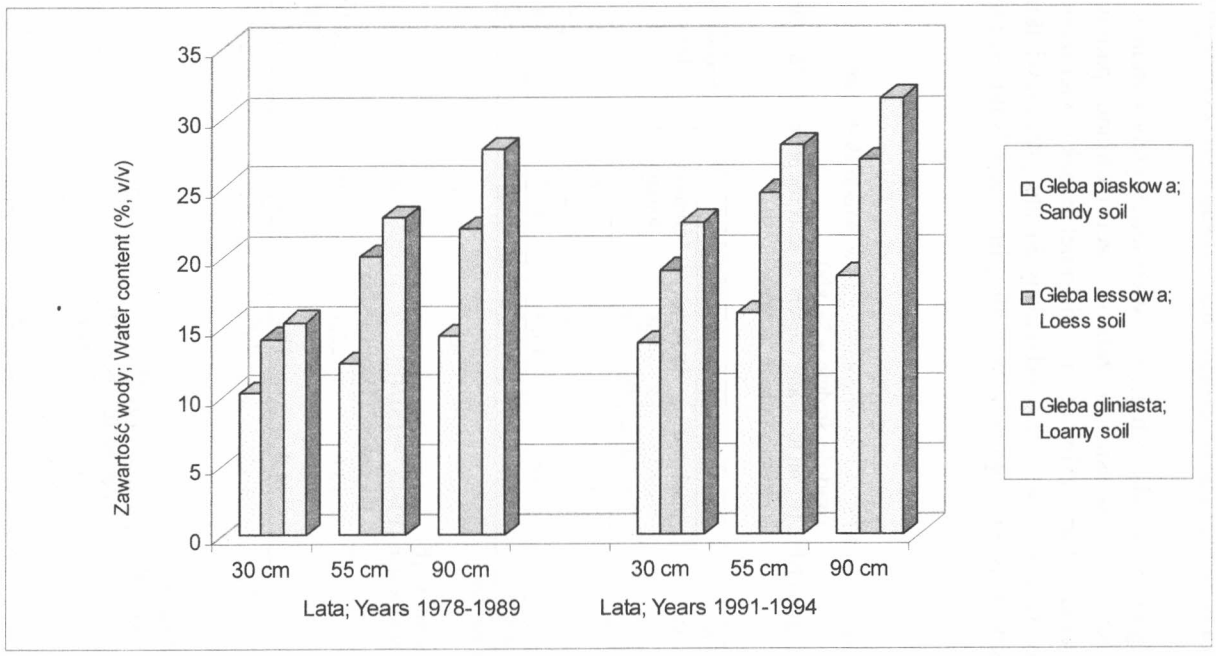
Regresja prosta między zawartością wody w glebach (%, v/v) – y
a głębokością pomiaru (cm) – x w okresie wzrostu roślin
Linear regression between soil water contents (%, v/v) – y, and depth (cm) – x,
for periods growing plants in the experimental soils

Gleba Soil	Równania regresji liniowej Linear regression equations	Współczynnik determinacji Determination coefficient (R^2)	Współczynnik korelacji Correlation coefficient (r)
1978–1989			
Piaskowa Sandy	y = 8,3225 + 0,0676x	0,9879	0,9939
Lessowa Loess	y = 11,2990 + 0,1269x	0,8668	0,9310
Gliniasta Loamy	y = 10,1280 + 0,2024x	0,9539	0,9767
1991–1994			
Piaskowa Sandy	y = 11,440 + 0,0798x	0,9994	0,9997
Lessowa Loess	y = 16,0670 + 0,1274x	0,8934	0,9452
Gliniasta Loamy	y = 18,8390 + 0,1450x	0,9474	0,9733

Regresja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$; Regression significant at $\alpha = 0,05$



Rys. 8. Zakresy oraz średnie wartości uwilgotnienia gleb w okresie wzrostu roślin dla wszystkich głębokości
Range and mean values of volumetric water content of soils in the growing seasons for all depth



Rys. 9. Średnia wartość uwilgotnienia gleb w latach 1978–1989 i 1991–1994 w zależności od głębokości pomiaru
Mean values soil water content in period 1978–1989 and 1991–1994 depend on the depth

determinacji $R^2(100)$ wskazują, że zmienność zawartości wody w badanych glebach była w 86,7–99,9% powodowana głębokością, a tylko w 0,1–13,9% innymi czynnikami niż głębokość profilu glebowego (tab.10). Amplituda wahań wilgotności była najmniejsza w glebie piaskowej oraz zdecydowanie większa w glebie lessowej i gliniastej.

Dynamika uwilgotnienia badanych gleb na wszystkich głębokościach wahała się w ciągu roku w szerokim zakresie i zależała od ilości i rozkładu opadów atmosferycznych. Amplituda tych zmian była różna, niemniej jednak stwierdzono ciągłe zmniejszanie się uwilgotnienia w okresie od wiosny do lata, przy niewielkim tylko wzroście po większych opadach (głównie w glebie gliniastej). Najniższe uwilgot-

Tabela 11

Wpływ nawożenia NPK {F} na wilgotność gleb w okresie 1978–1989
(wartości średnie w %, v/v)
Effects of fertilization NPK {F} on the water content of soils for period 1978–1989
(mean values in %, v/v)

Nawożenie NPK NPK Fertilization {F}	Gleba; Soil {S}			Średnia NPK Mean NPK {F}
	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	
Głębokość; Depth 30 cm				
NPK I	11,0	15,4	15,8	14,2[a]
NPK II	9,7	13,8	14,0	12,5[b]
NPK III	9,8	13,0	15,5	12,8[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	10,2[a]	14,1[b]	15,3[c]	13,2
NIR; LSD ($\alpha = 0,05$) dla: for:				
gleby; soil {S}			1,07	
nawożenia; fertilization {F}			1,07	
współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,86	
Głębokość; Depth 55 cm				
NPK I	13,6	22,3	23,9	20,0[a]
NPK II	11,8	19,4	22,1	17,8[b]
NPK III	11,3	18,2	22,3	17,3[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	12,3[a]	20,0[b]	22,8[c]	18,3
NIR; LSD ($\alpha = 0,05$) dla: for:				
gleby; soil {S}			0,85	
nawożenia; fertilization {F}			0,85	
współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,45	
Głębokość; Depth 90 cm				
NPK I	16,0	24,6	28,9	23,2[a]
NPK II	14,0	21,2	27,0	20,7[b]
NPK III	12,9	20,2	27,3	20,1[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	14,3[a]	22,0[b]	27,7[c]	21,3
NIR; LSD ($\alpha = 0,05$) dla: for:				
gleby; soil {S}			0,88	
nawożenia; fertilization {F}			0,88	
współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,53	

Wartości oznaczone różnymi literami różnią się istotnie ($\alpha<0,05$); Values followed by different letters are significantly different ($\alpha<0,05$)

nienie gleb we wszystkich latach badań stwierdzano najczęściej w okresie czerwca i lipca. Związane to było z szybkim wykorzystywaniem zasobów wodnych gleb przez rośliny w okresie intensywnego wzrostu. Podobną dynamikę uwilgotnienia gleb uzyskali Czyż (23, 26), Chmielewski (19, 20), Fotyma i in. (48, 49), Igras (60, 62) oraz Matul i Sarnacka (96).

W całym 16-letnim okresie badań najwyższe wartości uwilgotnienia gleb stwierdzono w latach 1978, 1983 i 1994, a najniższe w 1979 i 1982. Mieściły się one w przedziałach wody dostępnej dla roślin, z reguły nie osiągając wartości ekstremalnych powyżej (PPW) i poniżej (PTWR). Wyjątkiem były tylko lata 1979 i 1982, w których w okresie letnim uwilgotnienie gleb było czasem mniejsze od wilgotno-

Tabela 12

Wpływ nawożenia NPK {F} na wilgotność gleb w okresie 1991–1994
(wartości średnie w %, v/v)
Effects of fertilization NPK {F} on the water content of soils for period 1991–1994
(mean values in %, v/v)

Nawożenie NPK NPK Fertilization {F}	Gleba; Soil {S}			Średnia NPK Mean NPK {F}
	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	
Głębokość; Depth 30 cm				
NPK I	14,8	20,1	23,5	19,4[a]
NPK II	13,6	18,9	22,2	18,2[b]
NPK III	13,0	18,1	21,9	17,7[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	13,8[a]	19,1[b]	22,5[c]	18,5
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for: gleby; soil {S} nawożenia; fertilization {F} współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,02 1,02 1,48	
Głębokość; Depth 55 cm				
NPK I	17,2	26,1	28,8	24,0[a]
NPK II	15,7	24,4	27,7	22,6[b]
NPK III	14,9	23,4	27,4	21,9[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	15,9[a]	24,6[b]	28,0[c]	22,9
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for: gleby; soil {S} nawożenia; fertilization {F} współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,08 1,08 1,94	
Głębokość; Depth 90 cm				
NPK I	20,0	28,3	32,6	27,0[a]
NPK II	18,8	26,6	30,8	25,4[b]
NPK III	17,1	25,7	30,8	24,5[b]
Średnia gleby; Mean soil {S}	18,6[a]	26,9[b]	31,4[c]	25,7
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for: gleby; soil {S} nawożenia; fertilization {F} współdziałania; interaction {F}/{S} = {S}/{F}			1,10 1,10 1,87	

Wartości oznaczone różnymi literami różnią się istotnie (α<0,05); Values followed by different letters are significantly different (α<0,05)

ści trwałego więdnięcia roślin (<WTWR). W roku 1979 spadek uwilgotnienia poniżej WTWR występował we wszystkich glebach na głębokości 30 cm, natomiast w roku 1982 sytuacja taka miała miejsce w glebie piaskowej i lessowej. Występowanie niskich wartości uwilgotnienia gleb związane było z brakiem opadów i wysoką średnią temperaturą powietrza w obydwu badanych latach (14,7°C w roku 1979 i 15,2°C w roku 1982). Niskie uwilgotnienie gleb natychmiastowo likwidowano stosując nawadnianie interwencyjne.

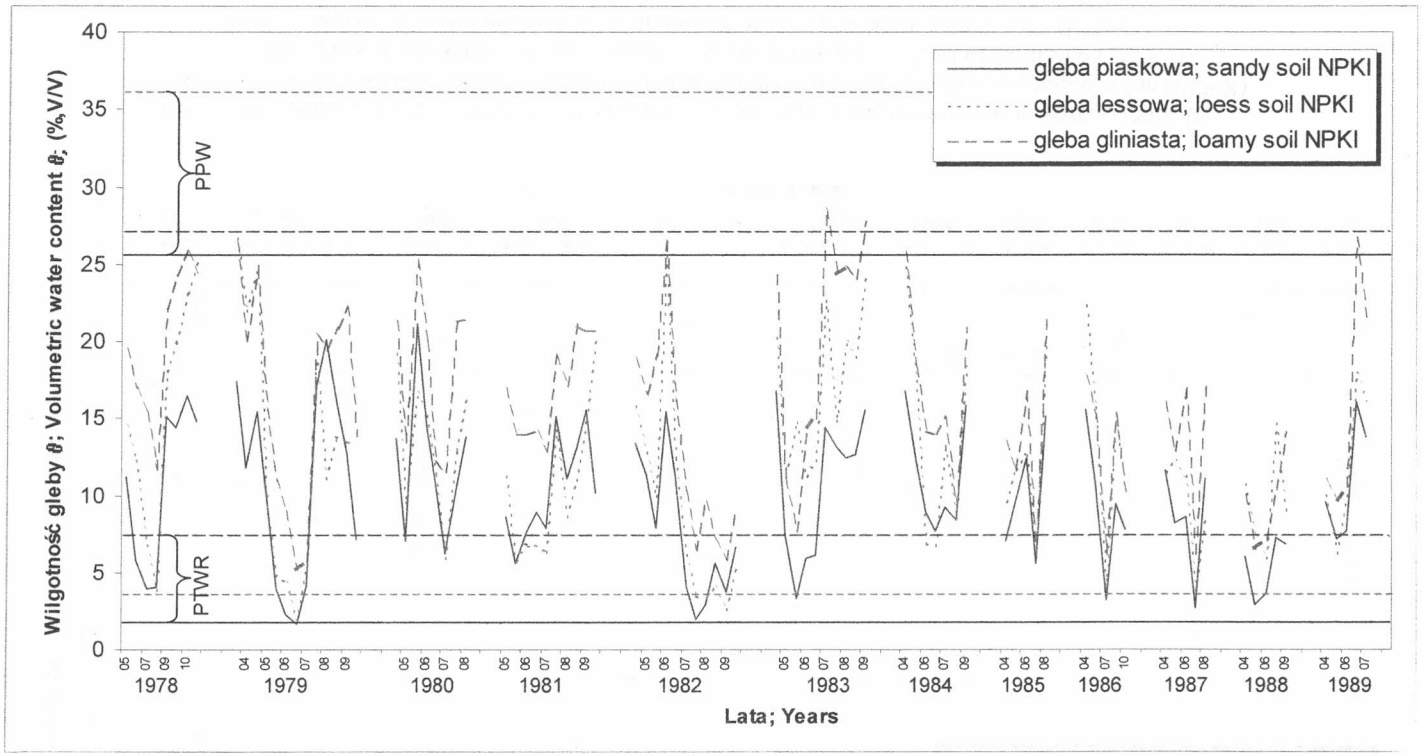
Uwilgotnienie gleb powyżej polowej pojemności wodnej (>PPW) stwierdzono, głównie w lipcu i wrześniu roku 1983, na wszystkich głębokościach w glebie gliniastej. Było to efektem długotrwałych ulewnych opadów przekraczających znacznie sumę wieloletnią opadu (np. suma opadu dziennego 14 lipca 1983 roku wyniosła 39,2 mm) i słabej przepuszczalności gleby. Podobne wyniki badań w tym zakresie uzyskali Dzieżyc (33), Thompson i Troeh (153).

Zdecydowanie najniższe wartości uwilgotnienia we wszystkich latach badań miała gleba piaskowa, wyższe lessowa i zbliżone, ale nieco wyższe gleba gliniasta. Uzyskane wyniki badań przedstawione syntetycznie w tabelach 11 i 12 wskazują na wysoce istotny wpływ gatunku gleby i głębokości pomiaru na jej uwilgotnienie.

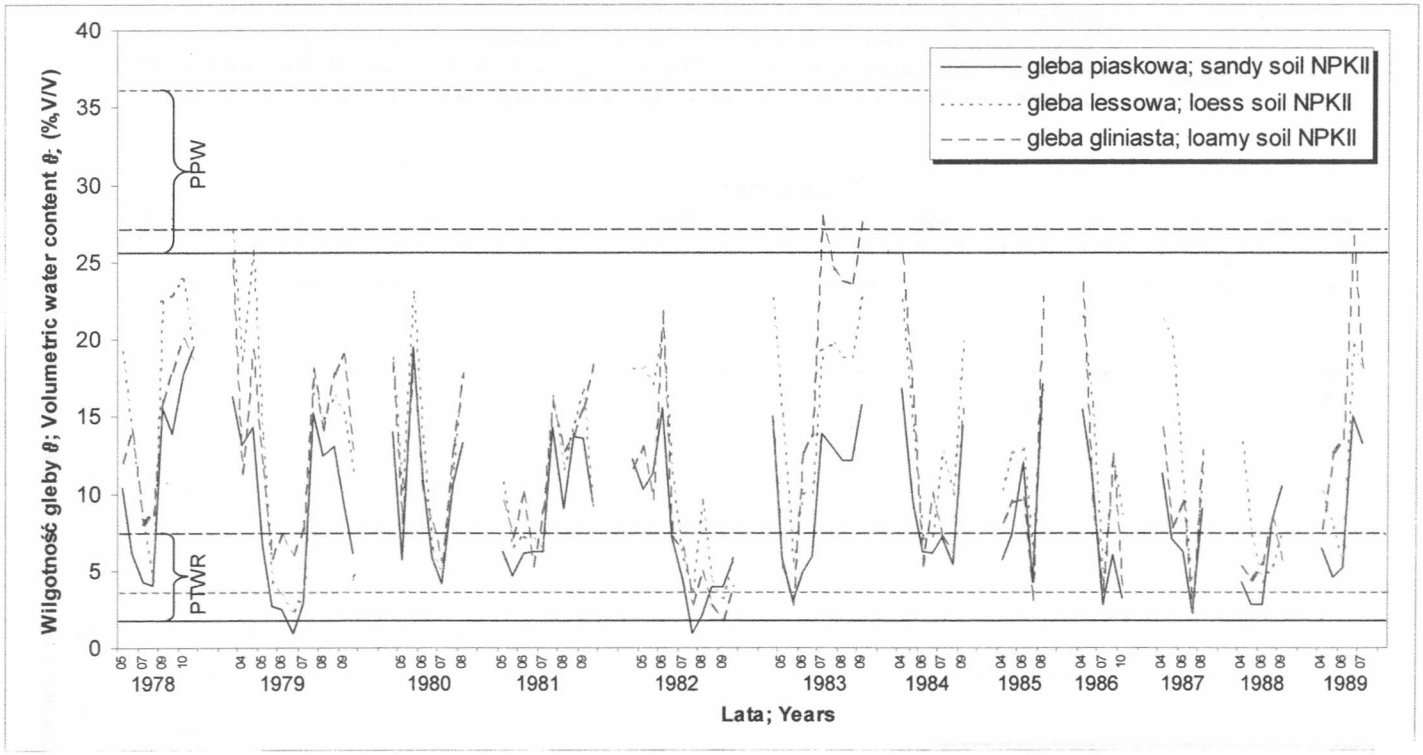
6.1.2. Dynamika uwilgotnienia gleb w zależności od poziomu nawożenia mineralnego

Uzyskane wyniki wskazują, że wzrost dawek NPK w przypadku badanych gleb zmniejszał ich uwilgotnienie. Nawożenie mineralne NPK w istotny sposób różnicowało stan uwilgotnienia gleb, przy czym poszczególne gatunki gleb reagowały różnie na wzrost poziomu nawożenia. Analiza wariancji wykazała istotny wpływ wzrastających dawek nawożenia NPK na uwilgotnienie badanych gleb (tab. 11 i 12).

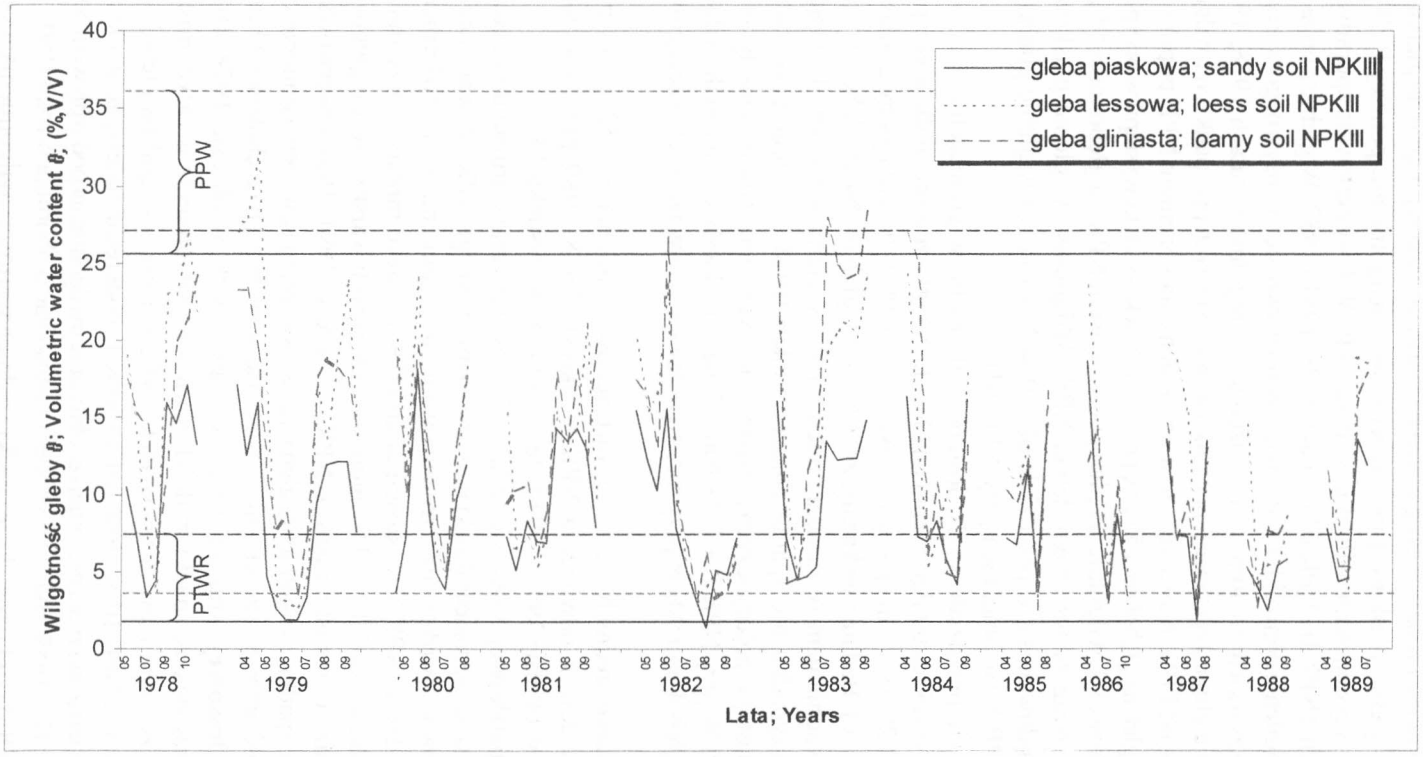
Dynamikę zmian uwilgotnienia gleb w warstwie ornej za lata 1978–1989 przedstawiono na rysunkach 10-12. Przyjmując ilość wody dostępnej dla roślin przy pF 2,0–4,2 w warstwie 0–30 cm, odpowiadające uwilgotnieniu w glebie piaskowej 25,8–2,6% (v/v), w glebie lessowej 36,1–4,5% (v/v) i w glebie gliniastej 27,7–7,6% (v/v), widać wyraźnie, że wzrost nawożenia NPK obniżył uwilgotnienie gleb, w tym szczególnie gleby nienawadnianej. Obniżenie wilgotności w warstwie ornej poniżej punktu trwałego więdnięcia (PTWR) stwierdzono w przypadku gleby piaskowej w suchych latach 1979 i 1982 przy dawce NPK II. W glebie lessowej uwilgotnienie niższe od PTWR w tych latach zanotowano sporadycznie przy NPK III. W glebie gliniastej uwilgotnienie poniżej PTWR wystąpiło przy wszystkich dawkach NPK, szczególnie w roku 1982. W roku tym przez długi okres czasu (VII–X) w obiektach nienawadnianych wilgotność gleby gliniastej w strefie powierzchniowej spadała do wartości niższych od punktu trwałego więdnięcia roślin. Uprawiane w tym czasie ziemniaki przetrwały tylko dlatego, że stan ten nie dotyczył głębokości powyżej 30 cm, w której wilgotność gleby była znacznie większa, dzięki wodzie zretencjonowanej we wcześniejszym okresie bogatym w opady.



Rys. 10. Dynamika uwilgotnienia gleb na głębokości 30 cm przy pierwszym poziomie nawożenia (NPK I)
Linie poziome wskazują wartość polowej pojemności wodnej (PPW) oraz punktu trwałego więdnięcia roślin (PTWR)
Dynamics of soil water content at a depth of 30 cm for the first level of fertilization (NPK I)
Horizontal lines show the values of field capacity (PPW) and permanent wilting point (PTWR)



Rys. 11. Dynamika uwilgotnienia trzech gleb na głębokości 30 cm przy drugim poziomie nawożenia (NPK II)
Linie poziome wskazują wartość polowej pojemności wodnej (PPW) oraz punktu trwałego więdnięcia roślin (PTWR)
Dynamics of soil water content at a depth of 30 cm for the second level of fertilization (NPK II)
Horizontal lines show the values of field capacity (PPW) and permanent wilting point (PTWR)



Rys. 12. Dynamika uwilgotnienia gleb na głębokości 30 cm przy trzecim poziomie nawożenia (NPK III)
Linie poziome wskazują wartość polowej pojemności wodnej (PPW) oraz punktu trwałego więdnięcia roślin (PTWR)
Dynamic of soil water content at a depth of 30 cm for the third level of fertilization (NPK III)
Horizontal lines show the values of field capacity (PPW) and permanent wilting point (PTWR)

Podobne zjawisko w badanych glebach bez nawadniania wystąpiło na głębokości 55 cm. W glebie piaskowej nie stwierdzono uwilgotnienia poniżej PTWR. W glebie lessowej obniżenie wilgotności poniżej PTWR występowało sporadycznie w obiektach z NPK II i NPK III w latach 1979, 1981 i 1982. W glebie gliniastej spadek uwilgotnienia poniżej PTWR stwierdzono w okresie intensywnego wzrostu roślin przy wszystkich poziomach nawożenia, szczególnie w latach 1978, 1981 i 1982. W glebie gliniastej stwierdzono tylko w pojedynczych przypadkach uwilgotnienie większe od PPW. Nawadnianie w obiektach z nawożeniem NPK poprawiło uwilgotnienie gleb na głębokości 55 cm, przy czym większy efekt wystąpił w przypadku gleby piaskowej. Uwilgotnienia gleb pod wpływem NPK na głębokości 55 cm zmniejsza się wraz ze wzrostem dawki NPK. Wilgotność w glebie piaskowej i lessowej znajdowała się w przedziale pF 2,0–4,2, natomiast w glebie gliniastej przekraczała PPW (w obiektach przy NPK III).

Na podstawie przedziału wody dostępnej dla roślin w granicach pF 2,0–4,2 stwierdzono, że zakres uwilgotnienia na głębokości 90 cm wynosił dla gleby piaskowej 25,2–2,2% (v/v), dla gleby lessowej 31,8–7,1% (v/v) i dla gleby gliniastej 37,7–18,0% (v/v). Badania wykazały, że wilgotność gleb w obiektach bez nawadniania i z nawadnianiem w zasadzie mieściła się w granicach wody dostępnej. W żadnym przypadku nie spadła poniżej punktu trwałego więdnięcia roślin. W glebie gliniastej w pojedynczych przypadkach stwierdzono wartości uwilgotnienia powyżej PPW przy NPK II + H_2O. Nawadnianie najbardziej poprawiło wilgotność gleb na głębokości 90 cm przy niższych dawkach nawozowych, szczególnie przy NPK I.

Zróżnicowanie średnich rocznych wartości uwilgotnienia (n=252) pod wpływem wzrostu dawek nawożenia NPK w okresie 1978–1989 przedstawiono w tabeli 13, a w okresie 1991–1994 w tabeli 14 oraz na rysunku 13.

W glebie piaskowej w okresie badań 1978-1989 średnie wartości uwilgotnienia malały wraz ze wzrostem dawki nawożenia mineralnego NPK. W warstwie do 30 cm gwałtowne, bardzo silne zróżnicowanie uwilgotnienia gleb stwierdzono w przypadku dawki NPK II w stosunku do NPK I i nieco mniejsze przy dawce NPK III w stosunku do NPK I. Uwilgotnienie głębszych warstw profilu glebowego malało wraz ze wzrostem dawek NPK. W okresie 1991–1994 obserwowano nieco mniejsze spadki uwilgotnienia gleb wraz ze wzrostem nawożenia mineralnego NPK (zależność liniowa), szczególnie w warstwie najgłębszej na głębokości 90 cm.

W glebie lessowej wraz ze wzrostem dawki NPK w okresie 1978–1989, stwierdzono największe spadki średnich wartości uwilgotnienia w całym profilu glebowym, przy czym największy spadek uwilgotnienia wystąpił na głębokości 90 cm przy dawce NPK III w stosunku do NPK I. Podkreślić należy, że w okresie 1991–1994 stwierdzono znacznie mniejsze obniżanie uwilgotnienia pod wpływem NPK niż w okresie 1978–1989. Było to wynikiem zastosowania obornika w roku 1991.

W glebie gliniastej największe spadki średnich wartości uwilgotnienia występowały przy dawce NPK II i nieco niższe przy NPK III w stosunku do NPK I

Tabela 13

Różnice średnich rocznych wartości uwilgotnienia gleb Δθ (%, v/v) pod wpływem dawek NPK w okresie 1978–1989
Differences in the year mean water contents of soils, Δθ (%, v/v) as influenced by fertilization level NPK in the years 1978–1989

Gleba Soil	Głębokość Depth (cm)	Δθ dla nawożenia for fertilization NPK	Δθ (%, v/v)												Δθ (%, v/v) $\bar{x}$ 1978–1989
			1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	
Piaskowa	30	II - I*	0,0	-1,1	-1,4	-1,2	-1,1	-1,2	-1,9	-1,2	-1,6	-1,5	-1,5	-2,0	-1,3
Sandy		III - I**	0,2	-1,1	-1,5	-1,0	-0,8	-1,2	-2,3	-1,1	-1,7	-0,7	-1,4	-2,3	-1,2
Lessowa		II - I	-1,1	-0,7	-1,8	-2,2	-0,1	-1,0	-2,6	-1,6	-3,3	0,5	-3,5	-2,3	-1,7
Loess		III - I	-0,3	0,4	-2,9	-2,2	-1,2	-2,1	-4,3	-3,9	-4,7	-0,5	-4,0	-3,4	-2,4
Gliniasta		II - I	-3,9	-2,8	-4,0	-2,8	-1,6	-4,3	-3,2	-2,3	-0,4	-0,9	-1,8	0,1	-2,3
Loamy		III - I	-0,7	-1,0	-2,5	-0,9	1,4	-2,6	-1,6	-0,8	-0,4	1,2	0,7	-1,6	-0,7
Piaskowa	55	II - I	-1,3	-0,3	-3,2	-1,6	-0,6	-2,3	-2,2	-2,3	-1,8	-0,9	-3,0	-2,3	-1,8
Sandy		III - I	-1,2	0,1	-3,0	-2,4	-0,7	-3,0	-3,9	-3,1	-2,2	-1,5	-4,0	-2,7	-2,3
Lessowa		II - I	-1,6	-1,7	-2,4	-5,1	-1,6	-2,5	-4,1	-3,5	-2,8	-1,4	-5,1	-3,4	-2,9
Loess		III - I	-1,4	-1,9	-4,7	-4,5	-3,6	-4,3	-6,2	-5,1	-4,0	-2,7	-6,6	-4,2	-4,1
Gliniasta		II - I	-1,0	-1,1	-1,7	-2,8	-1,7	-2,0	-3,3	-0,7	-1,7	-1,9	-5,2	1,3	-1,8
Loamy		III - I	-0,4	-0,9	-2,2	-2,6	-1,1	-2,3	-3,5	-0,4	-1,5	-1,5	-3,3	-0,5	-1,7
Piaskowa	90	II - I	-1,6	-0,5	-3,9	-2,4	-1,7	-2,2	-2,4	-2,6	-1,7	-2,0	-3,5	-1,1	-2,1
Sandy		III - I	-1,8	-0,2	-4,5	-3,2	-2,5	-3,3	-4,6	-4,3	-3,7	-3,2	-5,1	-2,0	-3,2
Lessowa		II - I	-2,0	-1,1	-4,0	-5,0	-3,8	-3,9	-1,6	-1,5	-5,7	-2,7	-6,2	-3,9	-3,4
Loess		III - I	-1,9	-0,8	-6,7	-4,4	-4,3	-4,9	-4,3	-3,9	-6,0	-3,4	-7,2	-5,5	-4,5
Gliniasta		II - I	-0,5	-1,3	-2,9	-2,4	-0,4	-3,9	-2,4	-0,2	-2,3	-1,5	-3,9	-1,4	-1,9
Loamy		III - I	0,2	-1,6	-2,8	-2,3	-0,5	-3,6	-2,6	-1,3	-0,9	-1,1	-3,4	-0,6	-1,7

* Δθ (%, v/v) = θ NPK II - θ NPK I
** Δθ (%, v/v) = θ NPK III - θ NPK I

Tabela 14

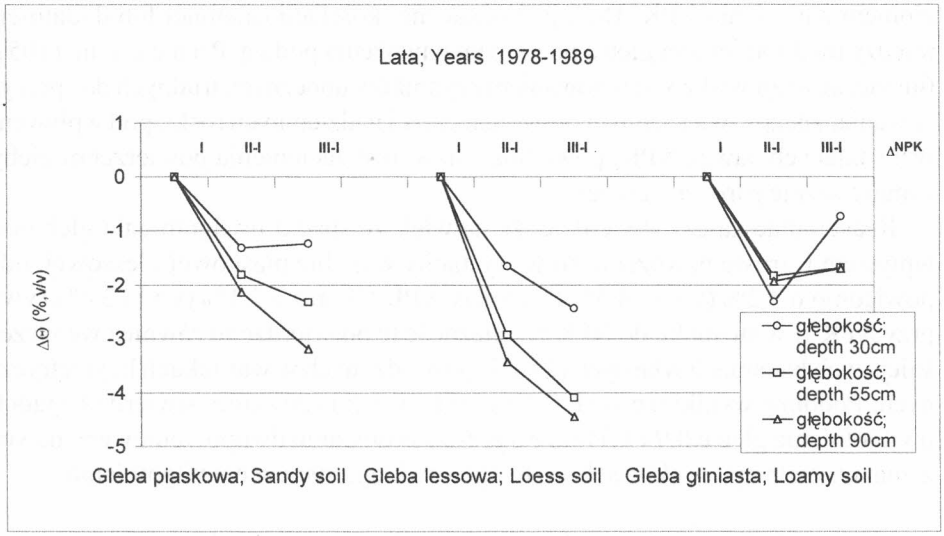
Różnice średnich rocznych wartości uwilgotnienia gleb $\Delta\theta$ (%, v/v) pod wpływem dawek NPK w okresie 1991–1994
Differences in the mean year water contents, $\Delta\theta$ (%, v/v) as influenced by fertilization level NPK in the years 1991–1994

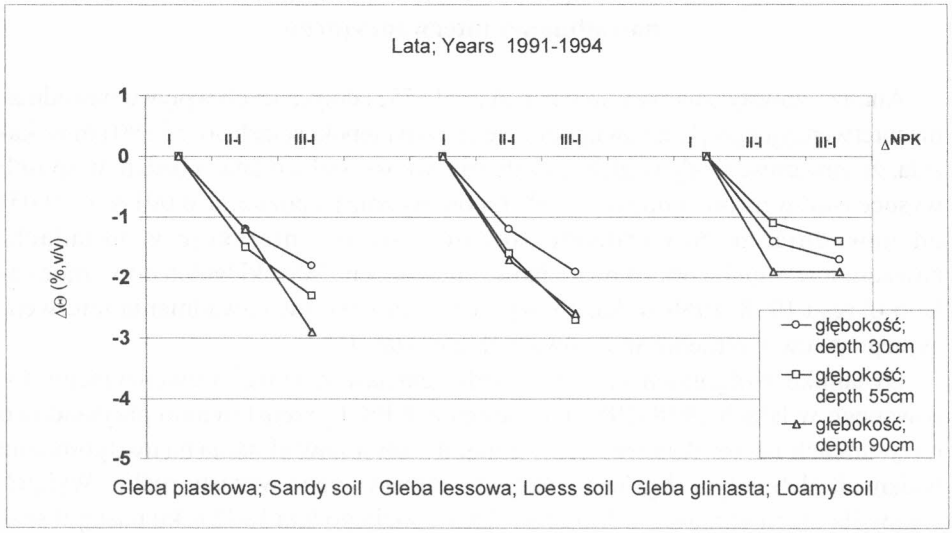
Gleba Soil	Głębokość Depth (cm)	$\Delta\theta$ dla nawożenia for fertilization NPK	$\Delta\theta$ (%, v/v) 1991	1992	1993	1994	$\Delta\theta$ (%, v/v) $\bar{x}$ 1991–1994
Piaskowa	30	II - I*	-0,1	-1,7	-0,8	-2,3	-1,2
Sandy		III - I**	-0,4	-2,4	-1,3	-3,2	-1,8
Lessowa		II - I	-0,5	-0,8	-1,6	-1,8	-1,2
Loess		III - I	-1,3	-1,1	-1,9	-3,4	-1,9
Gliniasta		II - I	-0,9	-1,0	-1,1	-2,5	-1,4
Loamy		III - I	-0,7	-1,9	-1,6	-2,4	-1,7
Piaskowa	55	II - I	0,8	-3,1	-1,6	-2,1	-1,5
Sandy		III - I	0,6	-3,5	-2,3	-4,0	-2,3
Lessowa		II - I	-0,7	-1,6	-2,1	-2,1	-1,6
Loess		III - I	-2,3	-3,1	-2,3	-3,1	-2,7
Gliniasta		II - I	0,2	-1,6	-1,2	-1,9	-1,1
Loamy		III - I	0,3	-1,3	-2,3	-2,3	-1,4
Piaskowa	90	II - I	-0,7	-1,9	-0,3	-1,9	-1,2
Sandy		III - I	-1,5	-3,4	-2,1	-4,7	-2,9
Lessowa		II - I	-1,0	-2,8	-2,3	-0,8	-1,7
Loess		III - I	-2,1	-2,7	-2,6	-3,1	-2,6
Gliniasta		II - I	-1,2	-2,5	-2,1	-1,7	-1,9
Loamy		III - I	-1,1	-2,1	-2,7	-1,6	-1,9

*, ** patrz tab. 13; see tab. 13

w całym profilu. W okresie 1978–1989 obserwowano najmniejsze obniżenie uwilgotnienia tej gleby przy NPK I w górnej warstwie 30 cm. Również w pozostałych badanych warstwach w obydwu okresach (za lata 1978–1989 i 1991–1994) zwiększenie dawki nawożenia mineralnego NPK powodowało spadek wilgotności gleb.

Dane literaturowe potwierdzają efekt obniżania się uwilgotnienia przy wyższych dawkach nawożenia mineralnego. Niekorzystny wpływ wzrastających poziomów nawożenia na uwilgotnienie gleb stwierdzili stosując dwupoziomowe nawożenie Chmielewski (20), Chmielewski i Czyż (21), Czyż i Chmielewski (27) oraz Ruszkowska i in. (123). Również Doboszyński (30) wykazał, że wraz ze wzrostem dawki nawożenia mineralnego uwilgotnienie gleby obniżało się w sposób nieliniowy. Matuli Sarnacka (96) prowadząc badania przy uprawie ziemniaków nie zaobserwowali istotnej zależności między poziomem nawożenia NPK a kształtowaniem się uwilgotnienia gleb. Wzrost plonów ziemniaka o około 50% pod wpływem nawożenia mógł być spowodowany ekonomicznym wykorzystaniem wody. Opracowania literaturowe (19-22, 123) wskazują również na istnienie ujemnej korelacji między uwilgotnieniem gleb a po-





Rys. 13. Wpływ nawożenia NPK na kształtowanie się średnich wartości uwilgotnienia gleb Δθ (%, v/v) w okresie wegetacyjnym za lata 1978–1989 i 1991–1994
I – wartość uwilgotnienia gleb Δθ przy nawożeniu NPK I przyjęto za 0, (Δθ = 0);
II - I – różnica uwilgotnienia gleb Δθ nawożonych drugą i pierwszą dawką NPK (Δθ = θNPK II - θNPK I)
III - I – różnica uwilgotnienia gleb Δθ nawożonych trzecią i pierwszą dawką NPK (Δθ = θNPK III - θNPK I)
Effects of fertilization NPK on the differences in the mean water content, Δθ (%, v/v), for the growing seasons in the periods 1978–1989 and 1991–1994
I – water content for the first level (NPK I) gives Δθ = 0, by definition,
II - I – differences in water content between fertlization levels II and I, (Δθ = θNPK II - θNPK I),
III - I – differences in water content between fertlization levels III and I, (Δθ = θNPK III - θNPK I)

ziomem nawożenia NPK. Brak jednoznacznej korelacji (ujemnej lub dodatniej) między uwilgotnieniem gleb a poziomem nawożenia podają P a n e k i in. (105), tłumacząc to zjawisko występowaniem czynników ubocznych trudnych do sprecyzowania, jak np. zwiększonym rozwojem części nadziemnych roślin pod wpływem wzrastających dawek NPK, powodującym wzrost zacienienia powierzchni gleby i zmniejszenie parowania wody.

Reasumując należy stwierdzić, że największe spadki uwilgotnienia gleb pod wpływem wzrostu nawożenia NPK wystąpiły w glebie piaskowej i lessowej, odpowiednio o 3,2% (v/v) i 4,5% (v/v) przy NPK III oraz o 2,1% (v/v) i 3,4% (v/v) przy NPK II w stosunku do NPK I. Zależność tę potwierdzono również we wcześniejszych badaniach własnych (24-27) prowadzonych w warunkach lizymetrycznych. Podobne wyniki uzyskał C h m i e l e w s k i (20) który stwierdził spadek uwilgotnienia gleb o 0,9 i 3,4% (v/v) przy zastosowaniu dwupoziomowego nawożenia mineralnego, w okresach średniego i niskiego stanu ich uwilgotnienia.

6.1.3. Dynamika uwilgotnienia gleb w warunkach stosowania nawadniania interwencyjnego

Analiza statystyczna wyników badań (n=15552) dotyczących wpływu nawadniania interwencyjnego {I} na uwilgotnienie gleb na głębokościach 30, 55 i 90 cm wykazała, że zawartość wody w glebach zależała, we wszystkich latach badań, w sposób wysoce istotny na poziomie $\alpha \leq 0{,}001$ (sporadycznie na poziomie $0{,}001 \leq \alpha \leq 0{,}05$) od nawadniania. Stwierdzono również istotne interakcje w układach: nawadnianie × gleba oraz nawadnianie × nawożenie. Wyniki badań dotyczące całego okresu 1978–1989 wykazały wysoce istotny wpływ nawadniania interwencyjnego na uwilgotnienie analizowanych gleb (tab.15).

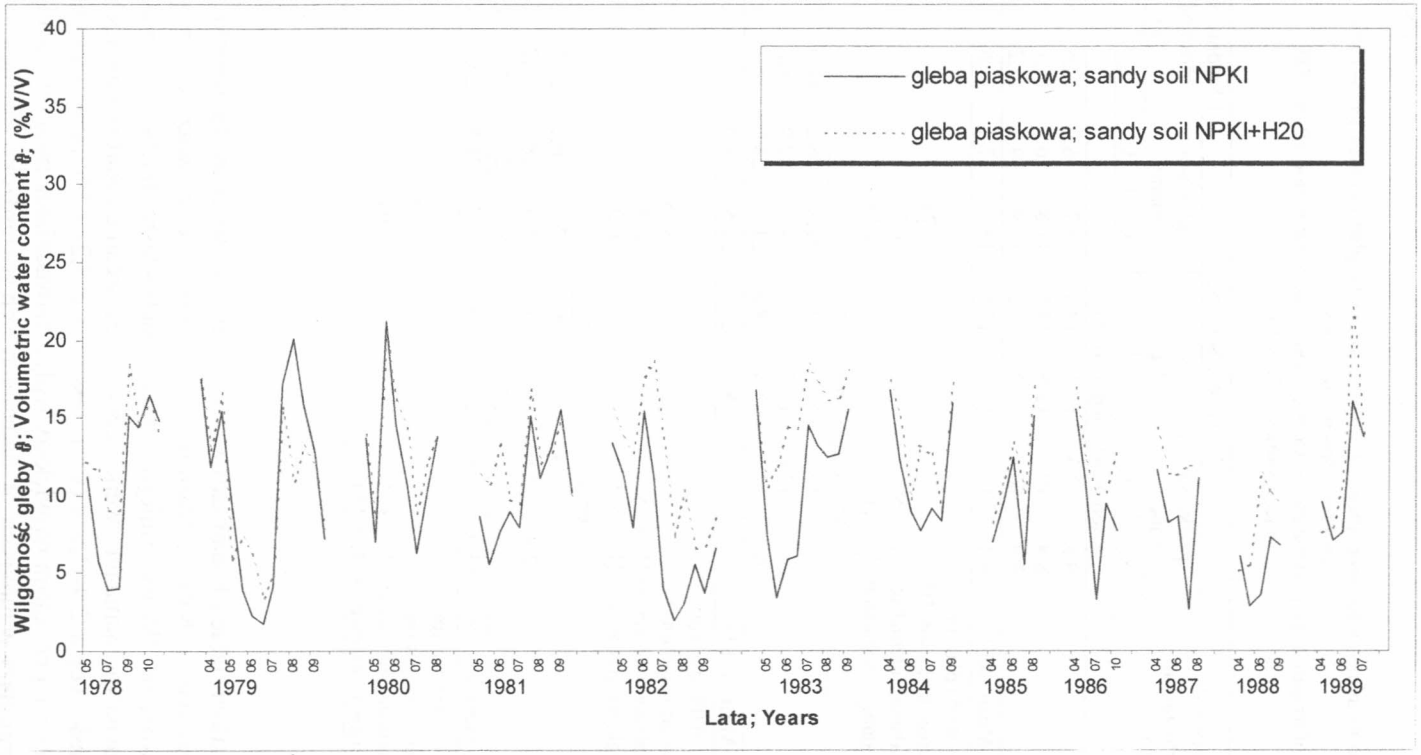
Dynamikę uwilgotnienia gleb pod wpływem nawadniania interwencyjnego stosowanego w latach 1978–1989 na wariancie NPK I przedstawiono przykładowo na rysunkach 14-16. Wysoce istotny dodatni wpływ nawadniania na uwilgotnienie badanych gleb dotyczył głównie okresów intensywnego wzrostu roślin. Wyjątek stanowiła gleba gliniasta, w której w okresie suchego lata 1982 roku nastąpił spadek uwilgotnienia w obiektach nawadnianych przy nawożeniu NPK I, w porównaniu z obiektami bez nawodnień. Średni spadek wilgotności dla całego okresu tego roku 1982 wyniósł 1,4% (v/v) na głębokości 30 cm (rys. 16). W pojedynczych przypadkach stwierdzono również na glebie gliniastej w roku 1982 obniżenie uwilgotnienia w warunkach nawadniania interwencyjnego przy dawce NPK II. Generalnie jednak, przy wyższych poziomach nawożenia (NPK II i NPK III) zastosowanie nawadniania interwencyjnego w tym samym okresie w roku 1982 podwyższyło średnią roczną wartość uwilgotnienia tej gleby na głębokości 30 cm odpowiednio o 6,3% (v/v) i o 7,6% (v/v). Silny spadek uwilgotnienia gleby gliniastej przy nawożeniu NPK II stwierdzili również C z y ż i C h m i e l e w s k i (27) w badaniach lizymetrycznych. Autorzy ci uważają, że dla gleb gliniastych przy niedoborze wody w glebie i braku możliwości stosowania nawodnień, wysokie dawki NPK III mogą łagodzić i zmniejszać przesuszenie gleb.

Tabela 15

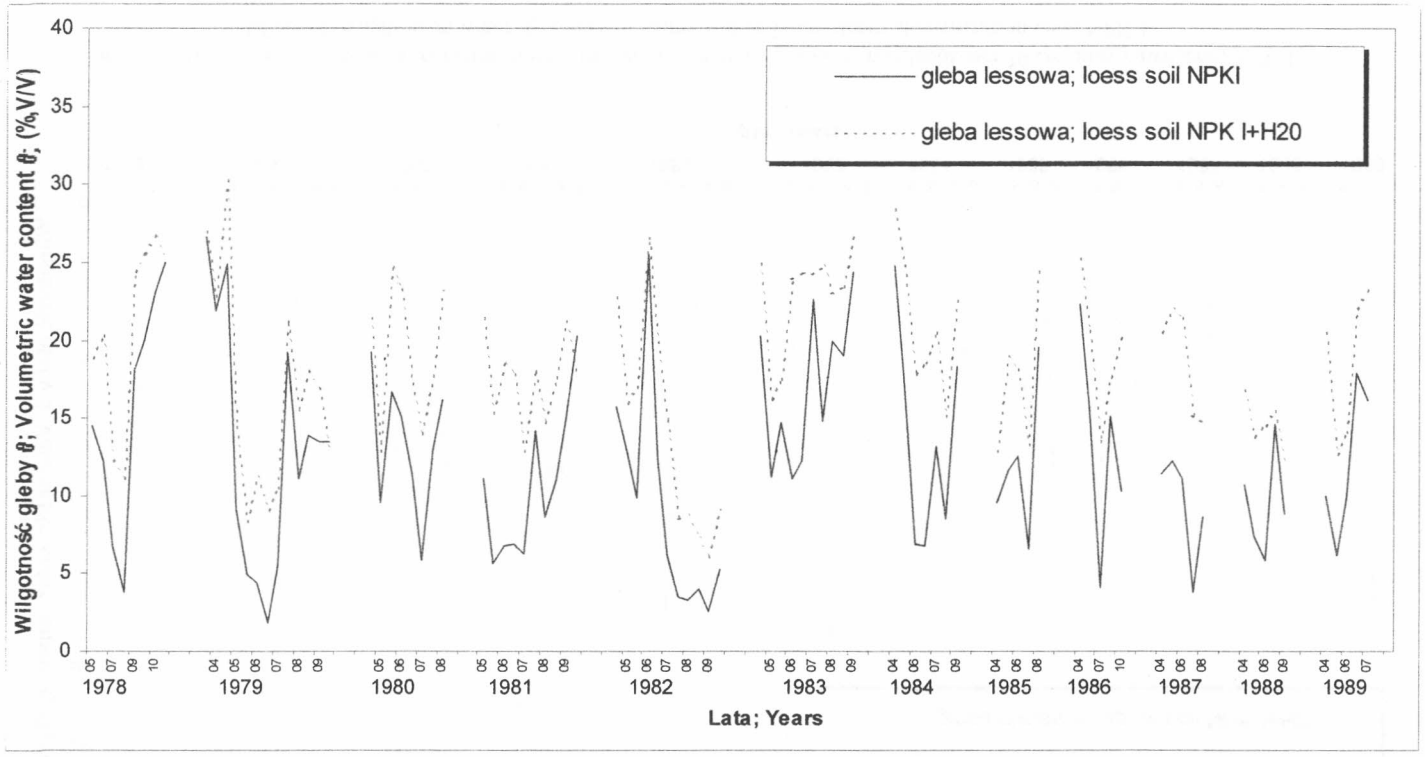
Wpływ nawadniania interwencyjnego {I_1} na uwilgotnienie gleb za okres 1978–1989
(wartości średnie w %, v/v)
Effect of irrigation {I_1} on the mean water content of soils for period 1978–1989
(mean values in %, v/v)

Nawożenie NPK NPK Fertilization {F}	Gleba; Soil {S}						Średnia NPK Mean NPK {F}	
	piaskowa sandy		lessowa loess		gliniasta loamy			
	I_o	I_1	I_o	I_1	I_o	I_1	I_o	I_1
Głębokość; Depth 30 cm								
NPK I	9,8	12,3	12,4	18,4	15,7	16,9	12,6	15,9
NPK II	8,8	10,7	12,6	14,9	11,8	16,1	11,1	13,9
NPK III	8,9	10,8	12,7	13,2	11,9	19,2	11,2	14,4
Średnia gleby; Mean soil {S}	9,1	11,2	12,6	15,5	13,1	17,4	11,6	14,7
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
nawadniania; irrigation {I}					0,73			
współdziałania; interaction {I} x {S}					1,26			
współdziałania; interaction {I} x {F}					1,51			
Głębokość; Depth 55 cm								
NPK I	12,2	15,2	20,2	24,4	21,7	26,2	18,0	21,9
NPK II	10,9	12,8	17,7	21,1	21,3	22,9	16,6	18,9
NPK III	10,2	12,5	17,6	18,8	21,5	23,0	16,4	18,1
Średnia gleby; Mean soil {S}	11,1	13,5	18,5	21,4	21,5	24,0	17,0	19,6
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
nawadniania; irrigation {I}					0,58			
współdziałania; interaction {I} x {S}					1,00			
współdziałania; interaction {I} x {F}					1,20			
Głębokość; Depth 90 cm								
NPK I	14,4	17,8	22,5	26,7	27,7	30,2	21,5	24,9
NPK II	12,9	15,0	18,9	23,5	25,9	28,1	19,2	22,2
NPK III	11,8	14,0	20,1	20,3	26,7	27,9	19,5	20,7
Średnia gleby; Mean soil {S}	13,0	15,6	20,5	23,5	26,7	28,8	20,1	22,6
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
nawadniania; irrigation {I}					0,60			
współdziałania; interaction {I} x {S}					1,04			
współdziałania; interaction {I} x {F}					1,25			

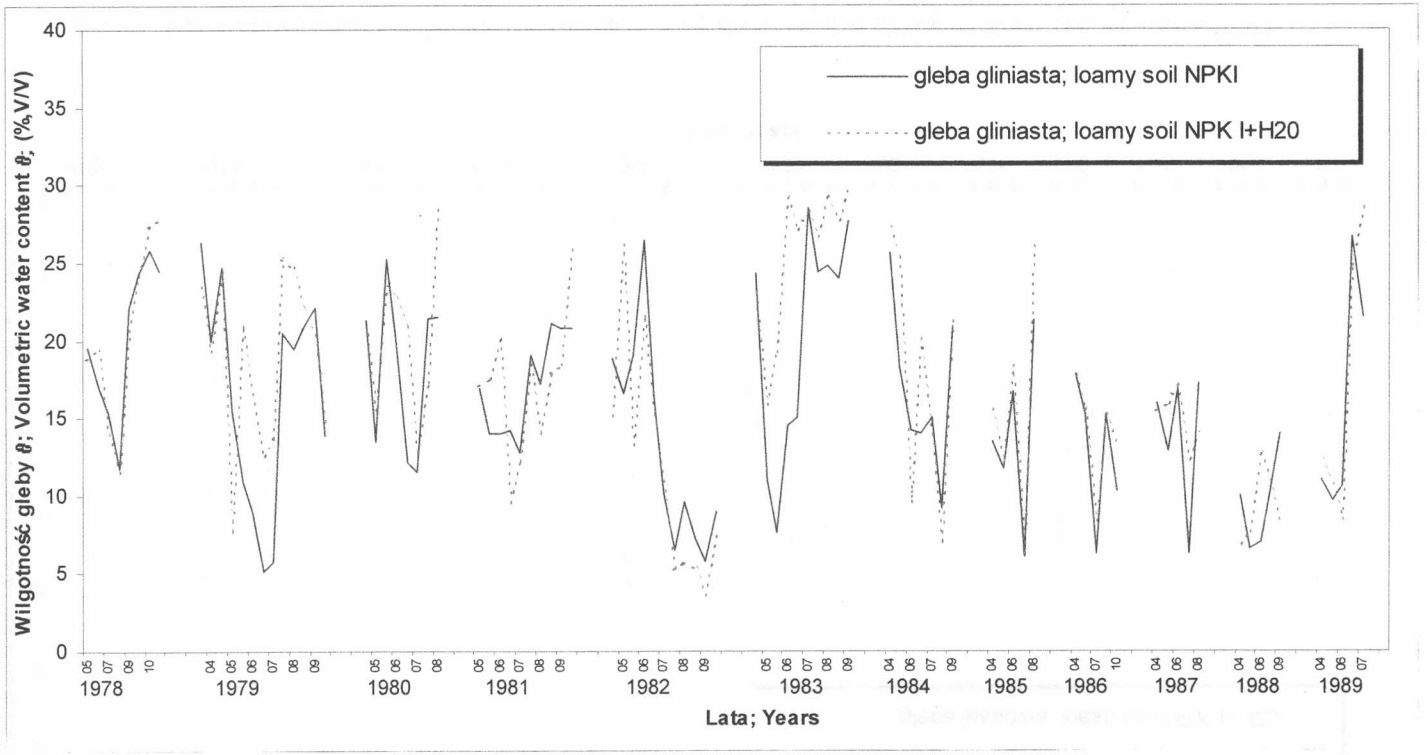
We wszystkich latach badań najwyższe średnie wartości uwilgotnienia gleb uzyskano przy dawce NPK I. Wartości te z reguły spadały wraz ze wzrostem poziomu nawożenia. We wcześniejszych badaniach własnych (24, 25) uzyskano pod wpływem nawadniania interwencyjnego wzrost średnich wartości uwilgotnienia gleb: piaskowej o 2,4–2,9% (v/v), lessowej o 3,2–3,3% (v/v) i gliniastej o 2,1–4,5% (v/v), przy czym największy wpływ nawadnianie miało w latach suchych, a najmniejszy w mokrych. W badaniach tych stwierdzono również istotną zależność uwilgotnienia gleb od poziomu nawożenia mineralnego i nawadniania interwencyjnego.



Rys. 14. Wpływ nawadniania na różnicowanie się uwilgotnienia gleby piaskowej na głębokości 30 cm przy nawożeniu NPK I
Effect of irrigation on water dynamics in sandy soil at 30 cm depth at fertilization level NPK I



Rys. 15. Wpływ nawadniania na różnicowanie się uwilgotnienia gleby lessowej na głębokości 30 cm przy nawożeniu NPK I
Effect of irrigation on water dynamics in loess soil at 30 cm depth at fertilization level NPK I



Rys. 16. Wpływ nawadniania na różnicowanie sie uwilgotnienia gleby gliniastej na głębokości 30 cm przy nawożeniu NPK I
Effect of irrigation on water dynamics in loamy soil at 30 cm depth at fertilization level NPK I

Średnie wartości uwilgotnienia gleb w obiektach bez nawadniania i z nawadnianiem w ciągu 12 lat badań przedstawiono na rysunkach 14-16. W obiektach bez nawadniania najniższe średnie wartości uwilgotnienia wykazała gleba piaskowa, wyższe gleba gliniasta, a najwyższe gleba lessowa. Również w obiektach z nawadnianiem uwilgotnienie gleb wzrosło, we wszystkich latach badań, w tej samej kolejności: gleba piaskowa < gleba gliniasta < gleba lessowa. T r y b a ł a i M a ł k i e w i c z (158) nawadniając piasek gliniasty mocny dawką 30 mm uzyskali wzrost wilgotności gleb we wszystkich latach badań, niezależnie od ilości opadów.

W badaniach własnych nawadnianie interwencyjne stosowane w okresie intensywnego wzrostu roślin (maj–lipiec), najbardziej łagodziło negatywne skutki słabego uwilgotnienia gleb. Nawadnianie w tym okresie jest zatem najbardziej efektywne. W obiektach z nawadnianiem dynamika uwilgotnienia gleb była zróżnicowana i zależała od gatunku gleby, dawki NPK oraz głębokości profilu glebowego; najniższe wartości stwierdzono w glebie piaskowej od 2,5 do 26,7% (v/v), większe w glebie lessowej od 3,6 do 40,6% (v/v) i gliniastej od 3,6 do 40,7% (v/v). Wraz z głębokością profilu glebowego, wartość uwilgotnienia wzrastała, stwierdzono w tym względzie korelację dodatnią (tab. 16).

Reakcja gleb na nawadnianie interwencyjne kształtowała się następująco:

– **przy poziomie nawożenia NPK I** (rys. 14-16) nawadnianie spowodowało wzrost uwilgotnienia wszystkich gleb. Wilgotność gleb mieściła się w zakresie wody dostępnej dla roślin w przedziale między PPW i PTWR. Wyjątek stanowiła tu gleba gliniasta, w której uwilgotnienie warstwy ornej (0–30 cm) obiektów z nawadnianiem w roku 1982 w pojedynczych pomiarach (kilka razy) było nieco niższe niż w obiektach bez nawadniania. Było to prawdopodobnie spowodowane większym niż w obiektach bez nawadniania pobraniem wody przez rośliny. W okresie ulewnych opadów w roku 1983 wilgotność tej gleby w obiektach z nawadnianiem była większa od PPW.

– **przy poziomie nawożenia NPK II** nawadnianie zwiększyło uwilgotnienie badanych gleb do zakresu wody dostępnej dla roślin uprawnych tj. między PPW i PTWR. Również w tych obiektach nawadnianie interwencyjne istotnie poprawiło uwilgotnienie wszystkich gleb.

– **przy poziomie nawożenia mineralnego NPK III** nawadnianie, podobnie jak przy dawkach NPK I i NPK II, istotnie zwiększyło uwilgotnienie gleb, a uzyskana wilgotność była zawsze większa od PTWR. W przypadku gleby gliniastej (sporadycznie po deszczu) stwierdzano w obiektach z nawadnianiem uwilgotnienie przekraczające PPW. Było to spowodowane wysoką wartością współczynnika przewodnictwa hydraulicznego k (θ) tej gleby, który wzrastał wraz ze wzrostem uwilgotnienia, osiągając wartość najwyższą w stanie maksymalnego nasycenia gleby wodą (29).

Uzyskane dane wskazują, że na glebie piaskowej w roku 1979 i tylko w pojedynczych przypadkach na glebie gliniastej (w latach 1979, 1981, 1982, 1984) nastąpiło pogorszenie wilgotności gleb w obiektach z nawadnianiem na głębokości

Tabela 16

Zakresy uwilgotnienia % (v/v) gleb w obiektach bez nawadniania {I_0}i z nawadnianiem {I_1} pod roślinami i na ugorze
Range of water content % (v/v) of soils in no irrigation{I_0} and irrigation treatments {I_1} under plants and fallow

Gleba Soil	Nawożenie Fertilization	Głębokość; Depth						Lata; Years 1978–1989	
		30 cm		55 cm		90 cm			
		{I_0}	{I_1}	{I_0}	{I_1}	{I_0}	{I_1}	{I_0}	{I_1}
Piaskowa Sandy	NPK I	1,7–21,2	3,4–22,1	3,1–20,5	3,0–25,3	3,7–24,6	9,5–26,7	1,7–24,6	3,0–26,7
	NPK II	0,9–19,5	3,2–21,7	2,1–20,2	3,3–20,3	2,6–23,6	4,1–26,0	0,9–23,6	3,2–26,0
	NPK III	1,3–18,7	2,7–21,4	2,8–22,1	2,5–23,4	3,0–23,3	4,1–24,4	1,3–23,3	2,5–24,4
	Ugór; Fallow	8,2–26,0		14,9–25,7		19,2–41,8		8,2–41,8	
Lessowa Loess	NPK I	1,9–26,7	6,1–30,3	9,–32,2	10,9–36,5	10,9–35,6	10,9–36,4	1,9–35,6	6,1–36,5
	NPK II	2,4–27,0	3,9–29,3	7,5–31,4	10,2–32,0	8,5–34,0	11,7–33,0	2,4–34,0	3,9–33,0
	NPK III	2,7–32,2	3,6–27,8	8,5–32,1	9,7–33,2	10,3–35,1	9,4–40,6	2,7–35,1	3,6–40,6
	Ugór; Fallow	4,8–33,1		11,4–7,0		16,2–40,5		4,8–40,5	
Gliniasta Loamy	NPK I	5,2–28,5	3,6–29,9	12,2–32,2	6,5–4,1	16,7–39,3	20,5 – 38,2	5,1–39,3	3,6–38,2
	NPK II	1,8–27,9	3,8–27,8	11,1–32,7	14,2–33,0	17,4–36,6	18,7 – 40,7	1,8–36,6	3,8–40,7
	NPK III	2,2–28,3	9,5–29,3	12,1–34,5	14,1–32,9	15,2–38,0	16,6 – 37,4	2,2–38,0	9,5–37,4
	Ugór; Fallow	12,7–36,6		17,2–38,7		17,4–44,7		12,7–44,7	

30 cm. Również w warstwach głębszych, w okresach silnego przesuszania nawadnianie może powodować zmniejszenie zawartości wody w glebie w wyniku niezbyt ekonomicznego jej wykorzystywania przez rośliny. Po zaprzestaniu nawadniania interwencyjnego obserwowano we wszystkich przypadkach spadek wilgotności gleb w porównaniu ze stanem istniejącym w glebach obiektów w ogóle nie nawadnianych. Również C h m i e l e w s k i (20) w badaniach modelowych stwierdził duży spadek, o 2,3–3,0% (v/v), uwilgotnienia gleb obiektów z intensywnym nawożeniem w stosunku do kontrolnych, po zaprzestaniu ich nawadniania. Wcześniejsze badania własne (22) wskazują na potrzebę nawadniania gleb lekkich gwałtownie przesuszonych wyłącznie dużymi dawkami wody. Małe dawki wody spowodować mogą dalsze pogorszenie (obniżenie) uwilgotnienia gleb. Przy niedostatku wody lepiej w takich sytuacjach wstrzymać się z nawadnianiem gleb (swoisty paradoks) do czasu dysponowania dostateczna ilością wody.

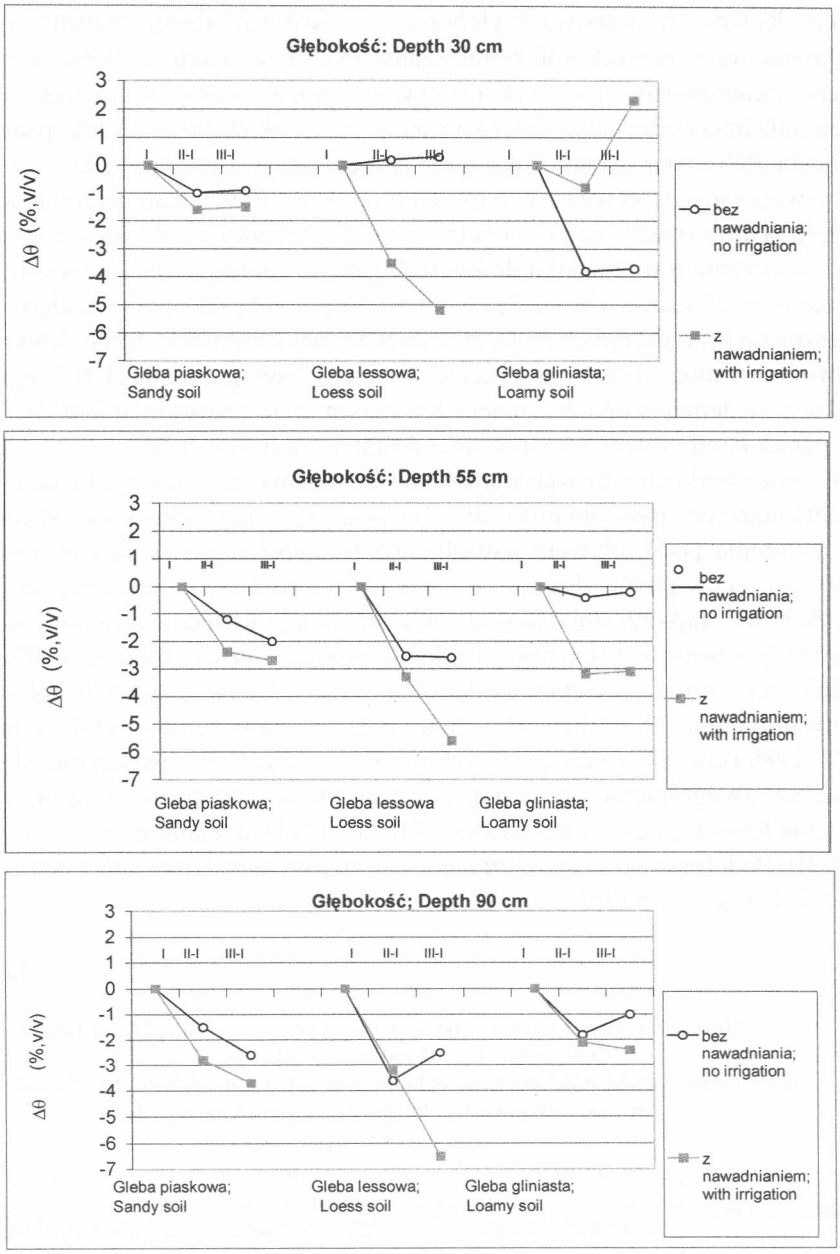
Różnice średnich rocznych wartości uwilgotnienia gleb między obiektami z nawadnianiem i bez nawadniania (tab. 17) wskazują, że największy wzrost wartości uwilgotnienia pod wpływem nawadniania wystąpił w glebie lessowej średnio o 3,0% (v/v) i w glebie gliniastej o 2,9% (v/v), a najniższy – w glebie piaskowej o 2,4% (v/v). Najkorzystniej nawadnianie przy wszystkich dawkach NPK wpłynęło na uwilgotnienie 0–30 cm warstwy gleby gliniastej – wzrost średnio o 4,25% (v/v).

Różnice wartości średnich uwilgotnienia gleb $\Delta\theta$ (%, v/v) między obiektami z nawadnianiem $\{I_1\}$ i bez nawadniania $\{I_0\}$ z nawożeniem NPK w okresie 1978–1989 (tab. 17) wskazują, że nawadnianie poprawiło, niezależnie od dawki NPK, ich uwilgotnienie. Dużą poprawę warunków wilgotnościowych uzyskano w glebie lessowej nawożonej dawką NPK I i NPK II, a najmniejszą – nawożonej NPK III. Podobne wyniki uwilgotnienia warstwy ornej gleb uzyskali również K o p e ć i K o s t u c h (76).

Tabela 17

Różnice wartości średnich i zakresów uwilgotnienia gleb między obiektami z nawadnianiem i bez nawadniania w okresie 1978–1989
Differences in mean water contents and ranges of water content between irrigated $\{I_1\}$ and non-irrigated $\{I_0\}$ treatments in period 1978–1989
($\Delta\theta = \theta\{I_1\} - \theta\{I_0\}$)

Głębokość; Depth (cm)	Gleba; Soil		
	piaskowa; sandy	lessowa; loess	gliniasta; loamy
	$\Delta\theta$ średnia; mean % (v/v)		
30	2,11 0,7–2,4	2,98 1,5–3,4	4,25 3,1–7,3
55	2,38 0,9–4,2	2,94 0,8–6,4	2,51 1,5–3,5
90	2,58 0,5–4,8	3,00 0,5–5,6	2,02 0,2–3,8
Średnia; Mean	2,40 0,5–4,8	3,00 0,5–6,4	2,90 0,2–7,3



Rys.17. Zróżnicowanie względnych wartości średniego uwilgotnienia gleb Δθ (% v/v) pod wpływem nawadniania w obiektach z nawożeniem NPK między NPK II a NPK I i NPK III a NPK I w okresie 1978–1989 (I – wartość uwilgotnienia Δθ przy nawożeniu NPK I przyjęto za 0)
Effect of NPK fertilization (NPK II - NPK I) i (NPK III - NPK I) on differences in the mean water contents of soils, Δθ (% v/v), with and without irrigation for period 1978–1989 (I – water content of soil for NPKI gives Δθ = 0, by definition)

Największą poprawę uwilgotnienia, w ciągu 12 lat badań, uzyskano w glebie gliniastej przy dawce NPK III w warstwie do 30 cm, średnio o 7,3% (v/v). W niektórych suchych latach (1982) nawadnianie gleby gliniastej i lessowej nawożonych NPK zmniejszyło ich uwilgotnienie. Ś l u s a r c z y k i in. (152) w badaniach z wpływem nawożenia mineralnego i nawadniania stwierdzili natomiast, że na efekt nawadniania oprócz ilości i rozkładu opadów miał wpływ rodzaj gleby; największy był on jednak w glebie najlżejszej.

Kształtowanie się uwilgotnienia gleb obiektów bez nawadniania $\{I_0\}$ i z nawadnianiem $\{I_1\}$ w warunkach stosowanego nawożenia mineralnego NPK przedstawiono na rysunku 17. Uzyskane wyniki badań można podsumować następująco:

– **w glebie piaskowej** spadek uwilgotnienia pod wpływem nawadniania w obiektach z nawożeniem mineralnym między NPK II a NPK I ($\Delta\theta$ = θNPK II - - θNPK I), jak również między NPK III a NPK I ($\Delta\theta$ = θNPK III - θNPK I) zwiększył się wraz z głębokością w porównaniu z obiektami bez nawadniania;

– **w glebie lessowej** nawadnianie obniżyło 5-krotnie jej uwilgotnienie na głębokości 30 cm i 2-krotnie na głębokościach 55 i 90 cm między obiektami NPK III a NPK I i w nieco mniejszym stopniu między obiektami NPK II a NPK I. Spadek uwilgotnienia gleb miał charakter liniowy, proporcjonalny do dawki NPK;

– **w glebie gliniastej** w obiektach bez nawadniania, największe spadki uwilgotnienia wystąpiły na głębokości 30 cm, a najmniejsze – na 55 cm. Nawadnianie łagodziło niedobory wilgotności na głębokości 30 cm, zarówno przy nawożeniu NPK II, jak i przy nawożeniu NPK III. Na głębokości 55 cm nawadnianie spowodowało jednak spadek wilgotności w stosunku do obiektów bez nawadniania. Nawadnianie nie zmieniło istotnie uwilgotnienia gleby gliniastej na głębokości 90 cm między NPK II a NPK I, natomiast między NPK III a NPK I zmniejszyło ją dwukrotnie.

Porównując różnicowanie się uwilgotnienia $\Delta\theta$ (%, v/v) pod wpływem wzrostu nawożenia mineralnego (NPK II - NPK I) i (NPK III - NPK I) w obiektach bez nawadniania $\{I_0\}$ i z nawadnianiem $\{I_1\}$ dla okresu 1978–1989 (rys. 17), stwierdzono gwałtowne spadki wilgotności gleb, z wyjątkiem gleby gliniastej na głębokości 30 cm, w obiektach z nawadnianiem w stosunku do obiektów z nawożeniem NPK I bez nawodnień $\{I_0\}$. W glebie gliniastej przy poziomie nawożenia NPK III stwierdzono wzrost jej wilgotności o 2,3% (v/v) w stosunku do uwilgotnienia przy NPK I w obiekcie z nawadnianiem $\{I_1\}$. W obiektach bez nawodnień spadki uwilgotnienia gleb pod wpływem nawożenia mineralnego były z reguły najniższe przy dawce NPK I. Największe obniżenie uwilgotnienia gleb powodowały dawki NPK II i NPK III. W przypadku wszystkich gleb średnie wartości uwilgotnienia znajdowały się w przedziale wody dostępnej dla roślin.

6.1.4. Dynamika uwilgotnienia gleb w warunkach nawożenia obornikiem

W latach 1991–1994 w doświadczeniu uprawiano rośliny w czteroletnim zmianowaniu w obiektach z nawożeniem obornikiem, który zastosowano w roku 1991

w ilości 30 t/ha i corocznie NPK w dawkach NPK I, NPK II, NPK III (w stosunku wagowym 1:2:3), oraz z nawożeniem tylko NPK w dawkach NPK I, NPK II, NPK III.

W tabeli 18 porównano zakresy wilgotności odpowiadające przedziałowi wody dostępnej dla roślin przy pF 2–4,2 z zakresami wilgotności gleb uzyskanymi w latach 1991–1994. Podobnie jak wcześniej najniższe uwilgotnienie stwierdzono w glebie piaskowej (3,6–28,8% (v/v) i znacznie wyższe w glebie lessowej (4,4–36,6% (v/v) i gliniastej (11,9–40,5% (v/v). Przyjmując wyznaczony przedział wody dostępnej dla roślin w granicach pF 2–4,2 (tab. 18), nie stwierdzono na badanych głębokościach (30, 55 i 90 cm) zagrożenia dla roślin, związanego ze spadkiem wilgotności gleb w pobliże punktu trwałego więdnięcia roślin (PTWR). Stosunki wodne gleb w latach 1991–1994 można zatem określić jako właściwe, tj. nie zagrażające wegetacji roślin z racji niedoborów wody (19) czy też jej nadmiaru (144).

Interesujący jest fakt, że pod wpływem zastosowanego obornika, we wszystkich glebach stwierdzono wzrost dolnych wartości zakresów wilgotności (tab. 9, rys. 9), w porównaniu z latami 1978–1989 (tab. 8, rys.8). Jednak poprawa warunków wilgotnościowych w okresie intensywnego wzrostu roślin, tylko dla dolnych wartości tych zakresów nie wpłynęła istotnie na podwyższenie średnich wartości uwilgotnienia gleb i nie spowodowała istotnych różnic w plonowaniu roślin, prawdopodobnie z uwagi na powstanie warstw hydrofobowych w glebach po zastosowaniu obornika. Efekt ten uwidocznił się w przypadku gleby piaskowej i lessowej oraz znacznie słabiej (a nawet obserwowano jego brak) w przypadku gleby gliniastej. Dlatego zastosowanie obornika nieznacznie tylko poprawiło stosunki wodne

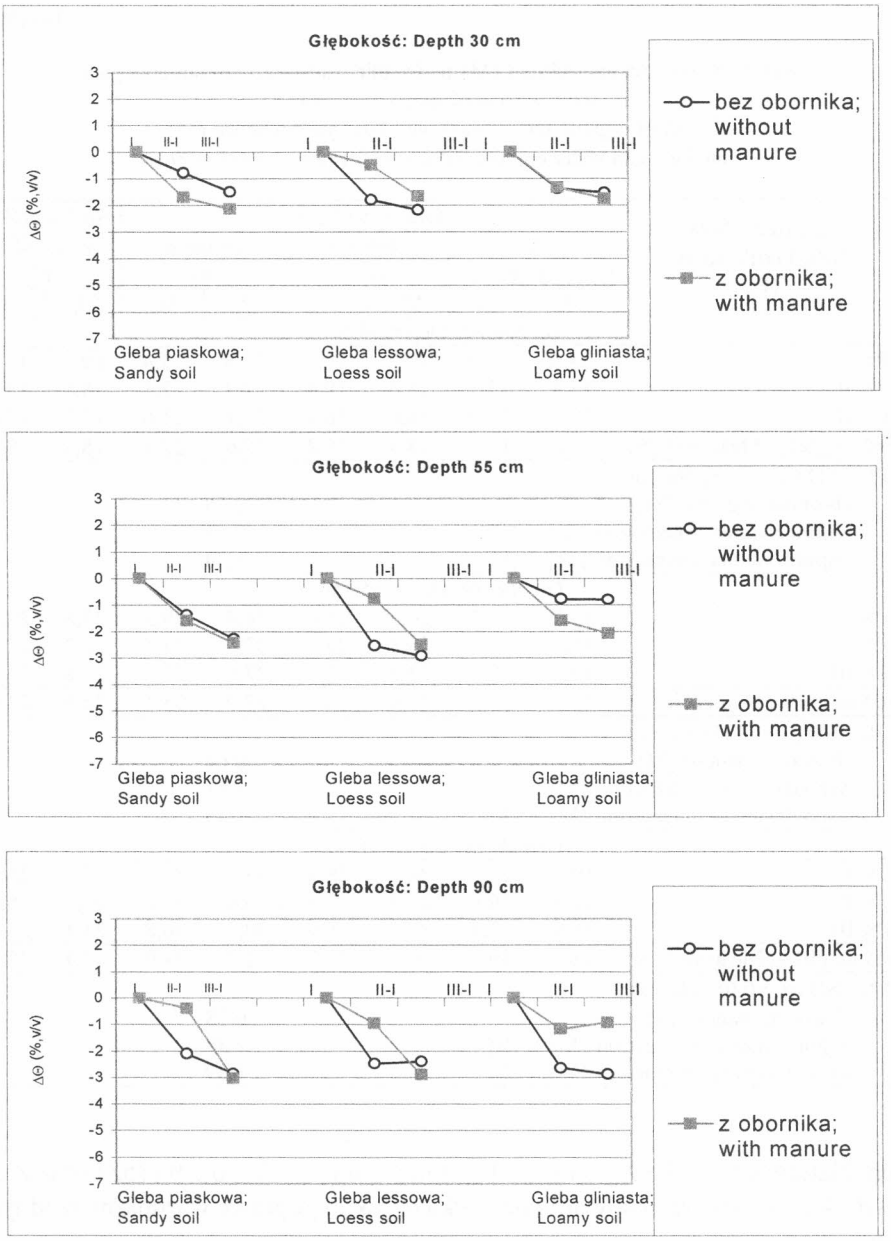
Tabela 18

Zakresy zawartości wody w glebach w okresie 1991–1994 oraz maksymalne i minimalne wartości uwilgotnienia dla przedziałów wody dostępnej dla roślin przy pF = 2–4,2
Ranges of volumetric water content of soils in the period 1991–1994 comparison of measured maximum and minimum values with values at field capacity and at the permanent wilting point pF = 2–4,2

Gleba; Soil	Przedziały wody dostępnej dla roślin (pF 2–4,2) Range of volumetric water (pF 2–4,2)		
	30 cm	55 cm	90 cm
Piaskowa Sandy	24,4–3,6* (25,8–2,6)**	24,6–4,3 (24,0–2,0)	28,8–5,0 (25,2–2,2)
Lessowa Loess	30,5–4,4 (36,1–4,5)	4,8–11,8 (34,8–12,1)	6,6–12,9 (31,8–7,1)
Gliniasta Loamy	32,1–11,9 (27,7–7,7)	36,6–16,7 (31,0–15,0)	40,5–20,5 (37,7–18,0)

* zmierzony zakres (maksymalny i minimalny) wilgotności gleb θ (% v/v); measured maximum and minimum water contents of soils θ (% v/v)

** woda dostępna dla roślin (% v/v) wyznaczona z krzywej pF = 2–4,2 (rys. 2 i 3); plant available water (volumetric water content between pF 2 and pF 4,2) obtained from the retention curves (fig. 2 i 3)



Rys. 18. Różnice względnych wartości średniego uwilgotnienia gleb Δθ (% v/v) zaistniałe pod wpływem nawożenia obornikiem między NPK II a NPK I i NPK III a NPK I w okresie 1991–1994 (I – wartość uwilgotnienia Δθ przy NPK I przyjęto za 0)

Effects of mineral fertilization NPK (II-I) i NPK (III-I) on the differences in the mean water contents Δθ (% v/v) for the growing period 1991–1994. Responses are shown for the cases without and with manure (I – water content of soil for the NPKI gives Δθ = 0, by definition)

Tabela 19

Wpływ nawożenia obornikiem {M} na średnie wartości uwilgotnienia gleb θ (%, v/v) w okresie 1991–1994
Effect of organic fertilization with farm yard manure {M} on the mean water content θ (%, v/v) for period 1991–1994

Nawożenie NPK NPK Fertilization {F}	Gleba; Soil {S}						Średnia NPK Mean NPK {F}	
	piaskowa sandy		lessowa loess		gliniasta loamy			
	M_0	M_1	M_0	M_1	M_0	M_1	M_0	M_1
Głębokość; Depth 30 cm								
NPK I	14,5	15,0	20,2	19,9	23,6	23,4	19,4	19,4
NPK II	13,8	13,3	18,4	19,4	22,2	22,1	18,1	18,3
NPK III	13,0	12,9	18,0	18,3	22,1	21,6	17,7	17,6
Średnia gleby; Mean soil {S}	13,8	13,7	18,9	19,2	22,6	22,4	18,4	18,4
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
obornika; manure {M}					0,74			
współdziałania; interaction {M} x {S}					1,26			
współdziałania; interaction {M} x {F}					1,34			
Głębokość; Depth 55 cm								
NPK I	16,7	17,7	26,4	25,8	28,4	29,3	23,8	24,3
NPK II	15,3	16,1	23,8	25,0	27,6	27,7	22,2	22,9
NPK III	14,4	15,3	23,5	23,3	27,6	27,2	21,8	21,9
Średnia gleby; Mean soil {S}	15,5	16,4	24,6	24,7	27,9	28,1	22,6	23,0
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
obornika; manure {M}					0,64			
współdziałania; interaction {M} x {S}					1,11			
współdziałania; interaction {M} x {F}					1,33			
Głębokość; Depth 90 cm								
NPK I	19,7	20,3	28,2	28,5	33,5	31,7	27,1	26,8
NPK II	17,6	19,9	25,7	27,5	30,9	30,6	24,7	26,0
NPK III	16,9	17,3	25,8	25,6	30,7	30,8	24,4	24,6
Średnia gleby; Mean soil {S}	18,1	19,2	26,6	27,2	31,7	31,0	25,4	25,8
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:								
obornika; manure {M}					0,78			
współdziałania; interaction {M} x {S}					1,38			
współdziałania; interaction {M} x {F}					1,69			

gleb. Natomiast D z i e ż y c (33), T h o m p s o n i T r o e h (153) oraz Z a w a d z k i (163) po zastosowaniu obornika uzyskali poprawę warunków wodnych gleb.

Różnicowanie się względnych wartości uwilgotnienia Δθ (%, v/v) pod wpływem obornika przy wzrastającym nawożeniu mineralnym NPK II i NPK III na tle wartości uwilgotnienia przy NPK I (wilgotność gleb przy NPK I przyjęto za 0), wskazują na liniowe spadki zawartości wody w miarę wzrostu dawki nawożenia NPK na wszystkich głębokościach pomiarowych (rys. 18). Wykresy wskazują na niejednoznaczny wpływ obornika na uwilgotnienie gleb. Na wszystkich badanych

głębokościach tylko w glebie lessowej obornik nieznacznie zmniejszał spadki wilgotności w warunkach wzrastających dawek NPK. W pozostałych glebach działanie obornika na ich uwilgotnienie było odmiennie.

Analiza statystyczna wykazała brak istotnych różnic w uwilgotnieniu badanych gleb w wyniku nawożenia ich obornikiem (tab. 19). Zastosowanie obornika wiosną 1991 nie zwiększyło w wyraźny sposób średnich wartości uwilgotnienia gleb w okresie 1991–1994.

6.2. PRZESIĄKI GLEBOWE NA TLE OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH I BADANYCH CZYNNIKÓW

Ilość przesiąków wody glebowej w stosunku do sumy opadów i nawodnień (P+I) przedstawiona na rysunku 19 wskazuje na jej zróżnicowanie w zależności od rotacji zmianowania roślin (związek z warunkami pogodowymi, głównie z ilością opadów) oraz nawodnieniem interwencyjnym stosowanym w okresie intensywnego wzrostu roślin. Ilość przesiąku zależała również od: rodzaju gleby, nawożenia NPK, a także nawożenia obornikiem. Na rysunku 19 przedstawiono wpływ badanych czynników na odpływ wgłębny wód obliczony na podstawie następujących równań:

– **dla obiektów z nawadnianiem $\{I_1\}$**

$$D_p = \frac{D}{(P+I)} \times 100,$$

– **dla obiektów bez nawadniania $\{I_0\}$**

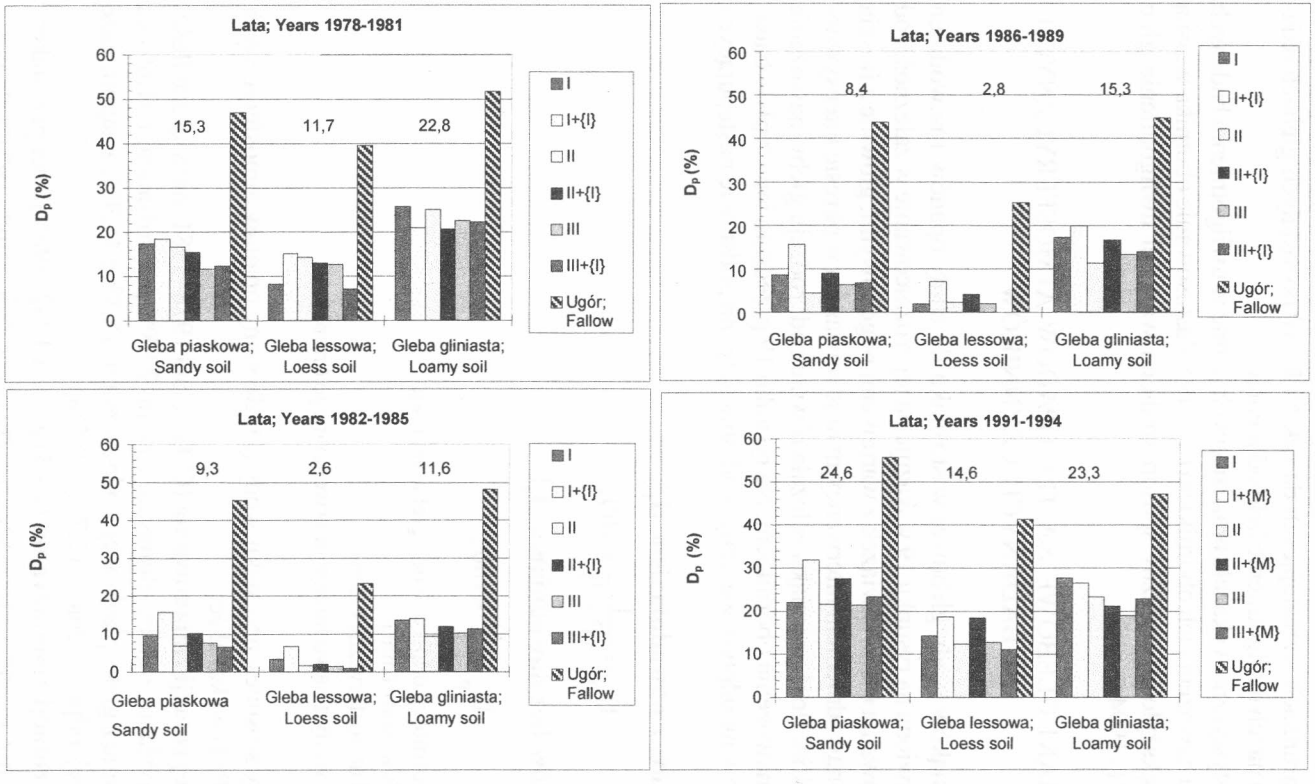
$$D_p = \frac{D}{P} \times 100,$$

gdzie: D_p – procentowy odpływ wody glebowej (%);
D – odpływ wody (mm);
P – opad atmosferyczny (mm);
I – suma wody z nawodnienia interwencyjnego (mm).

Procentowy stosunek przesiąku wody (D) do sumy opadów atmosferycznych i nawodnień (P+I) wykazał że:

– **w pierwszej rotacji zmianowania (C-I)** za lata 1978–1981, największe ilości przesiąków uzyskano z gleby gliniastej: średnio 22,8% pod roślinami i 51,6% na ugorze; następnie z gleby piaskowej – odpowiednio 15,3% i 46,9%, a najmniejsze z gleby lessowej, odpowiednio – 11,7% i 39,5%.

– **w drugiej rotacji zmianowania (C-II)** za lata 1982–1985 ilości przesiąków były mniejsze niż w rotacji pierwszej, co związane było z mniejszymi opadami (o około 400 mm w 4-letnim okresie). Suma opadów w okresie 1982–1985 wyniosła 2276 mm, a w okresie 1978–1981 aż 2604 mm. Zróżnicowanie przesiąku wody z poszczególnych gleb miało podobny trend jak w rotacji pierwszej: największy był odpływ z gleby gliniastej – średnio 11,6% pod roślinami i 48,1% na ugorze, następ-



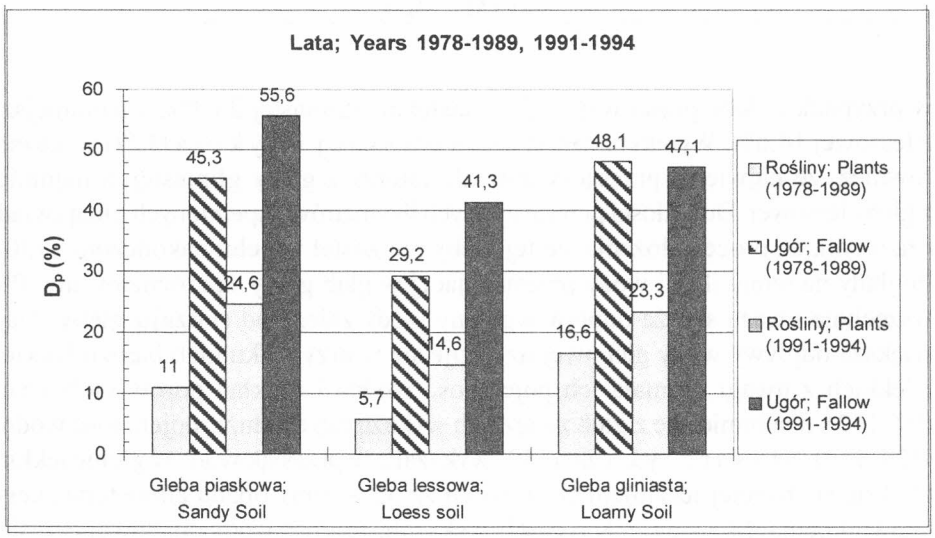
Rys. 19. Procentowy udział przesiąku (D_p) w stosunku do sumy opadu (P) lub sumy opadu i nawadniania (P+I)
(Liczby w górnej części rysunku są średnimi udziału przesiąku dla gleby z roślinami)
Drainage (D_p) as a percentage of precipitation (P) or precipitation + irrigation (P+I)
(Numbers in upper parts of pictures are mean values of drainage for soil with plants)

nie z gleby piaskowej – odpowiednio 9,3% i 45,2% a najmniejszy z gleby lessowej – odpowiednio 2,6% i 23,2%.

w trzeciej rotacji zmianowania (C-III) za lata 1986–1989 ilości przesiąków były niższe niż w poprzednich rotacjach, co miało związek z mniejszą ilością opadów w tym okresie. Zróżnicowana ilość przesiąku z poszczególnych gleb miała podobną tendencję, jak we wcześniejszych rotacjach. Największe odpływy wody uzyskano z gleby gliniastej – średnio 15,3% pod roślinami i 44,7% na ugorze, następnie z gleby piaskowej odpowiednio: 8,4% i 43,7%, a najmniejsze z gleby lessowej – 2,8% i 25,1%.

w czwartej rotacji zmianowania (C-IV) za lata 1991–1994 w której zastosowano obornik w 1991 roku, ilość przesiąku glebowego wzrosła w porównaniu z 12-letnim wcześniejszym okresem badań. Z badanych gleb, a szczególnie z gleby lessowej otrzymano znacznie większe ilości przesiąków. W okresie 1991–1994 najwięcej przesiąku uzyskano z gleby piaskowej a najmniej z gleby lessowej. Ilość przesiąków z obsianej gleby piaskowej w stosunku do sumy opadów i nawodnień (P + I), stanowiła średnio 24,6% i aż 55,7% z ugoru; z gliniastej – odpowiednio 23,3% i 47,1% , a z gleby lessowej – 14,6% i 41,4%.

W trzech rotacjach 1978–1989 największy odpływ wgłębny wody zaobserwowano w glebie gliniastej, a najmniejszy w glebie lessowej, podczas gdy w rotacji 1991–1994 największy odpływ miał miejsce w glebie piaskowej (rys.19 i 20). Dane tabeli 20 (średnie z 16 lat badań) wskazują, że największy odpływ wgłębny był



Rys 20. Procentowy udział przesiąku (D_p) w stosunku do opadu (P) lub sumy opadu i nawadniania (P+I) za lata 1978–1989 i 1991–1994 pod roślinami i na ugorze
Drainage (D_p) as a percentage of precipitation (P) or precipitation + irrigation (P+I) for the periods 1978–1989 and 1991–1994 under plants and fallow

Tabela 20

Procentowy odpływ wgłębny (D_p) w stosunku do sumy opadów (P) lub sumy opadów i nawodnień (P + I)
Drainage (D_p) as a percentage of precipitation (P) or the sum of precipitation + irrigation (P+I)
(wartości średnie; mean values)

Gleba; Soil {S}		
Piaskowa; Sandy	24,5	
Lessowa; Loess	14,6	
Gliniasta; Loamy	23,3	
Okrywa roślinna; With plants		Ugór; Fallow
Piaskowa; Sandy	14,4	47,8
Lessowa; Loess	7,9	32,3
Gliniasta; Loamy	18,3	47,9
Roślina; Plant {C}		
Ziemniak; Potato	12,3	
Jęczmień jary; Spring barley	16,4	
Rzepak ozimy; Winter rape	13,9	
Pszenica ozima; Winter wheat	13,0	
Nawożenie NPK; Fertilization NPK {F}		
NKP I	23,8	
NPK II	13,2	
NPK III	11,5	
Nawadnianie interwencyjne; Irrigation {I}		
- H_2O	12,7	
+ H_2O	14,4	
Nawożenie obornikiem; Manure {M}		
- FYM	19,3	
+ FYM	22,3	

w przypadku gleby piaskowej 24,5%, następnie gliniastej 23,3%, a najmniejszy z lessowej 14,6%. Wyniki badań Ruszkowskiej i Sykuta (127) wykazały również, że najwięcej przesączy zbierali autorzy z gleby gliniastej, a najmniej z gleby lessowej. Duże ilości przesączy z tych lizymetrów napełnionych gliną świadczą o tym, że proces ułożenia się tej gleby nie został w pełni zakończony (130). Poglądy na temat ilości wody przesiąkającej w głąb gleby są zróżnicowane. Powszechnie uważa się, że odpływ wgłębny wody zależy od **rodzaju gleby**. Największe odpływy wody glebowej uzyskuje się w przypadku gleb bardzo lekkich i lekkich z uwagi na małą ich pojemność wodną i rozkład porów glebowych (97, 152), a najmniejsze z gleb zwięzłych wykazujących dużą pojemność wodną (127, 130). Ślusarczyk i in. (152) wykazali, że przesiąk wody w glebie lekkiej (351 mm) obsianej jęczmieniem stanowił aż 55% sumy opadu atmosferycznego i nawodnienia. Mazur i Koc (97) wykazali, że ilość wody opadowej przesiąkającej przez glebę uzależniona była od jej składu granulometrycznego i zastosowanego nawożenia organicznego. W badaniach tych największe ilości przesączy uzyskiwano z lizymetrów napełnionych glebą lekką.

Powszechnie akceptowany pogląd wskazujący, że w glebach lekkich przesiąk wody jest największy, znajduje pełne potwierdzenie w prezentowanych badaniach, ale tylko w przypadku gleb ugorowanych. Wyniki badań własnych (tab. 20 oraz rys.19 i 20) wykazały, że największa perkolacja wody w głąb profilu miała miejsce w przypadku gleby ugorowanej. W latach 1978–1989 najmniejsze przesiąki wody stwierdzono z gleby lessowej obsianej roślinami 5,7% a z ugoru 29,2% w stosunku do sumy opadów i nawodnień. Na glebie piaskowej wartości te wyniosły odpowiednio: 11,0% i 45,3%, na gliniastej: 16,6% i 48,1% (rys. 20). W latach 1991–1994 przesiąki były większe (rys. 19 i 20). Zbliżone wartości uzyskano dla okresu 16-letniego tj. najniższe w glebie lessowej 7,9% pod roślinami i 32,3% na ugorze. Znacznie wyższe przesiąki stwierdzono w glebie piaskowej: 14,4% pod roślinami i 47,8% na ugorze i w glebie gliniastej odpowiednio: 18,3% i 47,9% (tab. 20). W obiektach z ugorem uzyskiwano 2–4-krotnie większą ilość przesiąku glebowego niż z poletek pod roślinami (rys. 20). Dane te są zgodne z wynikami prac S y k u t a (147) oraz R u s z k o w s k i e j i in. (123, 126, 130). Wyniki badań (rys. 20) wykazały, że w okresie 1991–1994 uzyskano większą ilość przesiąku glebowego w porównaniu z okresem 1978–1989, tak z obiektów z roślinami, jak i z ugoru. R u s z k o w s k a i in. (123) we wcześniejszych badaniach lizymetrycznych, prowadzonych w tych samych obiektach stwierdzili, że ilość przesiąku zależała od gatunku roślin i przebiegu ich wegetacji. W badaniach tych wykazano, że w skali rocznej ilość przesiąków z gleb wyniosła średnio ponad 30% w stosunku do sumy rocznych opadów atmosferycznych. Wyniki późniejszych badań R u s z k o w s k i e j i S y k u t a (127) wskazują, że w obiektach z ugorowaniem przesiąki stanowiły około 60% opadów rocznych na glinie i piasku.

Wyniki badań dotyczące **wpływu nawożenia mineralnego NPK** (rys. 19, tab. 20) na różnicowanie ilości przesiąków glebowych wykazały, że wzrost dawki NPK zmniejszał wgłębny odpływ wody, co należy tłumaczyć większym zużyciem wody przez rośliny na wyprodukowanie większego plonu. Spadek ilości przesiąków pod wpływem NPK, szczególnie przy NPK III, spowodowany został niższym uwilgotnieniem gleb tych obiektów w porównaniu z obiektami nawożonymi NPKI i NPKII (19, 24, 27). Analiza statystyczna wykazała ujemną korelację między poziomem nawożenia NPK a uwilgotnieniem gleb, przy czym najmniejsze różnice stwierdzono w głębszych warstwach profilu glebowego.

Uzyskane dane (tab. 20) wykazały że wzrost dawki NPK zmniejszył ilość przesiąków średnio o 23,8% przy NPK I, 13,2% przy NPK II i o 11,5% przy NPK III w stosunku do sumy opadów i nawodnień. Związane to również było z lepszym wykorzystaniem zapasów wody glebowej przez rośliny. Wyniki te potwierdzają badania R u s z k o w s k i e j i S y k u t a (127) oraz R u s z k o w s k i e j i in. (130).

Nawadnianie interwencyjne (rys. 19 i tab. 20) zwiększyło ilość przesiąków wody w porównaniu z obiektami bez stosowania nawadniania. Średnia ilość przesiąków w stosunku do sumy opadów wyniosła 12,7% w obiektach bez nawadniania i 14,4% w obiektach z nawadnianiem (tab. 20).

Nawożenie obornikiem (tab. 20) zwiększyło wgłębny odpływ wody w porównaniu z obiektami bez nawożenia organicznego. Średnia ilość przesiąków w stosunku do sumy opadów wyniosła 19,3% w obiektach bez obornika i 22,3% w obiektach z obornikiem. Dodatek obornika zwiększał na ogół ilość przesiąku glebowego, lecz w stopniu niewielkim. Zwiększony przesiąk wody w obiektach z obornikiem był spowodowany prawdopodobnie wystąpieniem strefy hydrofobowej, gleba w tych warunkach była niezwilżalna i w związku z tym uzyskiwano duże ilości przesiąków glebowych, szczególnie na glebie piaskowej. M a z u r i K o c (97) stwierdzili, że nawożenie organiczne zmniejszyło odpływ wody z gleby lekkiej i średniej. Fakt ten tłumaczą oni nie tylko wzrostem pojemności wodnej gleb, ale i pobraniem wody przez rośliny. W literaturze naukowej (22, 26, 97, 147, 152) brak jest jednoznacznych danych wpływu nawożenia obornikiem na kształtowanie się odpływu wgłębnego wody w glebach. Nawożenie obornikiem nie miało jednoznacznego charakteru oddziaływania na ilość odpływu wgłębnego wody.

Regresja liniowa między ilością przesączy z badanych gleb: na ugorach (y_0) i pod roślinami (y_1) a sumą opadów i nawadniania (P+I) w mm (x_1) wykazała istotnie dodatnią korelację (tab. 21). Dla gleb ugorowanych współczynnik determinacji $R^2(100)$ wynosił od 97,3% do 99,1%, a współczynnik korelacji r = 0,995 dla gleby piaskowej, r = 0,989 dla gleby lessowej i r = 0,986 dla gleby gliniastej. W glebach obsianych roślinami współczynnik determinacji $R^2(100)$ był nieco niższy i wyniósł od 52,4% do 74,0%, a współczynnik korelacji r: 0,723; 0,859 i 0,863 odpowiednio dla gleb: piaskowej, lessowej i gliniastej. W glebach obsianych czyn-

Tabela 21

Regresja liniowa między ilością przesiąku wody gleb ugorowanych (y_0) i pod roślinami (y_1), a sumą opadu i nawodnień (P + I) – x (mm) z lat 1978–1989
Linear regression giving total drainage for fallow (y_0) and cropped (y_1) treatments as functions of total precipitation + irrigation (P + I) – x (mm), for period 1978–1989

Gleba Soil	Równanie regresji liniowej Linear equation of regression	Współczynnik determinacji Determination coefficient (R^2)	Współczynnik korelacji Correlation coefficient (r)
Ugór; Fallow			
Piaskowa; Sandy	$y_0 = 0,5394x - 130,41$	0,991	0,995
Less; Loess	$y_0 = 1,0975x - 633,18$	0,980	0,989
Glina; Loamy	$y_0 = 0,723x - 248,35$	0,973	0,986
Pod roślinami; Under plants			
Piaskowa; Sandy	$y_1 = 0,4953x - 289,55$	0,524	0,723
Less; Loess	$y_1 = 0,6048x - 405,28$	0,739	0,859
Glina; Loamy	$y_1 = 0,7034x - 406,12$	0,740	0,863

Regresja istotna na poziomie $\alpha = 0,05$; Regressions significant at $\alpha = 0,05$

nikiem modyfikującym ilość przesiąków wgłębnych wody były rośliny, które wykorzystywały wodę glebową w okresie intensywnego wzrostu i w ten sposób ograniczały przesiąki, a nawet powodowały ich brak.

Wyniki badań własnych wykazały, że ilość przesiąku z gleb pokrytych roślinami była jednak 2–3(4)-krotnie mniejsza. Wiąże się to oczywiście z pobieraniem wody przez rośliny uprawne, co potwierdzają wcześniejsze badania (130, 147), oraz z przebiegiem wegetacji roślin (127). Największe ilości przesiąków uzyskiwano z reguły wczesną wiosną przed ruszeniem wegetacji oraz jesienią i zimą w czasie roztopów. W trakcie badań utrzymywała się wyraźna sezonowość w uzyskiwaniu przesiąków glebowych: prawie zupełny brak od maja do września i częściowo w miesiącach jesiennych (intensywne pobieranie wody przez rośliny); największe ilości przesiąku otrzymywano w okresie od stycznia do kwietnia włącznie. W glebach ugorowanych przesiąki wody stwierdzono prawie przez cały rok. Wyniki te potwierdzają wieloletnie badania lizymetryczne prowadzone przez szereg badaczy (123, 125-127, 130, 147), którzy wykazali, że istnieje ścisła zależność między ilością przesączy glebowych a porą roku i przebiegiem okresu wegetacji.

Podsumowując uzyskane wyniki badań stwierdzić można, że ilości przesiąków glebowych zależały od rodzaju (gatunku) gleby, nawożenia NPK i nawadniania roślin. Nawożenie obornikiem nie miało jednoznacznego charakteru oddziaływania na ilość przesiąków wody.

6.3. PLONOWANIE ROŚLIN UPRAWNYCH

Równocześnie z badaniami stosunków wodnych i bilansu wodnego gleb dokonano analizy plonowania roślin uprawnych w zależności od: składu granulometrycznego gleby {S}, nawożenia mineralnego {F}, nawadniania interwencyjnego {I} i nawożenia obornikiem {M}.

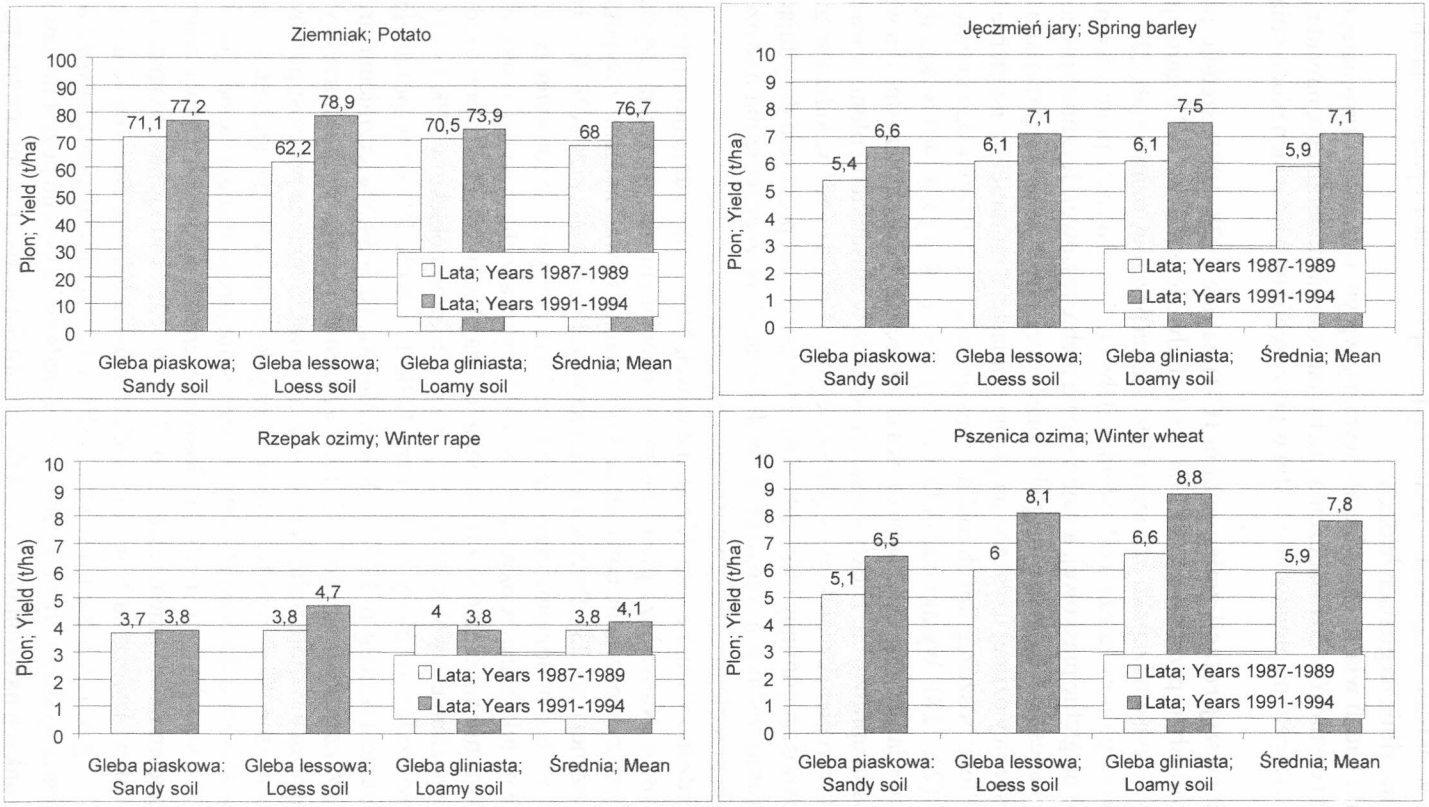
W doświadczeniu lizymetrycznym dzięki odpowiednim zabiegom agrotechnicznym (128) uzyskiwano wysokie plony roślin w ciągu całego 16-letniego okresu badań. Zakresy i wartości średnie plonu poszczególnych roślin w przeliczeniu na 1 ha (tabela 22) wyniosły: 24,8–115,5 t (średnio 70,1 t) bulw ziemniaka; 3,5–8,6 t (średnio 6,2 t) ziarna jęczmienia; 2,0–6,0 t (średnio 3,9 t) nasion rzepaku ozimego i 3,9–9,7 t (średnio 6,4 t) ziarna pszenicy ozimej. Wyniki badań przedstawione w tabeli 22 i na rysunku 21 wskazują, że plonowanie roślin zależało od ilości opadów atmosferycznych w poszczególnych okresach wegetacyjnych, a szczególnie w okresach krytycznych dla wzrostu roślin (rozdz. 5.2). Średnie plony roślin w latach 1991–1994 były wyższe w porównaniu z okresem wcześniejszym 1978–1989. Istnieje dużo danych w literaturze dotyczących plonowania roślin uprawnych w doświadczeniach polowych, mikropoletkowych i lizymetrycznych, zależnie od zużycia wody przez rośliny w układzie gleba – roślina – atmosfera (28, 45-47, 50, 56, 71, 77-79, 81). W pracach tych określono zależność między wysokością plonów roślin a przydatnością rolniczą gleb, czynnikami meteorologicznymi, nawo-

Tabela 22

Plonowanie roślin za lata 1978–1994 (wartości średnie i zakresy)
Crop yields for the years 1978–1994 (mean and ranges)

Lata Years	Roślina Plant	Składowe plonu Element of yield	Amplituda plonu Range of yield ($t \cdot ha^{-1}$)	Plon średni Mean yield ($t \cdot ha^{-1}$)
1978	ziemniak potato	bulwy; tubers (świeża masa; fresh weight)	58,5–109,2	83,4
1982			24,8–58,5	40,1
1986			50,3–115,5	80,4
1991			66,5–89,2	76,7
Średnia; Average			**24,8–115,5**	**70,1**
1979	jęczmień jary spring barley	ziarno; grain (sucha masa; dry matter)	4,6–8,6	6,2
1983			3,5–7,7	5,6
1987			3,9–8,0	5,9
1992			5,8–8,2	7,1
Średnia; Average			**3,5–8,6**	**6,2**
1980	rzepak ozimy winter rape	nasiona; seeds (sucha masa; dry matter)	3,6–5,9	4,6
1984			2,8–5,5	3,9
1988			2,0–4,0	3,0
1993			2,8–6,0	4,1
Średnia; Average			**2,0–6,0**	**3,9**
1981	pszenica ozima winter wheat	ziarno; grain (sucha masa; dry matter)	4,7–7,4	5,9
1985			3,9–7,2	5,8
1989			5,2–7,6	6,1
1994			5,1–9,7	7,8
Średnia; Average			**3,9–9,7**	**6,4**

żeniem, nawadnianiem, odmianą roślin i zmianowaniem. Wykazano, że plony roślin uprawnych w decydującym stopniu zależą od warunków atmosferycznych, głównie ilości opadów i temperatury oraz glebowych i agrotechnicznych. D z i e ż y c (33) wykazał, że niedobór opadów w jesieni spowodował spadek plonu zbóż ozimych o 10–30%, a ziemniaka aż o 35%. Wpływ wyżej wymienionych czynników na plonowanie roślin potwierdziły wyniki 16-letnich badań. Układ tych czynników i związki istniejące między nimi mają również bardzo duży wpływ na plonowanie roślin (33, 45, 68, 83, 120, 126, 138). Według D z i e ż y c a (33) wysoki plon ziemniaka zapewniają opady w okresie wegetacji od 160 do 200 mm, natomiast wg K a c z o r k a (68) najwyższe plony ziemniaka uzyskuje się przy opadach w przedziale 200–250 mm. F o t y m a (45) analizując wyniki badań nad reakcją ziemniaka na nawożenie azotem stwierdziła, że wielkość optymalnej dawki azotu zależała głównie od jakości gleby i wielkości opadów w okresie zimowym i wegetacyjnym. Wraz ze wzrostem ilości opadów w zimie zwiększał się plon ziemniaków pod wpływem optymalnej dawki azotu oraz zwiększała się efektywność nawożenia tym składnikiem. Opady mniejsze, a także większe od normy, powodowały spadek efektywności nawożenia azotem (120). Również S a w i c k a (138) stwierdziła największą efektywność nawożenia azotem ziemniaka przy umiarkowanych



Rys. 21. Średnie plony roślin w latach 1978–1989 i 1991–1994
Mean yield of plants for periods 1978–1989 and 1991–1994

opadach w okresie wegetacji. Ograniczający wpływ braku opadów ujawnia się szczególnie silnie na glebach lekkich.

Wyniki badań własnych wykazały wyraźny wpływ warunków agrometeorologicznych i czynników doświadczenia (gleby, nawożenia mineralnego, nawadniania interwencyjnego) na plonowanie roślin w poszczególnych rotacjach płodozmianowych.

W pierwszej rotacji zmianowania (C-I) za lata 1978–1981, średnie plony roślin wyniosły w przeliczeniu na 1 ha: 83,4 t bulw ziemniaków; 6,2 t ziarna jęczmienia, 4,6 t nasion rzepaku ozimego i 5,9 t ziarna pszenicy ozimej (tab. 22).

Wielkość plonów zależała od gatunku gleby (125); najwyższe plony ziemniaka uzyskano na glebie piaskowej, a najniższe na glebie lessowej. Jęczmień plonował najlepiej na lessie, a najgorzej na glebie piaskowej. Najwyższe plony rzepaku ozimego i pszenicy ozimej uzyskano na glebie gliniastej a najmniejsze na glebie piaskowej. Plony poszczególnych roślin wzrastały wraz ze wzrostem dawki nawożenia NPK (24, 128). Wyniki badań D z i e ż y c a i R o j k a (40) wykazały, że podwojenie dawek nawozów, w stosunku do przeciętnych, jest korzystne dla większości roślin uprawnych. Efektywność nawożenia w stosunku do plonu warunkowana jest szeregiem czynników, w tym szczególnie ilością opadów, rodzajem gleby i intensywnością odmiany (46, 124, 126). Podstawowym procesem decydującym o plonowaniu roślin jest fotosynteza, stąd też tak duże znaczenie ma nawożenie azotem dla przebiegu i efektywności tego procesu.

Stwierdzono wyraźne współdziałanie dawek NPK z nawadnianiem interwencyjnym roślin. Największe plony roślin w omawianym okresie badań uzyskano przy najwyższym poziomie nawożenia w obiektach z nawadnianiem, z wyjątkiem pszenicy ozimej (tab. 23). Pszenica ozima najwyżej plonowała przy NPK II + H_2O, gdyż przy wyższym poziomie nawożenia spadała intensywność fotosyntezy (125). Uzyskane wyniki badań w okresie 1978–1981 wykazały efektywność współ-działania nawożenia mineralnego z nawadnianiem na plonowanie roślin przy średnim i wysokim poziomie nawożenia (tab. 23). Przyjmując plon z obiektów NPK I + H_2O za 100%, wykazano, że plony roślin przy NPK II i NPK III we współdziałaniu z nawadnianiem wzrosły o: 12,7–35,8% ziemniaka, 10,3–34,5% jęczmienia jarego, 12,0–48,2% rzepaku ozimego i 2,5–19,1% pszenicy ozimej. W literaturze wyniki badań dotyczące współdziałania nawożenia i nawadniania na przyrost plonów są jednak rozbieżne. W przypadku pszenicy zwyżki plonów mogą dochodzić nawet do 49% w stosunku do kontroli (40), a jęczmienia jarego wahają się od 7 do 30% (34, 40). K o s z a ń s k i i in. (81) w doświadczeniach polowych z nawadnianiem i wzrastającym nawożeniem azotem (0, 75, 100, 125, 150 kg/ha) stwierdzili korzystny wpływ nawożenia N w obiektach bez nawadniania. Badania K u s z e l e w s k i e g o i Ł a b ę t o w i c z a (84) nad współdziałaniem nawożenia N i nawadniania wykazały, że plony roślin przy średnim i wysokim poziomie nawożenia w warunkach nawadniania wzrastały: ziemniaka o 16–21%, jęczmienia jarego o 5–10%, pszenicy jarej o 8–12%. G ą s i o r (50) stwierdził, że zwiększenie dawki

azotu z 50 do 150 kg spowodowało wzrost masy bulw pojedynczej rośliny ziemniaka z 0,51 do 0,59 kg, natomiast dawka 200 kg N obniżyła masę do 0,54 kg. Zwiększenie dawki azotu z 50 do 200 kg N obniżyło zawartość suchej masy roślin i skrobi. Badania wykazały, że plon ziemniaków, zawartość suchej masy i skrobi oraz azotu w roślinach zależały od przebiegu pogody. Wraz ze zmniejszeniem masy bulw (w latach wilgotnych) zwiększała się procentowa zawartość suchej masy i skrobi oraz udział N-białkowego w ogólnej ilości azotu. Badania F o t y m y i in. (47) wskazują, że nawozy azotowe działają następczo, przynajmniej w drugim roku od ich zastosowania. Autorzy ci stwierdzili również, że rośliny okopowe, mimo uprawy na oborniku, reagowały wyraźnie na nawożenie azotem stosowane pod przedplon.

W drugiej rotacji zmianowania (C-II) za lata 1982–1985, średnie plony roślin w przeliczeniu na 1 ha wyniosły: 40,1 t bulw ziemniaka; 5,6 t ziarna jęczmienia jarego; 3,9 t nasion rzepaku ozimego i 5,8 t ziarna pszenicy ozimej (tab. 22).

Stwierdzono korzystny wpływ nawożenia NPK na zwiększenie plonowania wszystkich roślin, szczególnie w warunkach nawadniania interwencyjnego (tab. 23). Najwyższe plony ziemniaków uzyskano na glebie piaskowej, natomiast jęczmienia jarego, rzepaku ozimego i pszenicy ozimej na glebie gliniastej, podobnie jak w badaniach Ruszkowskiej i in. (126). Stwierdzono wysoką efektywność współdziałania nawożenia i nawadniania na plonowanie badanych roślin, przy średnim i wysokim poziomie nawożenia w obiektach z nawadnianiem plony wzrosły do: 19,4% ziemniaka, 52,9% jęczmienia jarego, 66,0% rzepaku ozimego i 43,4% pszenicy ozimej (tab. 23). Jedynie w roku 1982 w przypadku ziemniaka stwierdzono niższe plony o 0,2% na lessie w obiektach NPK III + H_2O i o 0,6% na glebie piaskowej w obiektach NPK II + H_2O. Było to wywołane porażeniem roślin przez zarazę ziemniaka (126).

Plony ziemniaka w roku 1982 były dwukrotnie niższe w porównaniu z plonami w pierwszej rotacji (tab. 22). Było to spowodowane również różnicą w ilości opadów w okresie wegetacji ziemniaka (w roku 1982 było jedynie 226 mm deszczu, podczas gdy w roku 1978 – dwukrotnie więcej, bo aż 455 mm).

W omawianej rotacji ujawniło się nietypowe plonowanie rzepaku (w roku 1984) na glebie lessowej. We wszystkich obiektach NPK z zastosowaniem nawadniania stwierdzono spadek plonów tej rośliny, co spowodowane zostało obniżeniem się potencjału oksydoredukcyjnego Eh poniżej 330 mV (23). Stwierdzono w tym względzie istotną korelację ujemną między ilością dni z wartością Eh poniżej 330 mV, a plonem rzepaku ozimego na glebie lessowej (przy współczynniku: korelacji r = -0,91 oraz determinacji R^2 (100) = 83%). Niekorzystny wpływ oddziaływania niskich wartości Eh na plonowania roślin wykazali również G l i ń s k i i in. (52) oraz S t ę p n i e w s k i i G l i ń s k i (144).

W trzeciej rotacji zmianowania (C-III) za lata 1986–1989, rośliny (z wyjątkiem rzepaku ozimego) plonowały lepiej niż w rotacjach poprzednich. Średnie plony roślin, w przeliczeniu na 1 ha wyniosły: 80,4 t bulw ziemniaków, 5,9 t ziarna jęczmienia jarego, 3,0 t nasion rzepaku ozimego i 6,1 t ziarna pszenicy ozimej (tab. 22).

Tabela 23

Efektywność współdziałania nawożenia NPK i nawadniania na średnią wartość plonowania roślin
(plon z 1 m^2 dla obiektu NPK I + H_2O = 100%)
Effect of fertilization level on the mean crop yields from irrigated soils
(values are relative to the values for NPK I + H_2O = 100%)

Gleba Soil	Obiekty Treatments	Ziemniak Potato		Jęczmień jary Spring barley		Rzepak ozimy Winter rape		Pszenica ozima Winter wheat	
		kg św.m./m^2 kg f.w./m^2	%	g s.m./m^2 g d.m./m^2	%	g s.m./m^2 g d.m./m^2	%	g s.m./m^2 g d.m./m^2	%
1978–1981									
Piaskowa Sandy	NPK I + H_2O	8,69	100	638	100	356	100	466	100
	NPK II + H_2O	9,80	112,7	708	111,0	439	123,3	502	107,7
	NPK III + H_2O	10,92	125,6	704	110,3	523	146,9	478	102,5
Lessowa Loess	NPK I + H_2O	7,22	100	636	100	369	100	581	100
	NPK II + H_2O	8,36	115,8	742	116,7	476	129,0	692	119,1
	NPK III + H_2O	9,77	135,8	856	134,5	547	148,2	668	114,9
Gliniasta Loamy	NPK I + H_2O	8,10	100	604	100	447	100	658	100
	NPK II + H_2O	9,95	122,8	708	117,2	501	112,0	736	111,8
	NPK III + H_2O	10,92	134,8	769	127,3	586	131,1	689	104,7
Zakres; Range (%)		112,7–135,3		110,3–134,5		112,0–148,2		102,5–119,1	
1982–1985									
Piaskowa Sandy	NPK I + H_2O	5,03	100	419	100	300	100	392	100
	NPK II + H_2O	5,00	99,4	566	135,0	422	140,7	562	143,4
	NPK III + H_2O	5,83	115,9	641	152,9	498	166,0	551	140,1
Lessowa Loess	NPK I + H_2O	3,91	100	502	100	279	100	590	100
	NPK II + H_2O	4,52	115,6	667	132,9	402	144,0	624	105,8
	NPK III + H_2O	3,85	99,8	743	148,0	432	162,3	681	115,4
Gliniasta Loamy	NPK I + H_2O	4,43	100	575	100	380	100	627	100
	NPK II + H_2O	4,76	107,4	706	122,8	441	116,0	674	107,5
	NPK III + H_2O	5,28	119,4	772	134,3	546	143,7	715	114,0
Zakres; Range (%)		99,4–119,4		122,8–152,9		116,0–166,0		107,5–143,4	

		1986–1989							
Piaskowa Sandy	NPK I + H_2O	6,26	100	500	100	240	100	653	100
	NPK II + H_2O	9,20	147,0	663	132,6	315	131,2	697	106,7
	NPK III + H_2O	11,03	176,2	734	146,8	375	155,0	645	99,8
Lessowa Loess	NPK I + H_2O	5,63	100	538	100	191	100	722	100
	NPK II + H_2O	8,10	143,9	649	120,6	316	165,4	703	99,3
	NPK III + H_2O	9,47	168,2	705	131,9	402	210,5	693	95,9
Gliniasta Loamy	NPK I + H_2O	6,33	100	552	100	234	100	785	100
	NPK II + H_2O	9,17	145,0	711	128,8	308	131,6	830	105,7
	NPK III + H_2O	11,53	182,1	796	144,2	402	171,8	848	108,0
Zakres; Range (%)		143,9–182,1		120,6–146,8		130,5–210,5		95,9–108,0	

Podobnie jak poprzednio, stwierdzono tu również wzrost plonu roślin wraz ze wzrostem nawożenia NPK. Wysoka również była efektywność współdziałania nawożenia i nawadniania, przy średnim i wysokim poziomie NPK (tab. 23). Łączne stosowanie nawożenia i nawadniania zwiększyło plony: ziemniaków o 43,0–82,1%, jęczmienia jarego o 20,6–46,8%, rzepaku ozimego o 30,5–110,5%. Nawożenie i nawadnianie zwiększyło plon pszenicy ozimej tylko o 8% na glebie gliniastej, a na glebie lessowej stwierdzono nawet niewielkie spadki plonów rzędu 0,2–4,1%. Szczególnie duże działanie nawadniania ujawniło się w przypadku ziemniaka i jęczmienia jarego uprawianych na glebie piaskowej i lessowej. Obniżenie plonu rzepaku ozimego w tej rotacji w stosunku do wcześniejszych w obiektach z nawożeniem NPK i nawadnianiem interwencyjnym związane było ze szczególnie niekorzystnym rozkładem opadów w maju 1988 roku (dekadowe opady wyniosły kolejno: 1,4; 41,7 i 29,4 mm i w czerwcu, odpowiednio: 38,9; 3,9 i 40,9 mm). Podobne zjawisko stwierdzili również D z i e ż y c (33) i K u ź n i a r (87, 88). Wyniki badań z nawadnianiem wskazują na bardzo zróżnicowany wpływ tego zabiegu na plonowanie roślin uprawnych (33, 40, 74, 156). Na ogół autorzy podkreślają dodatni wpływ nawadniania na plonowanie roślin. K o s z a ń s k i i in. (82) uważają, że nawadnianie sprzyja krzewieniu się zbóż, wzrostowi powierzchni asymilacyjnej, i zwiększeniu zawartości chlorofilu i azotanów w liściu flagowym. Wpływa to korzystnie na plonowanie roślin.

W czwartej rotacji zmianowania (C-IV) za lata 1991–1994, zakresy i średnie plony roślin w przeliczeniu na 1 ha wyniosły odpowiednio: 66,5–89,2 i 76,7 t bulw ziemniaka, 5,8–8,2 i 7,1 t ziarna jęczmienia jarego, 2,8–6,0 i 4,1 t nasion rzepaku ozimego oraz 5,1–9,7 i 7,8 t ziarna pszenicy ozimej (tab. 22). W rotacji tej, oprócz nawożenia mineralnego (NPK I, NPK II, NPK III) zastosowano w roku 1991 pod ziemniaki 30 t/ha obornika. Wyniki plonowania roślin uprawnych wskazują wyraźny wzrost plonów pod wpływem nawożenia NPK, w miarę podwyższania – podwajania i potrajania dawki NPK w stosunku do pierwszego poziomu nawożenia mineralnego z dodatkiem obornika (tab.24). Stwierdzono pozytywne działanie nawozów mineralnych stosowanych łącznie z obornikiem na plonowanie roślin. Obornik w obiektach z nawożeniem NPK zwiększył zawartość i wykorzystanie składników pokarmowych w glebach. Podobne wyjaśnienie wzrostu plonów pod wpływem obornika znajduje się w licznych pozycjach literatury przedmiotu (2, 33, 58, 112, 153). Jednak w prezentowanej pracy przeprowadzona analiza wariancji nie wykazała istotnego wpływu obornika na plonowanie roślin (tab. 26, 29).

Wyniki badań dotyczące plonowania roślin wskazują na istotną zależność plonów roślin od nawożenia mineralnego oraz współdziałania nawożenia i nawadniania (tab. 25). Dane te potwierdzają badania innych autorów (21, 40, 84, 123, 126, 152, 156). Szczególnie wysokie plony roślin uzyskano przy nawożeniu NPK III i nawadnianiu w okresie intensywnego wzrostu roślin. Efekt ten w przypadku wszystkich roślin uwidocznił się na glebie gliniastej, a w przypadku ziemniaka również na glebie piaskowej. Potwierdzenie uzyskanych wyników znaleźć można w wielu

Tabela 24

Efektywność współdziałania nawożenia mineralnego NPK i obornika na średnią wartość plonowania roślin w latach 1991–1994
(plon z obiektu NPK I + obornik = 100%)
Effect of fertilization level on the mean crop yields from soils with addition of manure for the years 1991–1994
(values are relative to the values for NPK I + {M} = 100%)

Gleba Soil	Obiekty Treatments	Ziemniak Potato		Jęczmień jary Spring barley		Rzepak ozimy Winter rape		Pszenica ozima Winter wheat	
		kg świeżej masy kg fresh weight	%	g s.m. g d.m.	%	g s.m. g d.m.	%	g s.m. g d.m.	%
Piaskowa Sandy	NPK I + {M}*	7,52	100	600	100	260	100	530	100
	NPK II + {M}	8,04	106,9	660	110,0	390	150,0	660	124,5
	NPK III + {M}	8,33	110,8	710	118,3	470	180,7	720	135,8
Lessowa Loess	NPK I + {M}	7,02	100	610	100	360	100	710	100
	NPK II + {M}	8,25	117,5	750	122,9	470	130,5	830	116,9
	NPK III + {M}	8,25	121,4	800	133,3	570	158,3	890	125,3
Gliniasta Loamy	NPK I + {M}	6,65	100	700	100	290	100	770	100
	NPK II + {M}	7,05	105,6	760	108,5	380	131,0	930	120,7
	NPK III + {M}	8,27	124,3	830	118,6	450	155,1	970	125,9
Zakres; Range (%)		105,6–124,3		108,5–133,3		130,5–180,7		113,8–135,8	

* {M} obornik; manure

Tabela 25

Plonowanie roślin (kg · m^{-2}) za lata 1978–1989 (średnie z 3 rotacji) (wg Ruszkowskiej i in., 128)
Crop yields (kg · m^{-2}) for years 1978–1989 (mean values of three rotations)
(acc. to Ruszkowska et al., 128)

Nawożenie mineralne Fertilization NPK {F}	Ziemniak – bulwy; Potato – tubers (świeża masa; fresh mass)			Jęczmień jary – ziarno; Spring barley – grain (sucha masa; dry mass)		
	gleba; soil {S}					
	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy
NPK I	5,35	4,45	5,25	0,42	0,49	0,50
NPK I + H_2O {I}	6,66	5,59	6,29	0,52	0,56	0,58
NPK II	6,40	5,87	6,42	0,44	0,58	0,53
NPK II + H_2O {I}	8,00	6,99	7,96	0,65	0,69	0,71
NPK III	7,05	6,75	7,13	0,49	0,60	0,57
NPK III + H_2O {I}	9,26	7,69	9,24	0,69	0,77	0,78
Średnia; Mean	7,12	6,22	6,94	0,52	0,62	0,60
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:	{S}*	0,298			0,016	
	{F}	0,298			0,016	
	{I}	0,203			0,011	
współdziałania; interaction	{S} × {F}	0,517			0,028	
	{F} × {S}	0,517			0,028	
	{S} × {I}	0,352			0,019	
	{I} × {S}	0,422			0,023	
	{F} × {I}	0,352			0,019	
	{I} × {F0}	0,422			0,023	

Nawożenie mineralne Fertilization NPK {F}		Rzepak ozimy – nasiona; Winter rape – seeds (sucha masa – dry mass)			Pszenica ozima – ziarno; Winter wheat – grain (sucha masa – dry mass)		
		gleba; soil {S}					
		piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy
NPK I		0,30	0,29	0,32	0,48	0,54	0,61
NPK I + H_2O {I}		0,30	0,29	0,35	0,48	0,60	0,66
NPK II		0,36	0,42	0,39	0,50	0,60	0,60
NPK II + H_2O {I}		0,39	0,40	0,42	0,56	0,65	0,72
NPK III		0,42	0,44	0,40	0,51	0,59	0,62
NPK III + H_2O {I}		0,46	0,46	0,49	0,54	0,66	0,72
Średnia; Mean		0,37	0,38	0,40	0,51	0,61	0,65
NIR; LSD ($\alpha = 0,05$) dla: for:	{S}*		0,022			0,021	
	{F}		0,022			0,021	
	{I}		0,015			0,014	
współdziałania; interaction	{S} × {F}		0,039			0,036	
	{F} × {S}		0,039			0,036	
	{S} × {I}		0,026			0,025	
	{I} × {S}		0,032			0,030	
	{F} × {I}		0,026			0,025	
	{I} × {F}		0,032			0,030	

* {S} – gleba; soil {F} – nawożenie NPK; fertilization NPK {I} – nawadnianie; irrigation

Tabela 26

Plonowanie roślin (kg · m^{-2}) za lata 1991–1994 (średnie z rotacji)
Crop yields (kg · m^{-2}) for years 1991–1994 (mean values of rotations)

Nawożenie mineralne Fertilization NPK {F}	Ziemniaki – bulwy; Potato – tubers (świeża masa; fresh mass)			Jęczmień jary – ziarno; Spring barley – grain (sucha masa – dry mass)		
	gleba; soil {S}					
	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy
NPK I	6,93	6,82	7,03	0,61	0,58	0,68
NPK I + FYM {M}	7,52	7,02	6,65	0,60	0,61	0,70
NPK II	7,80	7,82	7,30	0,67	0,74	0,75
NPK II + FYM {M}	8,04	8,25	7,02	0,66	0,75	0,76
NPK III	7,67	8,92	8,07	0,74	0,78	0,80
NPK III + FYM {M}	8,33	8,52	8,27	0,71	0,80	0,83
Średnia; Mean	7,71	7,89	7,93	0,66	0,71	0,75
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:	{S}*	0,226			0,023	
	{F}	0,226			0,023	
	{M}	0,601			0,014	
współdziałania; interaction	{S} × {F}	0,398			0,056	
	{F} × {S}	0,398			0,056	
	{S} × {M}	0,225			0,017	
	{M} × {S}	0,321			0,031	
	{F} × {M}	0,225			0,017	
	{M} × {F}	0,321			0,031	

Nawożenie mineralne Fertilization NPK {F}	Rzepak ozimy – nasiona; Winter rape – seeds (sucha masa – dry mass)			Pszenica ozima – ziarno; Winter wheat – grain (sucha masa – dry mass)		
	gleba; soil {S}					
	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy	piaskowa sandy	lessowa loess	gliniasta loamy
NPK I	0,28	0,34	0,28	0,51	0,71	0,79
NPK I + FYM {M}	0,26	0,36	0,29	0,53	0,71	0,77
NPK II	0,39	0,47	0,41	0,66	0,82	0,89
NPK II + FYM {M}	0,39	0,47	0,38	0,66	0,83	0,93
NPK III	0,48	0,60	0,45	0,82	0,87	0,92
NPK III + FYM {M}	0,47	0,57	0,45	0,72	0,89	0,97
Średnia; Mean	0,37	0,47	0,37	0,65	0,80	0,88
NIR; LSD (α = 0,05) dla: for:	{S}*	0,028			0,027	
	{F}	0,028			0,027	
	{M}	0,025			0,014	
współdziałania; interaction	{S} × {F}	0,056			0,038	
	{F} × {S}	0,056			0,038	
	{S} × {I}	0,031			0,029	
	{I} × {S}	0,035			0,030	
	{F} × {M}	0,031			0,029	
	{M} × {F}	0,035			0,030	

* {S} – gleba; soil {F} – nawożenie; fertilization NPK {M} – nawożenie obornikiem; manure FYM

opracowaniach naukowych: dla ziemniaka (47, 50, 114), dla pszenicy (40), dla ziemniaka, jęczmienia jarego, pszenicy ozimej i rzepaku ozimego (123, 126).

Reasumując należy stwierdzić, że plonowanie roślin zależało istotnie od gatunku gleby (tab.25, 26 i 29). Najniższe plony ziemniaka uzyskiwano na glebie lessowej, a jęczmienia jarego i pszenicy ozimej na glebie piaskowej. Najlepiej badane rośliny plonowały na ogół na glebie gliniastej i lessowej, a w przypadku ziemniaka na glebie piaskowej (tab. 29). Plonowanie rzepaku było różne w poszczególnych latach. Korzystny był również wpływ wzrastających dawek NPK na plonowanie roślin (tab. 25, 26, 29). Analiza wariancji plonowania roślin (tab. 25, 29) pozwala stwierdzić, że wpływ nawadniania na plonowanie roślin był wysoce istotny. Plony roślin zależały istotnie od nawożenia mineralnego i nawadniania interwencyjnego, natomiast zależności interakcyjne były istotne dla układu: gleba × nawożenie × nawadnianie (tab. 25). Analiza wariancji wykazała brak istotnego wpływu obornika na plonowanie roślin (tab. 26, 29).

Indeks żniwny (**HI** – ***Harvest Index***) czyli udział plonu głównego (ziarna lub nasion) w całkowitym plonie biomasy roślin: jęczmienia jarego, rzepaku ozimego i pszenicy ozimej obliczono ze wzoru:

$$HI = \frac{Y_g}{Y_t} = \frac{Y_g}{Y_g + Y_S} \quad ,$$

gdzie: HI – indeks żniwny;
Y_g – plon ziarna (kg . m^{-2}),
Y_s – plon słomy (kg . m^{-2}),
Y_t – całkowity plon biomasy (kg . m^{-2}).

Indeks żniwny (HI) dla jęczmienia jarego uprawianego w latach 1979, 1983, 1987 i 1992 mieścił się w zakresie od 0,43 do 0,54, średnio 0,50 (tab. 27). Największą średnią wartość HI – 0,54 stwierdzono w mokrym 1983 roku, a najmniejsza – 0,45 w suchym roku 1987. Nawadnianie istotnie zwiększyło średnią wartość HI, która w obiektach bez nawadniania wyniosła 0,49, a w obiektach z nawadnianiem 0,51. Analiza statystyczna wykazała wysoce istotny wpływ lat (na poziomie $\alpha = 0{,}001$) i istotny wpływ nawadniania interwencyjnego ($\alpha = 0{,}05$) na wartość HI oraz brak istotnego wpływu gleb i poziomu nawożenia NPK na wartości HI plonu jęczmienia jarego.

Indeks żniwny (HI) dla rzepaku ozimego uprawianego w latach 1979, 1983, 1987 i 1992 zawierał się w zakresie od 0,32 do 0,39, średnio 0,34 (tab. 27). Stwierdzono wysoce istotny wpływ lat na HI ($\alpha = 0{,}001$) oraz brak istotnego wpływu gleby, nawożenia NPK i nawadniania na wysokość HI plonu rzepaku ozimego. Nie stwierdzono związku HI z ilością opadów atmosferycznych. Pokrywało się to z brakiem różnic wartości HI w plonie roślin z obiektów z nawadnianiem i bez nawadniania.

Indeks żniwny (HI) dla pszenicy ozimej uprawianej w latach 1981, 1985, 1989 i 1994 mieścił się w przedziale od 0,43 do 0,50, średnio 0,47 (tab. 27). Analiza statystyczna wykazała wysoce istotny wpływ lat na wartość indeksu żniwnego HI (na poziomie $\alpha = 0{,}001$). Stwierdzono również związek wartości HI z wielkością

Tabela 27

Wartości średnie indeksu żniwnego (HI) dla poszczególnych roślin
Mean values of Harvest Index (HI) for crop plans

Gleba; Soil	Jęczmień jary; Spring barley				Średnia dla gleby Mean for soil
	1979	1983	1987	1992	
Piaskowa; Sandy	0,51	0,54	0,46	0,50	0,50[a]
Lessowa; Loess	0,51	0,54	0,43	0,50	0,49[a]
Gliniasta; Loamy	0,49	0,54	0,46	0,50	0,50[a]
Średnia dla lat; Mean for years	0,50[a]	0,54[b]	0,45[c]	0,50[a]	0,50
Zakres; Range	0,43–0,54				
	Rzepak ozimy; Winter rape				
	1980	1984	1988	1993	
Piaskowa; Sandy	0,33	0,35	0,33	0,39	0,35[a]
Lessowa; Loess	0,32	0,34	0,30	0,37	0,33[a]
Gliniasta; Loamy	0,32	0,34	0,32	0,36	0,34[a]
Średnia dla lat; Mean for years	0,32[a]	0,34[b]	0,32[a]	0,37[c]	0,34
Zakres; Range	0,32–0,39				
	Pszenica ozima; Winter wheat				
	1981	1985	1989	1994	
Piaskowa; Sandy	0,45	0,49	0,45	0,50	0,47[a]
Lessowa; Loess	0,45	0,49	0,44	0,48	0,47[a]
Gliniasta; Loamy	0,47	0,48	0,43	0,48	0,47[a]
Średnia dla lat; Mean for years	0,46[a]	0,49[b]	0,44[c]	0,49[b]	0,47
Zakres; Range	0,43–0,50				

Wartości oznaczone różnymi literami różnią się istotnie ($\alpha < 0,05$); Values followed by different letters are significantly different ($\alpha < 0,05$)

opadów. Największa wartość HI wyniosła 0,49 w latach mokrych (1985 i 1994), a najniższa 0,44 w roku suchym (1989). Stwierdzono wysoce istotny wpływ nawożenia mineralnego NPK ($\alpha = 0,001$) na wartość HI, największe wartości – 0,48 zanotowano przy NPK I, a najniższe – 0,45 przy NPK III. Analiza statystyczna wykazała brak istotnego wpływu gleby i nawadniania na wartość HI w plonie pszenicy ozimej.

6.4. BILANS WODNY GLEB I RZECZYWISTE ZUŻYCIE WODY (WU) PRZEZ ROŚLINY W ZALEŻNOŚCI OD BADANYCH CZYNNIKÓW

Bilans wodny gleb wyrażający rzeczywiste zużycie wody (WU) za lata 1978–1989 i 1991–1994 przedstawiono w tabeli 28. W zestawieniach tych zawarto zakresy wartości WU: w rotacjach zmianowania za lata 1978–1989 w zależności od rodzaju gleby, nawożenia NPK, nawadniania interwencyjnego i ugorowania gleby (tzw. czarny ugór) oraz za lata 1991–1994 dodatkowo uwzględniając obiekty z obornikiem.

W pierwszej rotacji zmianowania (C-I) 1978–1981, rzeczywiste zużycie wody w obiektach ugorowanych było 2-krotnie mniejsze niż z gleb pod roślinami.

Tabela 28

Zakresy rzeczywistego zużycia wody w okresie wegetacji roślin (mm)
Ranges of water use during the growth period (mm)

Okres Period	1978–1981 zmianowanie I crop rotation I		1982–1985 zmianowanie II crop rotation II		1986–1989 zmianowanie III crop rotation III		1991–1994 zmianowanie IV crop rotation IV	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Gleba piaskowa; Sandy soil								
NPK I	238,6	423,6	199,0	350,1	241,0	395,7	152,7	379,8
NPK I + {I}* (+{M})**	400,4	517,3	296,7	408,5	354,4	450,7	125,2	356,5
NPK II	259,2	462,6	222,6	386,5	211,4	425,4	174,0	409,2
NPK II + {I} (+{M})	407,0	546,8	359,8	418,5	377,0	460,0	127,2	408,8
NPK III	252,0	471,9	218,3	413,0	256,5	406,6	209,8	407,7
NPK III +{I} (+{M})	416,8	568,8	384,8	451,5	413,9	533,1	165,6	399,3
Ugór; Fallow	131,1	309,5	119,6	272,5	196,8	318,5	100,7	274,5
Gleba lessowa; Loess soil								
NPK I	302,5	468,3	219,2	367,2	225,1	404,3	201,4	447,1
NPK I + {I} (+{M})	440,5	545,5	353,4	430,5	395,2	482,2	173,1	438,4
NPK II	305,7	466,3	252,0	408,2	292,1	402,9	238,6	451,1
NPK II + {I} (+{M})	437,5	568,7	391,9	441,4	368,6	522,9	221,0	454,5
NPK III	321,9	497,8	236,6	441,5	243,4	426,4	242,4	450,7
NPK III +{I} (+{M})	466,6	608,7	427,0	474,1	425,3	551,5	187,8	448,9
Ugór; Fallow	167,8	238,0	142,6	343,0	169,7	353,6	111,1	336,3
Gleba gliniasta; Loamy soil								
NPK I	274,5	430,3	172,5	373,9	199,8	379,5	145,0	365,7
NPK I + {I} (+{M})	377,0	528,4	318,8	445,9	345,2	463,6	127,5	369,9
NPK II	218,4	435,9	172,3	430,5	172,1	397,8	170,0	391,1
NPK II + {I} (+{M})	399,1	523,6	352,2	481,6	357,7	479,2	153,2	369,8
NPK III	287,2	469,9	149,3	443,3	248,6	409,3	163,3	398,8
NPK III +{I} (+{M})	410,1	559,5	364,6	460,1	344,7	494,2	159,0	402,1
Ugór; Fallow	131,8	334,5	77,2	200,5	158,6	302,2	95,0	245,1

* NPK I; II; III + {I} – nawożenie NPK + nawadnianie; ferilization NPK + irrigation – 1978–1989
** NPK I; II; III + {M} – nawożenie NPK + obornik; fertilization NPK + manure – 1991–1994

W glebie piaskowej wartości WU wahały się w zakresie od 238,6 do 568,8 mm, a w obiektach ugorowanych od 131,1 do 309,5 mm. W glebie lessowej wartości WU były wyższe i mieściły się w zakresie od 302,5 do 608,7 mm przy uprawie roślin, a na ugorze od 167,8 do 238,0 mm. W glebie gliniastej uzyskane zakresy wartości rzeczywistego zużycia wody były zbliżone do uzyskanych dla gleby piaskowej i wyniosły odpowiednio: od 218,4 do 559,5 mm i od 131,8 do 334,5 mm.

W drugiej rotacji zmianowania (C-II) 1982–1985, wartości rzeczywistego zużycia wody były niższe w związku z mniejszą sumą opadów w tym okresie (851,6 mm) w porównaniu z rotacją pierwszą (1164,8 mm). W glebie piaskowej wartości WU mieściły się w zakresie: 199,0–451,5 mm pod roślinami i 119,6–272,5 mm na ugorze. W glebie lessowej zakresy WU były nieco wyższe i wyniosły: 219,2–474,1 mm pod roślinami i 142,6–343,0 mm na ugorze. W glebie gliniastej zakresy WU wynosiły 149,3–481,6 mm pod roślinami i 77,2–200,5 mm na ugorze.

W trzeciej rotacji zmianowania (C-III) 1986–1989, rzeczywiste zużycie wody było zbliżone do pierwszej rotacji. Związane to było z podobną ilością opadów w tych okresach (1164,8 i 1015,0 mm). Zakresy rzeczywistego zużycia wody w obiektach pod roślinami były znacznie wyższe niż w glebach ugorowanych. W glebie piaskowej wynosiły one odpowiednio: 211,4–533,1 mm pod roślinami i 196,8–318,5 mm na ugorze, w glebie lessowej 225,1–551,5 mm i 169,7–353,6 mm, a w glebie gliniastej 172,1–494,2 mm i 158,6–302,2 mm.

W czwartej identycznej rotacji zmianowania roślin (C-IV) 1991–1994, suma opadów wyniosła 667,7 mm i była niższa w porównaniu z latami wcześniejszymi. Spowodowało to, że zakresy rzeczywistego zużycia wody były tu najniższe w porównaniu z rotacjami wcześniejszymi i wyniosły: w glebie piaskowej 125,2–409,2 mm pod roślinami i 100,7–274,5 mm na ugorze, i odpowiednio: w glebie lessowej 173,1–454,5 mm i 111,1–336,3 mm a w glebie gliniastej 127,5–402,1 mm i 95,0–245,1 mm.

We wszystkich latach badań obserwowano niższe rzeczywiste zużycie wody w obiektach ugorowanych w porównaniu z obiektami obsianymi. Znalazło to swoje odbicie w dużej ilości uzyskanych przesączy z obiektów ugorowanych. Wyniki badań własnych (26) wykazały, że przesiąk wody z gleb stanowił istotną pozycję ich bilansu wodnego, gdyż w stosunku do sumy opadów i nawadniania może dochodzić na glebie piaskowej ugorowanej do 55%. W niniejszych badaniach największy odpływ wody (w stosunku do sumy opadów i nawodnień) stwierdzono z gleb ugorowanych i wyniósł on z gleby piaskowej 47,9%, z gleby gliniastej 47,8% i mniej z gleby lessowej – 32,2%. Również Ślusarczyk i in. (152) stwierdzili, że odpływ wgłębny wody w glebach piaskowych może, w okresie wegetacyjnym, przekraczać 50% ilości wody opadowej i dostarczonej w formie nawodnień.

Analiza wariancji wykazała istotny wpływ rotacji zmianowania roślin na średnią wartość rzeczywistego zużycia wody przez rośliny (WU); (tab. 29). Największe WU stwierdzono w latach 1978–1981 (średnio 409,1 mm), nieco mniejsze w latach 1982–1985 (średnio 346,9 mm) i najmniejsze w latach 1991–1994 (średnio 291,2 mm). Rzeczywiste zużycie wody (WU) było zróżnicowane w okresach zmianowania roślin i zależało od warunków meteorologicznych, głównie od ilości opadów. Podobną zależność wykazali Dzieżyc (34), Nagowiecka (98), Trybała (157), Yang i Lu (162), którzy stwierdzili większe polowe zużycie wody w latach mokrych niż suchych.

Wyniki 16-letnich badań własnych wykazały wysoce istotny wpływ roślin na wartość rzeczywistego zużycia wody (WU); (tab. 29). Wartości te wyniosły średnio dla ziemniaków 376,9 mm, dla jęczmienia jarego 357,4 mm, dla rzepaku ozimego 383,7 mm, a dla pszenicy ozimej 287,6 mm. Dane te obejmują średnie wartości rzeczywistego zużycia wody w ciągu 16-letniego okresu badań dla wszystkich obiektów doświadczenia i testowanych roślin. Rzeczywiste zużycie wody podlega dynamicznym zmianom zależnie od czynników doświadczenia (gleba, nawożenie NPK, nawadnianie).

Tabela 29

Zależności proste między badanymi czynnikami agrotechnicznymi
Effect of single factors over the whole period for experimental treatment

Wyszczególnienie Specification	Y	WU	UWC	WUE
Gleba; Soil {S}				
Poziom istotności Significance level	0,050	0,011	0,166	0,053
Piaskowa; Sandy {S_1}	0,788	348,6	611,3	2,34
Lessowa; Loess {S_2}	0,816	377,7	614,9	2,25
Gliniasta; Loamy {S_3}	0,850	335,6	532,8	2,76
Roślina; Plant				
Poziom istotności Significance level	0,000	0,000	0,000	0,000
Ziemniaki; Potato	1,628	376,9	247,1	4,43
Jęczmień jary; Spring barley	0,617	357,4	582,4	1,78
Rzepak ozimy; Winter rape	0,390	383,7	1025,2	1,08
Pszenica ozima; Winter wheat	0,638	297,6	490,7	2,51
Nawożenie NPK; NPK Fertilization {F}				
Poziom istotności Significance level	0,032	0,121	0,029	0,019
I {F_1}	0,708	338,7	659,7	2,22
II {F_2}	0,834	354,9	563,2	2,49
III {F_3}	0,912	368,2	536,3	2,63
Nawadnianie; Irrigation {I}				
Poziom istotności Significance level	0,050	0,000	0,012	0,009
- H_2O {I_0}	0,70	312,4	585,4	2,33
+ H_2O {I_1}	0,84	437,2	704,6	1,88
Nawożenie obornikiem; Manure {M}				
Poziom istotności Significance level	0,088	0,749	0,820	0,617
- FYM {M_0}	0,942	294,7	416,8	3,34
+ FYM {M_1}	0,962	287,6	404,2	3,58
Rotacja; Crop rotation {C}				
Poziom istotności Significance level	0,002	0,000	0,000	0,000
C – I	0,886	409,1	632,5	2,26
C – II	0,620	346,9	644,7	1,94
C – III	0,814	368,5	657,9	2,13
C – IV	0,952	291,2	410,5	3,46

Y – plon (kg s.m. · m^{-2}); yield (kg dry matter · m^{-2})
WU – rzeczywiste zużycie wody; water use (mm)
UWC – jednostkowe zużycie wody (kg H_2O · kg^{-1} s.m. plonu); unit water consumption (kg H_2O · kg^{-1} dry matter yield)
WUE – wskaźnik wydajności zużycia wody (g s.m. plonu · mm^{-1} H_2O · m^{-2}); water use efficience (g dry matter yield · m^{-1} H_2O · m^{-2})

Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez ziemniak (rys. 22) w latach 1978, 1982, 1986, 1991 mieściło się w zakresie od 199,0 do 533,1 mm na glebie piaskowej, od 219,2 do 551,6 mm na glebie lessowej i od 204,3 do 511,9 mm na glebie gliniastej. Najniższe wartości WU obserwowano na wszystkich glebach nawożonych NPK I w najsuchszym 1982 roku (suma opadu była w okresie wegetacji roślin mniejsza o 157,6 mm od średniej wieloletniej). Wartości najwyższe WU stwierdzono natomiast przy poziomie nawożenia NPK III w obiektach z nawadnianiem gleby piaskowej i lessowej (1986 r.) oraz przy NPK II we wszystkich obiektach z nawadnianiem (1978 r.). Lata te charakteryzowały się większą sumą opadów od średniej wieloletniej odpowiednio o 79,0 mm (1978 r.) i o 26,2 mm (1986 r.).

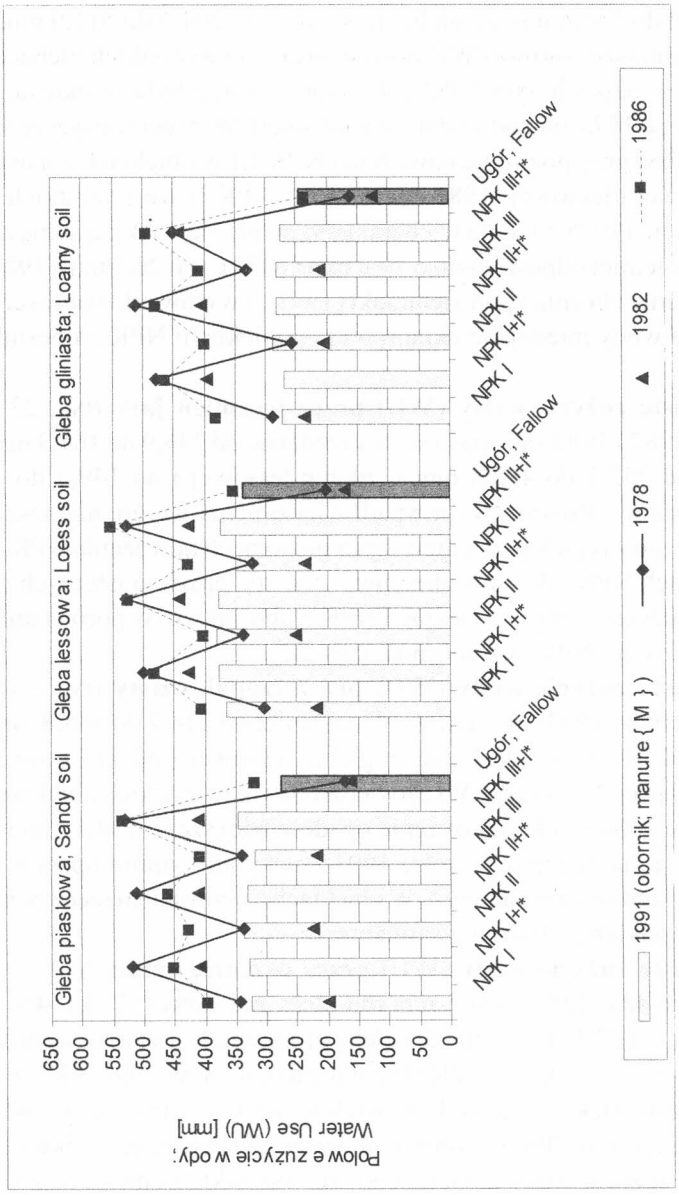
Zastosowanie obornika pod ziemniaki (1991 r.) wyrównało wartości rzeczywistego zużycia wody między obiektami NPK i obiektami NPK z obornikiem (rys. 22).

Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez jęczmień jary (rys. 23) w latach 1979, 1983, 1987 i 1992 zawierało się w przedziale od 246,9 do 464,3 mm w glebie piaskowej, od 253,1 do 492,6 mm w glebie lessowej i od 149,3 do 432,2 mm w glebie gliniastej. Również w przypadku jęczmienia jarego, najniższe wartości WU stwierdzano z reguły przy najniższych poziomach nawożenia NPK, a najwyższe w obiektach NPK III z nawadnianiem. Nie stwierdzono istotnych różnic rzeczywistego zużycia wody w obiektach NPK z obornikiem w porównaniu z obiektami z nawożeniem NPK bez obornika (rys. 22).

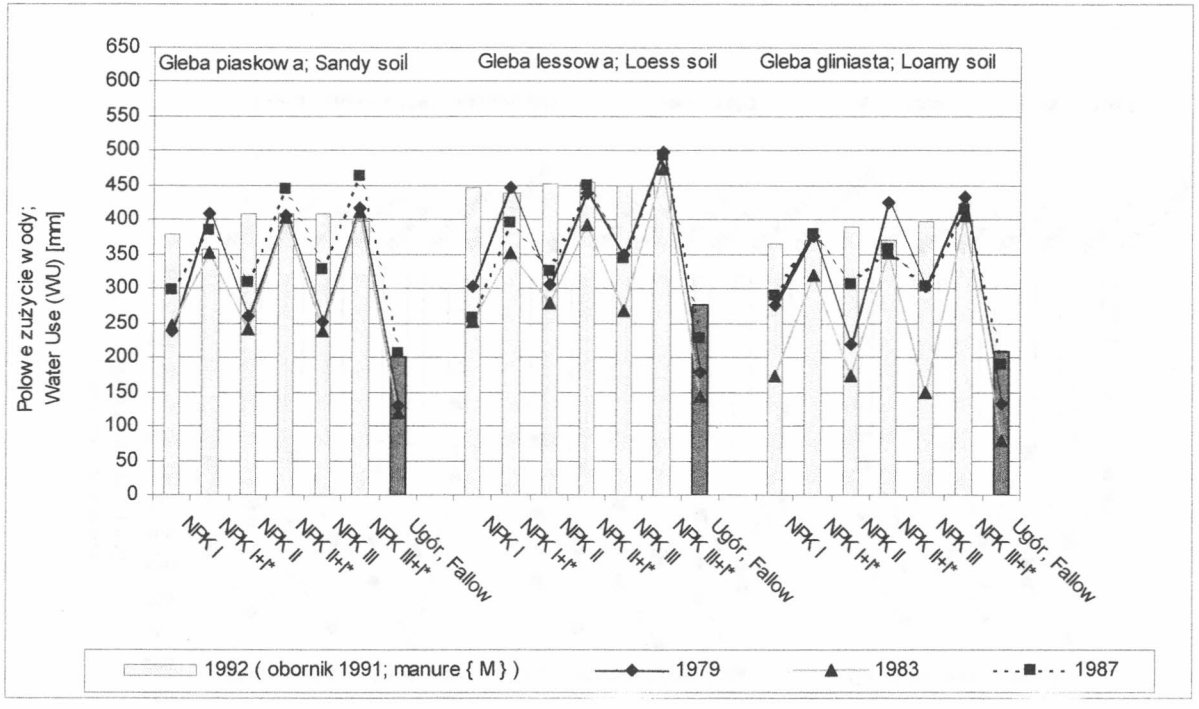
Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez rzepak ozimy (rys. 24) w latach 1980, 1984, 1988 i 1993) mieściło się w zakresie: od 248,7 do 568,8 mm w glebie piaskowej, od 242,4 do 608,7 mm w glebie lessowej i od 217,6 do 559,4 mm w glebie gliniastej. Najwyższe WU stwierdzono we wszystkich obiektach NPK III + H_2O w roku 1980 (mokrym, o sumie opadów większej o 134,4 mm od średniej wieloletniej), a najmniejsze w roku 1993 (suchym, o sumie opadów mniejszej o 94,3 mm od średniej wieloletniej). W obiektach z obornikiem rzeczywiste zużycie wody we wszystkich glebach było zbliżone.

Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez pszenicę ozimą (rys. 25) mieściło się w przedziałach: 125,2–434,5 mm dla gleby piaskowej; 173,1–466,6 mm dla gleby lessowej i 127,5–410,1 mm dla gleby gliniastej. Najwyższe wartości zużycia wody stwierdzono obiektach NPK III z nawadnianiem w roku 1981 (z sumą opadów o 10,8 mm większą od średniej wieloletniej), a najniższe w roku 1994 we wszystkich obiektach NPK z obornikiem. Interesujące jest, że w roku 1994 najniższe wartości zużycia wody stwierdzono we wszystkich obiektach z obornikiem (w czwartym roku po jego zastosowaniu).

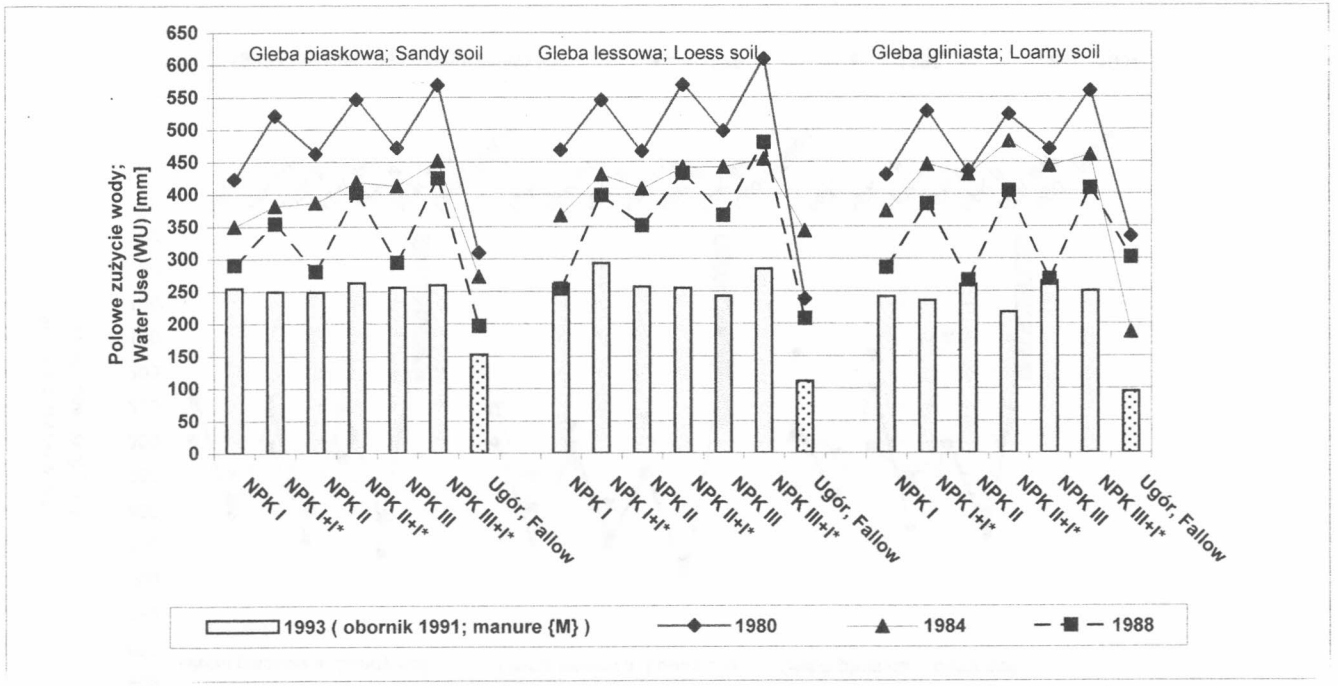
Analiza wariancji wykazała wysoce istotny **wpływ gleb** na rzeczywiste zużycie wody przez rośliny uprawne (tab. 29). Zakresy i średnie wartości rzeczywistego zużycia wody przez rośliny w ciągu 16 lat badań (rys. 26) były niższe w glebie piaskowej i gliniastej i wynosiły odpowiednio: 125,2–568,8 mm i 348,6 mm oraz 127,5–559,5 mm i 335,6 mm. W glebie lessowej wartości te były wyższe i wyniosły



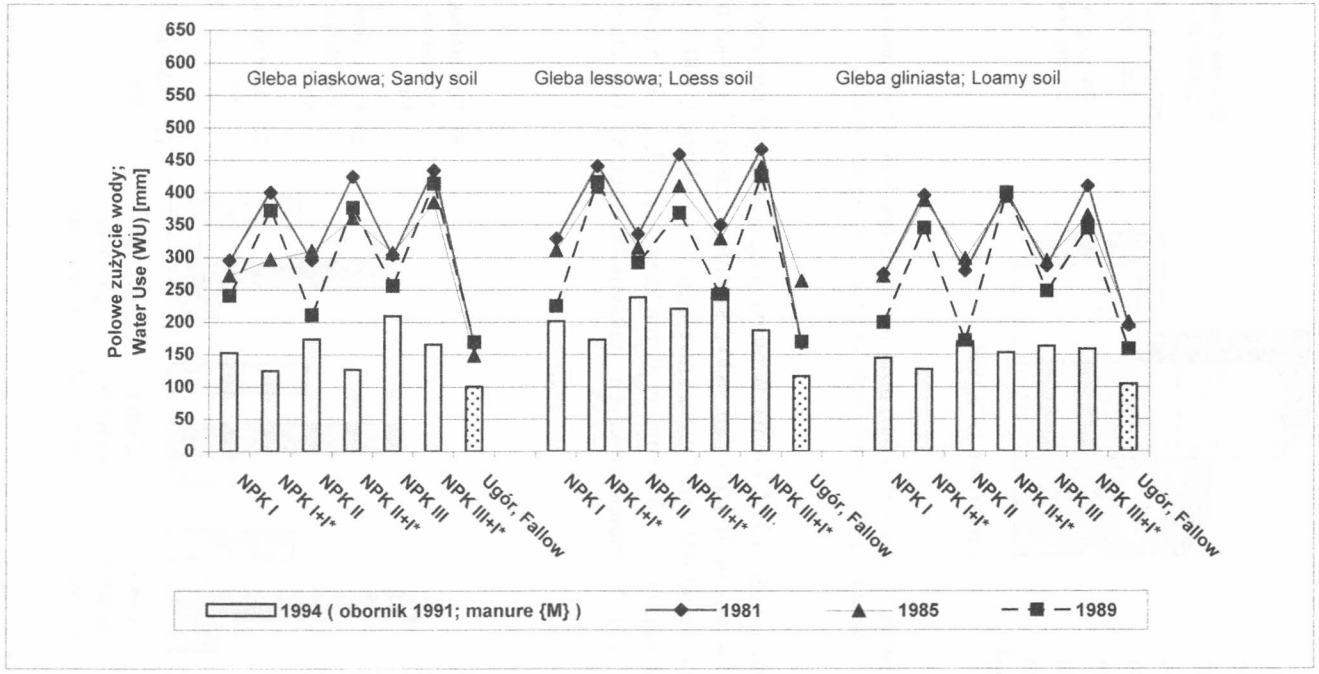
Rys. 22. Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez ziemniaki – wartości średnie z 4 lat badań
Water use (WU) by potato – mean values in 4 years



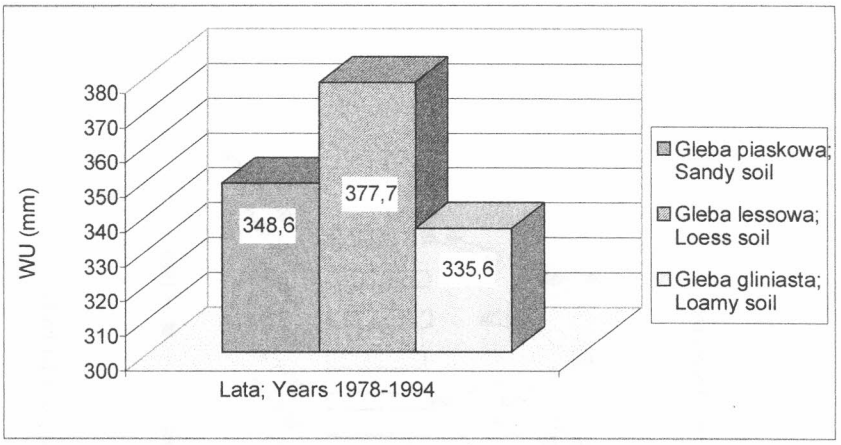
Rys. 23. Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez jęczmień jary – wartości średnie z 4 lat badań
Water use (WU) by spring barley – mean values in 4 years



Rys. 24. Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez rzepak ozimy – wartości średnie z 4 lat badań
Water use (WU) by winter rape – mean values in 4 years

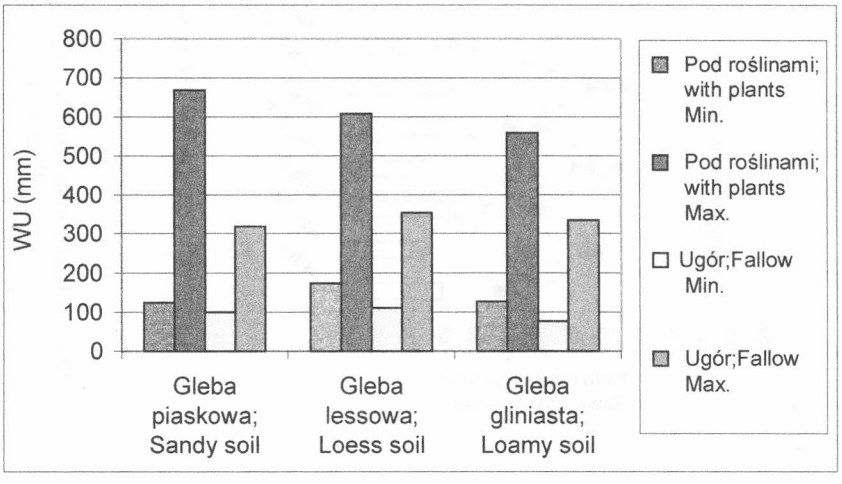


Rys. 25. Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez pszenicę ozimą – wartości średnie z 4 lat badań
Water use (WU) by winter wheat – mean values in 4 years



Rys. 26. Rzeczywiste zużycie wody (WU) przez rośliny na trzech glebach (wartości średnie)
Water use (WU) for all plants for three soils – mean values

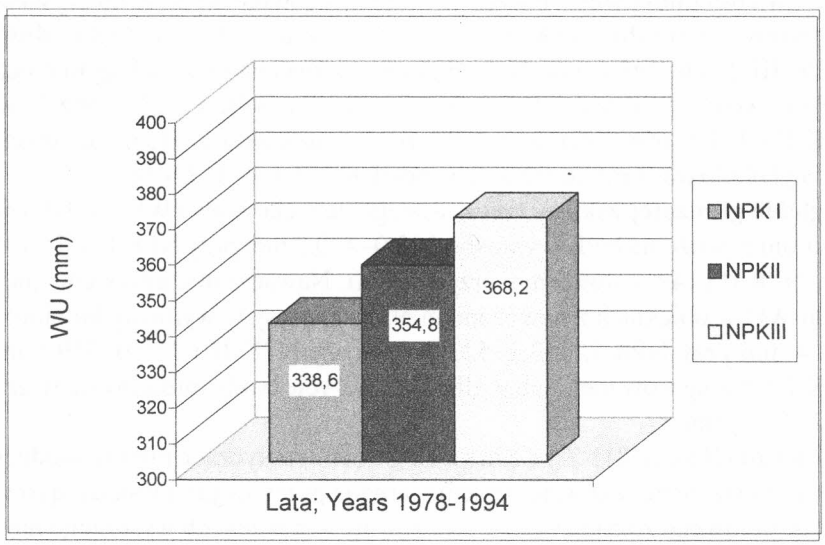
173,1–608,7 mm (średnio 377,7 mm). W glebach ugorowanych rzeczywiste zużycie wody (WU) w okresie 16 lat badań, było 2-krotnie a czasem 3–(4)-krotnie niższe w porównaniu z obiektami z roślinami i mieściło się w zakresie: 100,7–318,5 mm w glebie piaskowej, 111,1–356,0 mm w glebie lessowej i 77,2–334,5 mm w glebie gliniastej (rys. 27). W latach mokrych maksymalne rzeczywiste zużycie wody



Rys. 27. Minimalne i maksymalne zakresy rzeczywistego zużycia wody (WU) w obiektach pod roślinami i w glebie ugorowanej w okresie 16 lat badań
Range (minimum and maximum) of water use (WU) in treatment with plants and in fallow soils for 16 years

w glebie ugorowanej było większe niż minimalne rzeczywiste zużycie wody w obiektach z roślinami. Inni autorzy (42, 134, 157) uzyskali zbliżone wartości polowego zużycia wody w glebach piaskowych (280–320 mm). R o g u s k i i G a b r y c h (119) wykazali, że polowe zużycie wody przez pszenicę ozimą na glebach wytworzonych z piasków gliniastych mocnych wahało się od 330 do 450 mm, a F o t y m a i in. (49) – w zakresie od 240 do 330 mm (tylko w okresie maj - lipiec). Wyniki badań M a r c i l o n k a (95) oraz T r y b a ł y (157) dowodzą, że polowe zużycie wody na glebach lekkich jest mniejsze niż na glebach zwięzłych, z uwagi na małą ich pojemność wodną oraz dużą przesiąkliwość. W niniejszych badaniach uzyskano niższe wartości rzeczywistego zużycia wody przez rośliny na glebie gliniastej, w porównaniu z glebą lessową. Zjawisko to można wyjaśnić znacznie większym przesiąkiem wody z gleby gliniastej (średnio 18,3% za 16 lat badań w stosunku do sumy opadów i nawodnień) w porównaniu z glebą lessową (przesiąk wyniósł tu średnio 7,9%). Szereg autorów (102, 140, 147, 153, 163) uważa, że retencja wodna zależy od struktury i ogólnej powierzchni cząstek glebowych (33, 149). Wielu autorów (34-37, 49, 119, 132) wyraża pogląd, że rodzaj i gatunek gleby warunkują polowe zużycie wody.

Wzrastające nawożenie NPK zwiększyło rzeczywiste zużycie wody (WU). Wzrost ten był jednak statystycznie nieistotny (tab. 29 i rys. 28). W okresie 16-letnich badań średnie zużycie wody wyniosło dla NPK I – 338,6 mm, NPK II – 354,9 mm i NPK III – 368,2 mm. Statystycznie istotny wzrost zużycia wody pod wpływem nawożenia azotowego stwierdzili w doświadczeniach polowych I g r a s



Rys. 28. Wpływ poziomu nawożenia NPK na rzeczywiste zużycie wody (WU) przez wszystkie rośliny
Effects of mineral fertilization NPK on water use (WU) for all plants

i Jankowiak (63). Zdaniem Ślusarczyka (151) zależność pomiędzy polowym zużyciem wody a nawożeniem mineralnym ujawnia się jedynie w okresie intensywnego wzrostu roślin, a więc w okresie intensywnej rzeczywistej transpiracji. Również inni autorzy (34, 61, 100, 109, 134, 137, 141) nie stwierdzili istotnych różnic między dawką azotu a polowym zużyciem wody w całym okresie wegetacji roślin. Inne wyniki w tym zakresie uzyskali Buniak i in. (17) i Karczmarczyk i in. (73) którzy stwierdzili wzrost polowego zużycia wody, zarówno przez rośliny zbożowe jak i okopowe na glebach lekkich pod wpływem nawożenia. W badaniach przeprowadzonych na piasku gliniastym Kuś (85) wykazał zmniejszenie zapasu wody ogólnie dostępnej w obiektach z nawożeniem wzrastającymi dawkami NPK. Świadczy to o wyższym zużyciu wody w tych obiektach.

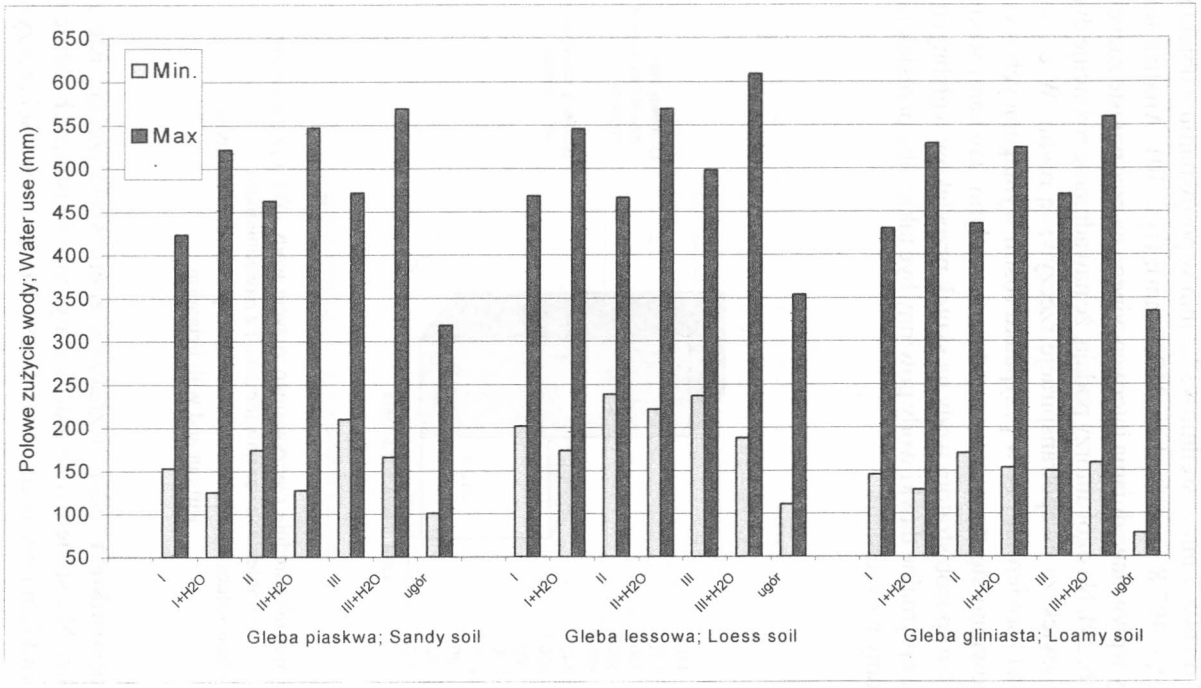
Stwierdzono wpływ **współdziałania poziomu nawożenia mineralnego i nawadniania interwencyjnego** na rzeczywiste zużycie wody przez rośliny w okresie intensywnego ich wzrostu (rys. 29).

W glebie piaskowej przy poziomie NPK I, rzeczywiste zużycie wody mieściło się w zakresie 152,7–423,6 mm, przy NPK II zakres ten wzrósł i wyniósł 174,0–462,6 mm, a przy NPK III był zbliżony do NPK II i wynosił 209,8–471,9 mm. Interwencyjne nawadnianie zwiększyło rzeczywiste zużycie wody w glebie piaskowej i wzrost ten wyniósł średnio: NPK I od 125,2 do 521,6 mm, NPK II od 127,2 do 546,8 mm i NPK III od 165,6 do 568,8 mm. W glebie piaskowej ugorowanej zakres wartości WU był dwukrotnie niższy i mieścił się w przedziale od 100,7 do 318 mm.

W glebie lessowej stwierdzono najwyższe zakresy rzeczywistego zużycia wody (WU) w 16-letnim okresie badań. W zależności od dawki NPK rzeczywiste zużycie wody wynosiło: NPK I 201,4–468,3 mm, NPK II 238,6–466,3 mm i NPK III 236,6–497,8 mm. Nawadnianie interwencyjne zwiększyło rzeczywiste zużycie wody w zakresie: 173,1–545,5 mm przy NPK I, 221,0–568,7 mm przy NPK II i 187,8–608,7 mm przy NPK III. Na ugorowanej glebie lessowej zakres WU był około dwukrotnie niższy i wynosił od 111,1 do 353,6 mm.

W glebie gliniastej zakresy rzeczywistego zużycia wody (WU) w zależności od poziomu nawożenia NPK wyniosły: 145,0–430,3 mm przy NPK I, 170–435,9 mm przy NPK II i 149,3–469,9 mm przy NPK III. Nawadnianie interwencyjne zwiększyło WU w obiektach z nawożeniem NPK, zakresy te wyniosły kolejno: 127,5–528,4 mm przy NPK I, 153,2–523,6 mm przy NPK II i 159,0–559,5 mm przy NPK III. Na ugorowanej glebie gliniastej zużycie wody mieściło się w granicach 77,2–334,5 mm.

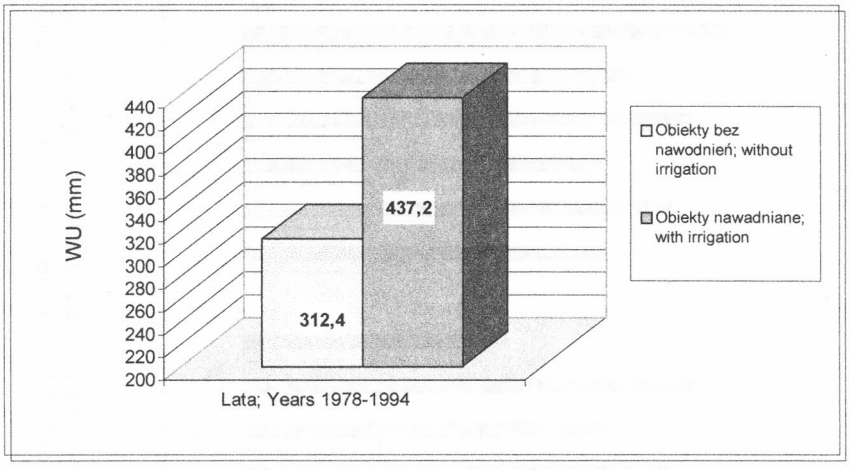
Badania Baca (8) i Żyromskiego (165) dotyczące bilansu wodnego gleb przy uprawie ziemniaków, jęczmienia jarego i pszenicy jarej wskazują również na wzrost polowego zużycia wody przez rośliny w warunkach wysokiego nawożenia mineralnego i nawadniania (z uwagi na wzrost plonów roślin). Dziężyc (37) uważa natomiast, że polowe zużycie wody w okresie wegetacji roślin nie zależy od dynamiki przyrostu masy, a jego wzrost następuje w wyniku nawadniania.



Rys. 29. Zakresy rzeczywistego zużycia wody (WU) przez rośliny pod wpływem nawożenia NPK i nawadniania interwencyjnego
Ranges of water use (WU) for all plants as effects of mineral fertilization and irrigation

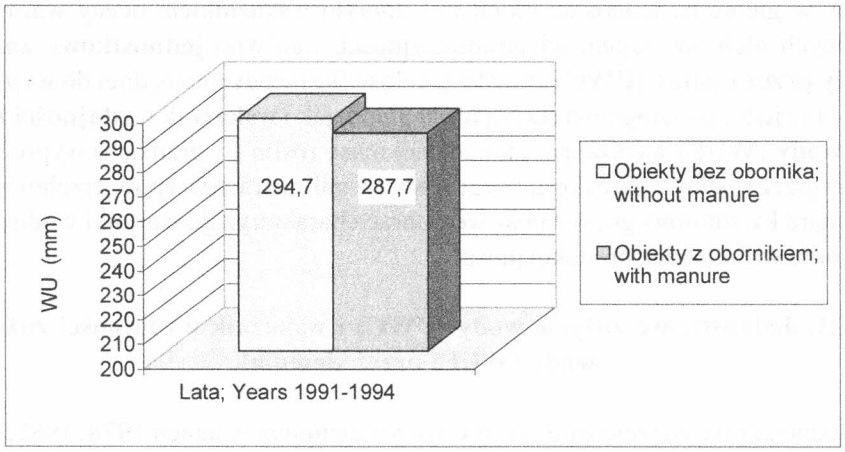
K o s z a ń s k i i in. (80) wykazał również, że nawadnianie i wzrastające nawożenie azotem zwiększa plon i polowe zużycie wody przez ziemniak.

Nawadnianie zwiększało rzeczywiste zużycie wody, które mieściło się w zakresie od 296,7 do 608,7 mm – średnio 437,2 mm w porównaniu z obiektami bez nawodnień (149,3–497,8 mm; średnio 312,4 mm); (rys. 30). Analiza wariancji wykazała istotny wpływ nawadniania interwencyjnego na rzeczywiste zużycie wody przez rośliny (tab. 29). Na ogół autorzy podają, że nawadnianie różnicuje dynamikę zużycia wody i zwiększa ewapotranspirację rzeczywistą roślin. W e s s o l e k i R e n g a r (161) stwierdzili, że w przypadku roślin wymagających wysokiego nawadniania, powinno się stosować nawadnianie małymi dawkami wody, przeciwdziałając w ten sposób stratom wody na skutek przesiąków wgłębnych. Autorzy ci podają, że optymalne dawki wody powinny być takie, aby przesiąk nie przekraczał 12% (sumy nawodnień).



Rys. 30. Wartości średnie rzeczywistego zużycia wody (WU) przez rośliny w obiektach bez nawadniania i z nawadnianiem
Mean values of water use (WU) for all plants for treatments without and with irrigation

Nawożenie obornikiem tylko nieznacznie zmniejszyło rzeczywiste zużycie wody przez rośliny. Nie stwierdzono jednak statystycznie istotnych różnic między obiektami z obornikiem i bez obornika (tab. 29). Średnie wartości rzeczywistego zużycia wody przez rośliny wyniosły w obiektach bez obornika 294,7 mm, natomiast w obiektach z obornikiem 287,7 mm (rys. 31). Nawożenie obornikiem, szczególnie gleb lekkich, wpływa na poprawę ich struktury i retencji wodnej. T h o m p s o n i T r o e h (153) uważają, że zawartość 1% materii organicznej odpowiada 13 gramom w 1 dcm^3 gleby. Dlatego dodatek substancji organicznej do gleby pia-



Rys. 31. Wartości średnie rzeczywistego zużycia wody (WU) przez rośliny w obiektach bez i z obornikiem
Mean values of water use WU (mm) for treatments without and with manure

skowej jest znaczący. Wpływ substancji organicznej (obornika) na zdolność magazynowania wody jest większy w glebach piaskowych niż w glebach drobnoziarnistych. Jest to związane z tworzeniem się agregatów organiczno-mineralnych otoczonych wspólną błonką wodną. Z uwagi na to, że gleby gruboziarniste zatrzymują mniejsze ilości wody, ich produktywność zależy od częstotliwości opadów lub nawodnień. W badaniach własnych wykazano, że dodatek obornika zmniejszył rzeczywiste zużycie wody w wyniku ekonomiczniejszego wykorzystania wody z gleby i poprzez wzrost plonów roślin ograniczył ewaporację z powierzchni gleby (zacienienie). P a n e k i in. (105) potwierdzają wpływ obornika na poprawę stosunków wodnych i pozytywne ich oddziaływanie na polowe zużycie wody w glebach lekkich. Również wieloletnie badania, z corocznym wprowadzaniem do gleby obornika w ilości 35 t/ha, wykazały poprawę warunków fizycznych gleb i ograniczenie zużycia wody przez rośliny (112).

Reasumując stwierdzono, że rzeczywiste zużycie wody (WU) zależy od naturalnych czynników przyrodniczych (gleba, opad, temperatura) i zamierzonej działalności człowieka (agrotechniki: rośliny uprawnej i stosowania nawadniania).

6.5. WSKAŹNIKI ZUŻYCIA I WYKORZYSTANIA WODY PRZEZ ROŚLINY UPRAWNE

Nieodzowna do plonowania roślin jest odpowiednia zawartość wody w glebie oraz prawidłowy rozkład opadów w okresie wegetacji, szczególnie w okresach krytycznych. Baledev Singh i in.(11) uważa, że współczynnik wykorzystania

wody w glebie na jednostkę plonu jest dobrym wskaźnikiem oceny warunków wodnych gleb pod kątem ich produkcyjności. Zarówno **jednostkowe zużycie wody przez rośliny (UWC)** określające ilość (kg) wody niezbędnej do wyprodukowania jednego kilograma suchej masy plonu, jak i **wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE)** wyrażający plon suchej masy roślin (w gramach) wyprodukowany przez rośliny z określonej ilości wody (w milimetrach) na powierzchni jednego metra kwadratowego, stosunkowo dobrze charakteryzują warunki wodne gleb z punktu widzenia ich produkcyjności.

6.5.1. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez ziemniak

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez ziemniak w latach 1978, 1982, 1986 i 1991 (tab. 30) mieściło się w zakresie od 130,6–490,8 (średnio 247,1) kg H_2O/kg s.m. plonu. W glebie piaskowej jednostkowe zużycie wody zawierało się w przedziale od 165,9 do 356,3 (średnio 236,1) kg H_2O/kg s.m. plonu, najwyższe było w glebie lessowej od 146,4 do 490,8 (średnio 276,6) kg H_2O/kg s.m. plonu, a najniższe w glebie gliniastej od 130,6 do 376,1 (średnio 228,6) kg H_2O/kg s.m. plonu (tab. 30 i rys. 32).

Wzrost dawek NPK istotne zmniejszał jednostkowe zużycie wody przez ziemniak. Największe jednostkowe zużycie wody stwierdzono przy NPK I (średnio 276,9 kg H_2O/kg s.m. plonu), nieco niższe przy NPK II (239,1 kg H_2O/kg s.m. plonu) i najniższe przy NPK III (225,2 kg H_2O/kg s.m. plonu).

Nawadnianie istotnie zwiększyło jednostkowe zużycie wody przez ziemniak. W obiektach bez nawadniania wyniosło ono średnio 242,4 kg H_2O/kg s.m. plonu ziemniaka, natomiast w obiektach z nawadnianiem wartość ta była znacznie wyższa i wyniosła średnio 302,0 kg H_2O/kg s.m. plonu.

Obornik zastosowany w 1991 roku zmniejszył jednostkowe zużycie wody przez ziemniak: w obiektach bez obornika wartość ta wyniosła średnio 173,6 kg H_2O/kg s.m. plonu, natomiast w obiektach z obornikiem – 169,9 kg H_2O/kg s.m. plonu.

Stwierdzono istotny wpływ poszczególnych lat badań na jednostkowe zużycie wody przez ziemniak (26). Średnie wartości tego wskaźnika dla ziemniaka w poszczególnych latach w kg H_2O/kg s.m. plonu wyniosły: 220,3 (1978 r.), 333,9 (1982 r.), 262,6 (1986 r.) i 171,8 (1991 r.).

Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez ziemniak w latach 1978, 1982, 1986 i 1991 (tab. 31) zawierał się w zakresie od 2,0 do 7,7 (średnio 4,43) $g.mm^{-1}.m^{-2}$. Najwyższe wartości wskaźnika WUE były na glebie gliniastej – od 2,7 do 7,7 (średnio 4,8) $g.mm^{-1}.m^{-2}$, nieco niższe na glebie piaskowej od 2,8 do 6,0 (średnio 4,5) i najniższe na glebie lessowej od 2,0 do 6,8 (średnio 4,0) $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 31 i rys. 33).

Stwierdzono istotny wzrost wskaźnika WUE pod wpływem wzrastającego poziomu nawożenia mineralnego NPK, średnio wynosił on dla: NPK I – 3,9; NPK II – 4,5; NPK III – 4,9 $g.mm^{-1}.m^{-2}$.

Tabela 30

Zakresy i średnie wartości jednostkowego zużycia wody (UWC) w okresie wegetacji roślin (kg $H_2O \cdot kg^{-1}$ s.m. plonu)
Range and mean values of unit water consumption (UWC) during the plant growth period (kg $H_2O \cdot kg^{-1}$ dry matter yield)

Obiekty Treatment	Ziemniak Potato		Jęczmień jary Spring barley		Rzepak ozimy Winter rape		Pszenica ozima Winter wheat	
	1978, 1982, 1986, 1991		1979, 1983, 1987, 1992		1980, 1984, 1988, 1993		1981, 1985, 1989, 1994	
	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean
Gleba piaskowa; Sandy soil								
NPK I	184,1–265,6	239,1	518,7–703,4	630,3	906,4–1346,3	1144,4	301,2–624,7	495,6
NPK I + {I}* (+{M})**	173,0–349,1	275,4	591,2–838,4	710,5	962,5–1476,2	1294,2	236,7–859,2	622,9
NPK II	165,9–253,2	217,2	558,6–641,9	605,3	646,0–1182,7	970,3	262,4–621,7	476,4
NPK II + {I} (+{M})	167,3–356,3	243,5	574,9–714,7	644,5	667,5–1277,8	1045,8	193,3–845,6	571,8
NPK III	179,0–256,8	206,9	528,8–598,9	556,3	535,6–989,3	830,2	257,4–640,4	489,6
NPK III + {I} (+{M})	170,9–303,3	234,7	563,2–643,5	607,6	552,6–1142,2	922,3	224,1–909,0	637,5
Zakres; Range	165,9–356,3	236,1	518,7–838,4	625,7	535,6–1476,7	1034,5	193,3–909,0	549,0
Gleba lessowa; Loess soil								
NPK I	217,6–384,6	289,7	508,7–766,9	614,6	776,3–1276,0	1140,1	283,3–645,3	475,2
NPK I + {I} (+{M})	213,7–452,8	339,1	702,2–734,6	714,6	806,3–2086,9	1478,6	244,1–758,0	585,2
NPK II	196,6–303,6	238,1	482,0–607,7	546,1	541,6–1007,9	877,0	291,0–557,8	466,2
NPK II + {I} (+{M})	194,1–296,4	294,1	587,6–694,1	619,3	539,6–1368,4	1038,4	266,3–662,6	543,4
NPK III	161,3–311,3	216,6	422,3–644,2	548,2	406,0–1039,2	842,6	289,5–547,1	463,4
NPK III + {I} (+{M})	146,4–490,8	282,4	561,8–698,7	620,4	498,4–1194,0	964,0	212,2–698,5	560,9
Zakres; Range	146,4–490,8	276,6	422,3–766,9	610,5	406,0–2086,9	1056,8	212,2–758,0	515,7
Gleba gliniasta; Loamy soil								
NPK I	155,1–309,7	235,7	336,3–601,9	506,1	866,3–1454,8	1130,9	184,7–471,5	352,1
NPK I + {I} (+{M})	158,7–376,1	282,9	532,2–688,4	599,8	823,8–1644,9	1206,0	166,2–617,9	469,2
NPK II	141,0–234,8	190,1	335,9–543,0	455,7	628,7–1118,2	876,7	190,4–486,3	357,0
NPK II + {I} (+{M})	174,1–364,0	252,0	485,9–601,8	522,4	577,2–1314,6	1007,2	165,4–583,8	457,2
NPK III	137,0–266,3	193,9	271,5–561,4	458,0	594,2–1026,2	842,2	177,3–475,7	378,6
NPK III + {I} (+{M})	130,6–356,9	217,2	487,4–562,0	524,2	554,5–1017,7	842,4	164,4–595,2	430,9
Zakres; Range	130,6–376,1	228,6	271,5–688,4	511,0	554,5–1644,9	984,2	164,4–617,9	407,5
Zakresy dla roślin Range for plants	130,6–490,8	247,1	271,5–838,4	582,4	406,0–2086,9	1025,2	164,4–909,0	490,7

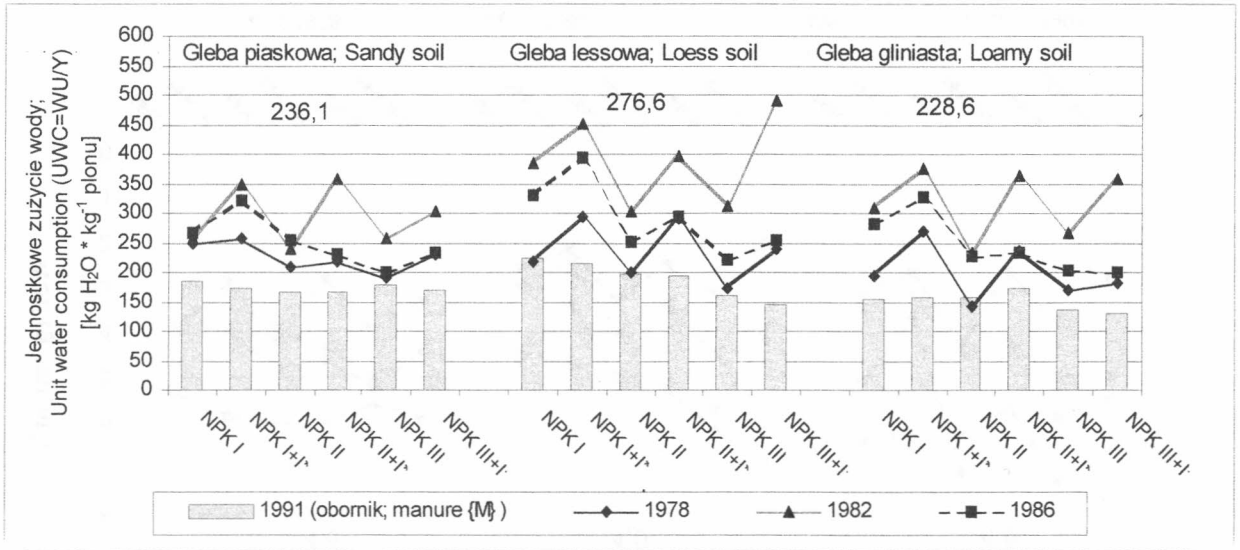
*, ** patrz tab. 28; see tab. 28

Tabela 31

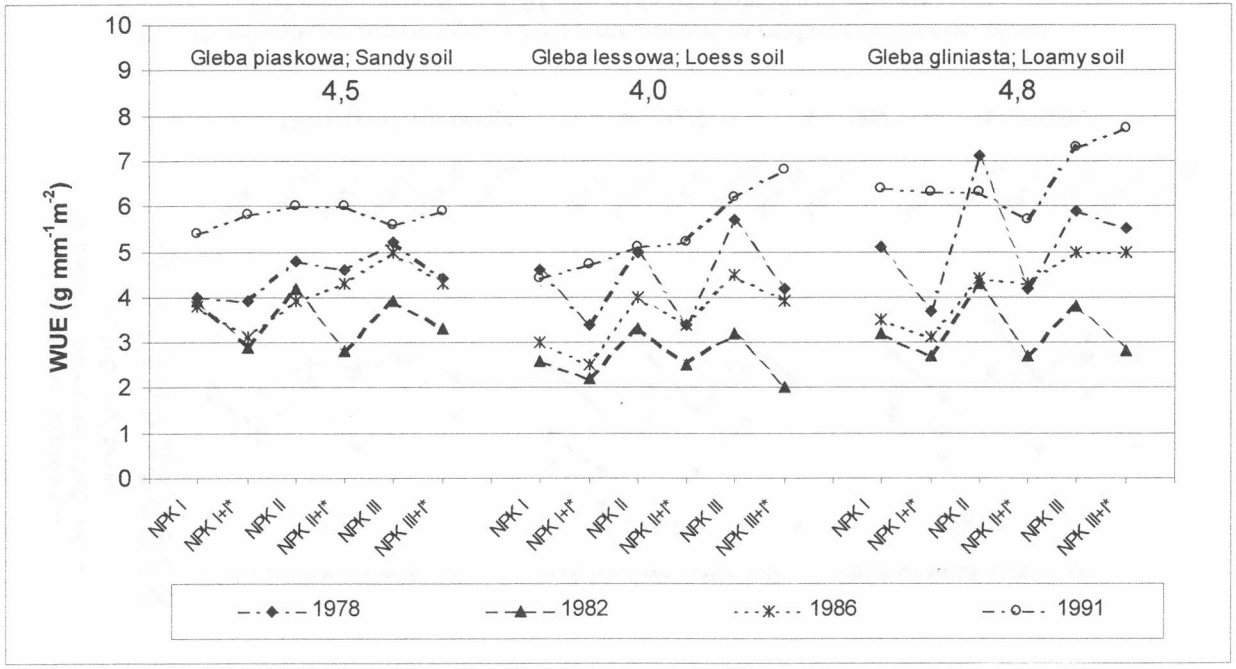
Zakresy i średnie wartości wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) w okresie wegetacji roślin (g plonu . mm^{-1} H_2O . m^{-2})
Range and mean values of water use efficiency (WUE) during the plant growth period (g yield . mm^{-1} H_2O . m^{-2})

Obiekty Treatment	Ziemniak Potato		Jęczmień jary Spring barley		Rzepak ozimy Winter rape		Pszenica ozima Winter wheat	
	1978, 1982, 1986, 1991		1979, 1983, 1987, 1992		1980, 1984, 1988, 1993		1981, 1985, 1989, 1994	
	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean	zakres range	średnia mean
Gleba piaskowa; Sandy soil								
NPK I	3,8–5,4	4,3	1,4–1,9	1,6	0,7–1,1	0,9	1,6–3,3	2,2
NPK I + {I}* (+{M})**	2,9–5,8	3,8	1,2–1,7	1,5	0,7–1,0	0,8	1,2–4,2	2,1
NPK II	3,9–6,0	4,7	1,6–1,8	1,7	0,8–1,5	1,1	1,6–3,8	2,4
NPK II + {I} (+{M})	2,8–6,0	4,4	1,4–1,7	1,6	0,8–1,5	1,0	1,2–5,2	2,4
NPK III	3,9–5,6	4,9	1,7–1,9	1,8	1,0–1,9	1,3	1,6–3,9	2,3
NPK III + {I} (+{M})	3,3–5,9	4,5	1,6–1,8	1,7	0,9–1,8	1,2	1,1–4,5	2,1
Zakres; Range	2,8–6,0	4,5	1,2–1,9	1,6	0,7–1,9	1,0	1,1–4,5	2,2
Gleba lessowa; Loess soil								
NPK I	2,6–4,6	3,7	1,3–2,0	1,7	0,8–1,3	0,9	1,5–3,5	2,3
NPK I + {I} (+{M})	2,2–4,7	3,2	1,4–1,4	1,4	0,5–1,2	0,8	1,3–4,1	2,1
NPK II	3,3–5,1	4,4	1,6–2,1	1,9	1,0–1,8	1,2	1,8–3,4	2,3
NPK II + {I} (+{M})	2,5–5,2	3,6	1,4–1,7	1,6	0,7–1,9	1,1	1,5–3,8	2,1
NPK III	3,2–6,2	4,9	1,6–2,4	1,9	1,0–2,5	1,4	1,8–3,5	2,3
NPK III + {I} (+{M})	2,0–6,8	4,2	1,4–1,8	1,6	0,8–2,0	1,2	1,4–4,7	2,3
Zakres; Range	2,0–6,8	4,0	1,3–2,4	1,7	0,5–2,5	1,1	1,3–4,7	2,2
Gleba gliniasta; Loamy soil								
NPK I	3,2–6,4	4,6	1,7–3,0	2,1	0,7–1,2	1,0	2,1–5,4	3,3
NPK I + {I} (+{M})	2,7–6,3	4,0	1,5–1,9	1,7	0,6–1,2	0,9	1,6–6,0	2,8
NPK II	4,3–7,1	5,5	1,8–3,0	2,3	0,9–1,6	1,7	2,1–5,3	3,3
NPK II + {I} (+{M})	2,7–5,7	4,2	1,7–2,1	2,0	0,8–1,7	1,1	1,7–6,0	2,9
NPK III	3,8–7,3	5,5	1,8–3,7	2,4	1,0–1,7	1,3	2,1–5,6	3,1
NPK III + {I} (+{M})	2,8–7,7	5,3	1,8–2,1	1,9	1,0–1,8	1,3	1,7–6,1	3,0
Zakres; Range	2,7–7,7	4,8	1,5–3,7	2,0	0,7–1,8	1,1	1,6–6,1	3,1
Zakresy dla roślin Range for plants	2,0–7,7	4,43	1,2–3,7	1,78	0,5–2,5	1,08	1,1–6,1	2,51

*, ** patrz tab. 28; see tab. 28



Rys. 32. Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez ziemniak na produkcję suchej masy plonu
Unit water consumption (UWC) by potato for production of dry mass



Rys. 33. Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) na produkcję plonu bulw ziemniaka – wartości średnie
Water use efficiency (WUE) by potato – mean values

Nawadnianie interwencyjne istotnie zmniejszało wskaźnik wydajności zużycia wody przez ziemniak. W obiektach bez nawodnień średnie wartości WUE wyniosły 4,3, a w obiektach z nawadnianiem interwencyjnym 3,5 $g.mm^{-1}.m^{-2}$.

Nie stwierdzono istotnego wpływu nawożenia obornikiem na wzrost wskaźnika zużycia wody. Średnia wartość WUE w obiektach bez obornika wyniosła 5,8 $g.mm^{-1}.m^{-2}$, natomiast z obornikiem 6,0 $g.mm^{-1}.m^{-2}$.

Stwierdzono istotny wpływ poszczególnych lat prowadzenia badań na różnicowanie wskaźnika zużycia wody przez ziemniaki. Średnie wartości WUE w kolejnych latach wyniosły: 4,7 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (1978 r.); 3,1 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (1982 r.); 3,9 $g:mm^{-1}.m^{-2}$ (1986 r.); 5,9 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (1994 r.).

S h a r m a i C h a k o r (139) badali wpływ nawadniania na plon suchej masy ziemniaków i współczynnik zużycia wody na glebie gliniastej. Stwierdzili, że polowe zużycie wody w latach 1988–1989 było wyższe z uwagi na wysokie opady w sezonie wegetacyjnym. Najwyższy współczynnik WUE stwierdzono przy stosunku nawadniania (IW) do ewapotranspiracji (CPE) równym 0,8. W takich warunkach efekty nawadniania były najlepsze.

6.5.2. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez jęczmień jary

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez jęczmień jary w latach 1978, 1983, 1987 i 1992 (tab. 30) mieściło się w zakresie od 271,5 do 838,4 (średnio 582,4) kg H_2O/kg s.m. plonu . W glebie piaskowej jednostkowe zużycie wody UWC mieściło się w zakresie od 518,7 do 838,4 (średnio 625,7) kg H_2O/kg s.m. plonu, w glebie lessowej od 422,3 do 766,9 (średnio 610,5) kg H_2O/kg s.m. plonu i w glebie gliniastej od 271,5 do 688,4 (średnio 511,0) kg H_2O/kg s.m. plonu (tab. 30 i rys. 34).

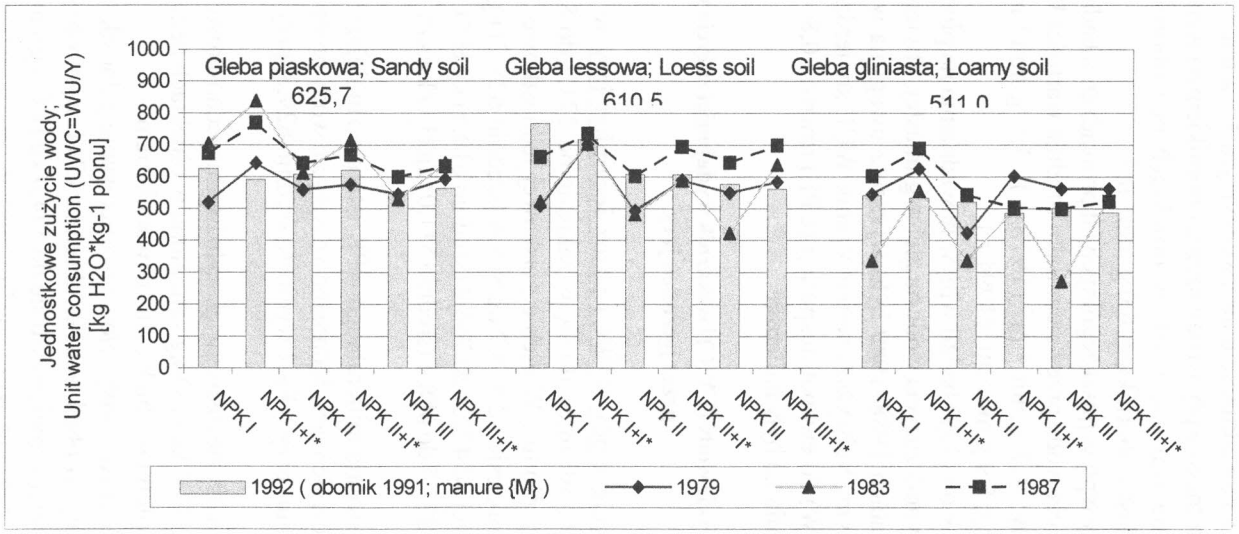
Wzrost dawki nawożenia mineralnego NPK istotnie zmniejszył jednostkowe zużycie wody przez jęczmień jary. Jednostkowe zużycie wody przez jęczmień jary (w kg H_2O/kg s.m. plonu) przy NPK I wyniosło średnio 629,3, przy NPK II 565,6 i przy NPK III 552,5.

Nawadnianie interwencyjne roślin zwiększyło istotnie jednostkowe zużycie wody przez jęczmień jary z 532,6 kg H_2O/kg s.m. plonu w obiektach bez nawodnień do 632,9 kg H_2O/kg s.m. plonu w obiektach z nawadnianiem.

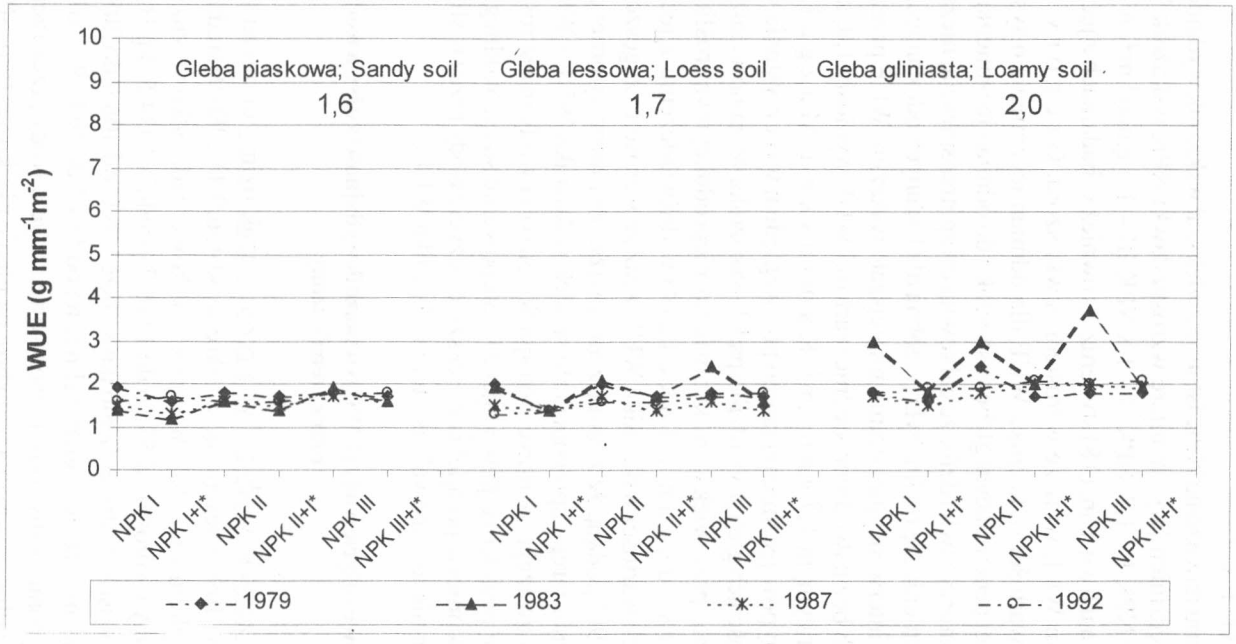
Nawożenie obornikiem nie wpłynęło na różnicowanie jednostkowego zużycia wody przez jęczmień jary. W obiektach bez obornika UWC wyniosło średnio 589,1, a w obiektach z obornikiem zmniejszyło się do 574,0 kg H_2O/kg s.m. plonu.

Średnie wartości zużycia wody na jednostkę plonu jęczmienia jarego (w kg H_2O/kg s.m. plonu) w kolejnych latach badań wyniosły: 565,2 (1979 r.), 551,1 (1983 r.), 631,9 (1987 r.) i 581,9 (1992 r.).

Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez jęczmień jary w latach 1979, 1983, 1987, 1992 (tab. 31) wahał się w zakresie od 1,2 do 3,7 (średnio 1,78) $g . mm^{-1}.m^{-2}$. Najwyższe wartości wskaźnika WUE stwierdzono w glebie glinia-



Rys. 34. Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez jęczmień jary na produkcję suchej masy plonu
Unit water consumption UWC) by spring barley for production of dry mass



Rys. 35. Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) na produkcję plonu jęczmienia jarego – wartości średnie
Water use efficiency (WUE) by spring barley – mean values

stej – od 1,5 do 3,7 (średnio 2,0) $g.mm^{-1}.m^{-2}$, nieco niższe w glebie lessowej od 1,3 do 2,4 (średnio 1,7) i najniższe w glebie piaskowej od 1,2 do 1,9 (średnio 1,6) $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 31, rys. 35).

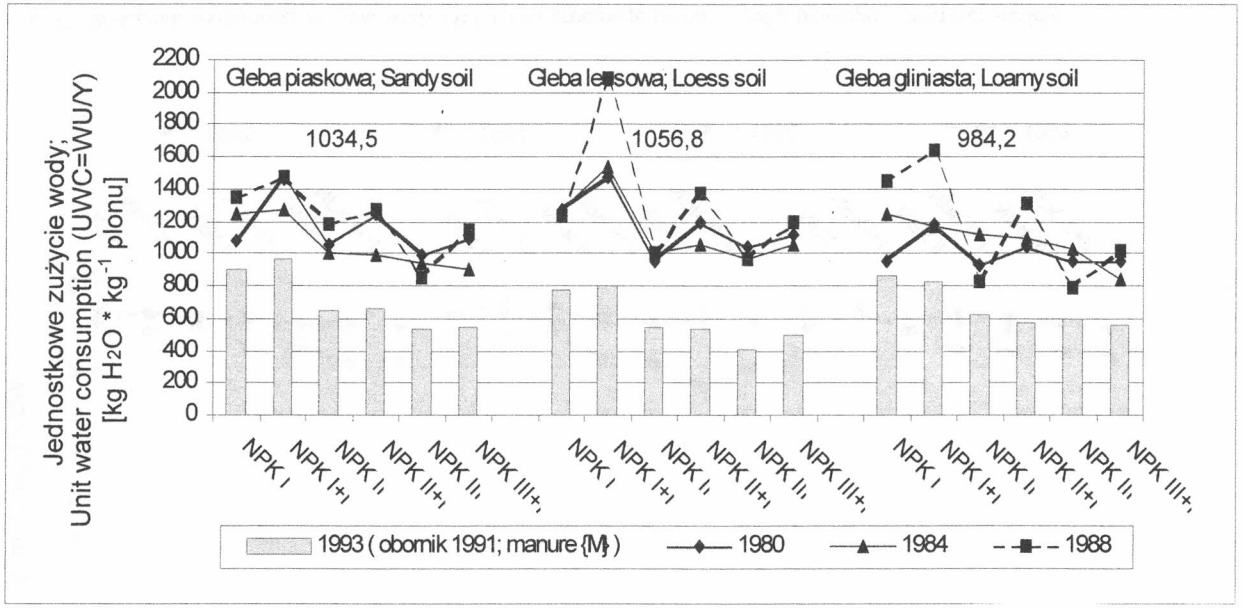
Wzrost poziomu nawożenia NPK istotnie zwiększał wskaźnik wydajności zużycia wody przez jęczmień jary. W miarę wzrostu dawki NPK wskaźnik WUE wynosił średnio dla: NPK I – 1,7; NPK II – 1,8 NPK III – 1,9 $g.mm^{-1}.m^{-2}$. A w a s t h i i in. (5) oraz C h a u h a n i in. (18) stwierdzili również w badaniach z jęczmieniem wzrost wskaźnika WUE wraz ze wzrostem dawki azotu. G r e g o r y i in. (59) uzyskali wzrost wartości wskaźnika WUE dla odmian jęczmienia o systemie korzeniowym głębiej penetrującym glebę w stosunku do odmian jęczmienia płycej się korzeniących. Autorzy stwierdzili, że całkowita ewapotranspiracja, niezależnie od głębokości korzenienia się roślin, była podobna dla badanych odmian jęczmienia.

Nawadnianie interwencyjne istotnie zmniejszało wskaźnik WUE przez jęczmień jary. W obiektach bez nawodnień średnie wartości WUE wyniosły 1,9, a z nawadnianiem interwencyjnym 1,7 $g.mm^{-1}.m^{-2}$. K a m i ń s k a i M a z g a l s k a (70) badając 10 genotypów jęczmienia jarego pod względem wykorzystania wody przy różnych wilgotnościach gleb stwierdziły spadek wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) dla ziarna, przy większym krzewieniu nieprodukcyjnym roślin (wzrasta transpiracja). A r v i d s s o n i J o k e l a (4) w doświadczeniu z jęczmieniem stwierdzili spadek wartości wskaźnika WUE wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby, L u i B i o t (90) podają, że zmniejszenie miąższości warstwy ornej gleby przy uprawie jęczmienia jarego spowodowało spadek wskaźnika WUE i WU. B a m f o r d i in. (12) uważają, że przyczyną spadku zużycia wody przez rośliny może być zagęszczenie podglebia, powodujące występowanie stresu wodnego i zamieranie roślin. Spulchnienie podglebia zwiększyło zużycie wody przez rośliny. Nawożenie obornikiem nie różnicowało istotnie wskaźnika WUE.

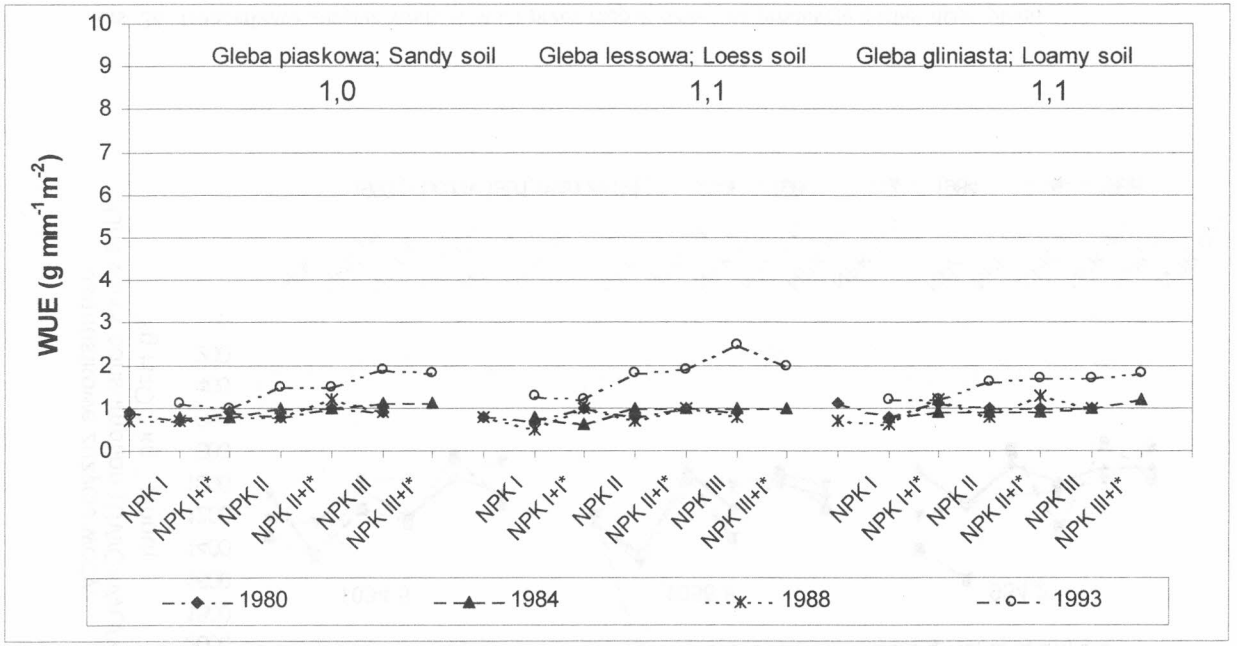
6.5.3. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rzepak ozimy

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez rzepak ozimy uprawiany w latach 1980, 1984, 1988 i 1993 mieściło się w zakresie od 406,0 do 2086,9 (średnio 1025,2) kg H_2O/kg s.m. plonu (tab. 30). W glebie piaskowej jednostkowe zużycie wody przez rzepak ozimy wyniosło od 535,6 do 1476,7 (średnio 1034,5) kg H_2O/kg s.m. plonu. W glebie lessowej stwierdzono najwyższe UWC od 406,0 do 2086,9 (średnio 1056,8) i znacznie niższe w glebie gliniastej od 554,5 do 1644,9 (średnio 984,2) kg H_2O/kg s.m. plonu. Najwyższe jednostkowe zużycie wody przez rzepak ozimy stwierdzono na glebie lessowej a najniższe na glebie piaskowej (tab. 30, rys. 36).

Wzrost nawożenia NPK istotnie zmniejszył jednostkowe zużycie wody przez rzepak ozimy. Średnie wartości UWC wyniosły (w kg H_2O/kg s.m. plonu): dla NPK I 1232,3; dla NPK II 969,2 i dla NPK III 873,9.



Rys. 36. Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez rzepak ozimy na produkcję suchej masy plonu
Unit water consumption (UWC) by winter rape for production of dry mass



Rys. 37. Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) na produkcję plonu rzepaku ozimego – wartości średnie
Water use efficiency (WUE) winter rape – mean values

Nawadnianie interwencyjne istotnie zwiększyło jednostkowe zużycie wody przez rzepak ozimy. Średnie zużycie wody na jednostkę plonu wyniosło 1063,6 kg H_2O/kg s.m. plonu w obiektach bez nawadniania i 1230,1 kg H_2O/kg s.m. plonu – z nawadnianiem.

Nie stwierdzono natomiast wpływu obornika na jednostkowe zużycie wody przez rzepak ozimy.

Średnie wartości zużycia wody na jednostkę plonu rzepaku ozimego były wysokie we wszystkich latach badań i wyniosły (w kg H_2O/kg s.m. plonu): 1111,2 w 1980 r., 1097,2 w 1984 r.; 1232,0 w 1988 r. i dwukrotnie mniej – 660,0 w1993 r.

Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rzepak ozimy w latach 1980, 1984, 1988, 1993 (tab. 31) oscylował w zakresie 0,5–2,5 (średnio 1,1) $g.mm^{-1}.m^{-2}$. Najwyższe wartości wskaźnika WUE stwierdzono w glebie lessowej – od 0,5 do 2,5 (średnio 1,1) $g.mm^{-1}.m^{-2}$, nieco niższe w glebie gliniastej od 0,7 do 1,8 (średnio 1,1), a najniższe w glebie piaskowej od 0,7 do 1,9 (średnio 1,0) $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 31, rys. 37). Nie stwierdzono istotnego zróżnicowania wskaźnika wydajności zużycia wody przez rzepak ozimy w zależności od gleby.

Nawożenie mineralne NPK istotnie zwiększyło wskaźnik WUE dla rzepaku ozimego. Wartość średnia wskaźnika WUE wyniosła: 0,9 dla NPK I; 1,1 dla NPK II ; 1,3 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ dla NPK III.

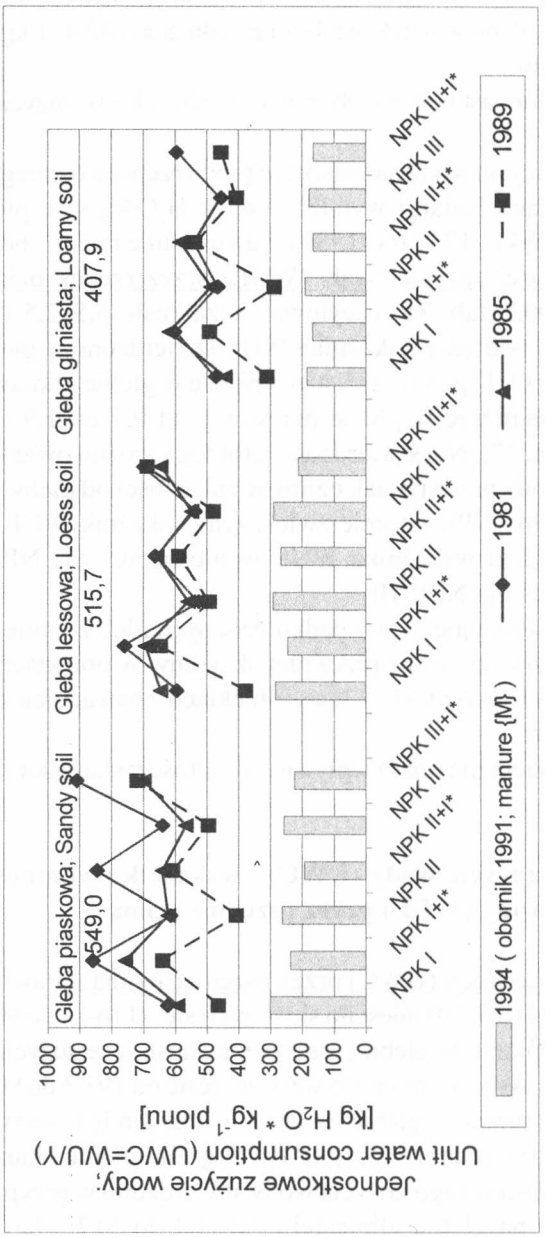
Nawadnianie interwencyjne w przypadku badanych gleb istotnie zmniejszyło wskaźnik wydajności zużycia wody przez rzepak ozimy. W obiektach bez nawodnień średnia wartość WUE wyniosła 1,1, a w obiektach z nawadnianiem interwencyjnym – 1,0 $g.mm^{-1}.m^{-2}$.

Nawożenie obornikiem nie miało wpływu na wartość wskaźnika zużycia wody przez rzepak ozimy.

6.5.4. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez pszenicę ozimą

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez pszenicę ozimą uprawianą w latach 1981, 1985, 1989 i 1994 (tab. 30) mieściło się w zakresie od 164,4 do 909,0 (średnio 490,7) kg H_2O/kg s.m. plonu. W glebie piaskowej jednostkowe zużycie wody przez pszenicę ozimą było najwyższe i mieściło się w zakresie od 193,3 do 909,0 (średnio 549,0) kg H_2O/kg s.m. plonu, w glebie lessowej zakres ten był nieco niższy i wyniósł od 212,2 do 758,0 (średnio 515,7) kg H_2O/kg s.m. plonu. Najniższy zakres i średnie wartości jednostkowego zużycia wody stwierdzono w przypadku pszenicy ozimej uprawianej na glebie gliniastej od 164,4 do 617,9 (średnio 407,5) kg H_2O/kg s.m. plonu (tab. 30 i rys. 38).

Nawożenie NPK istotnie różnicowało wartość jednostkowego zużycia wody przez pszenicę ozimą. Wzrost dawek NPK zmniejszał zużycie wody na jednostkę plonu. Średnio jednostkowe zużycie wody (w kg H_2O/kg s.m. plonu) wyniosło: 500,0 przy NPK I, 478,6 przy NPK II i 493,5 przy NPK III.



Rys. 38. Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez pszenicę ozimą na produkcję suchej masy plonu
Unit water consumption (UWC) by winter wheat for production of dry mass

Nawadnianie spowodowało istotny wzrost jednostkowego zużycia wody przez pszenicę ozimą. Wartość tego wskaźnika w obiektach bez nawadniania wyniosła średnio 502,9 kg H_2O/kg s.m. plonu, a w obiektach z nawadnianiem 653,4 kg H_2O/kg s.m. plonu.

Jednostkowe zużycie wody przez pszenicę ozimą uprawianą w obiektach z obornikiem było niższe i wyniosło średnio 208,1, a w obiektach bez obornika 248,6 kg H_2O/kg s.m. plonu. Należy zaznaczyć, że różnice te były statystycznie nieistotne.

Średnie wartości jednostkowego zużycia wody przez pszenicę ozimą w kolejnych latach (w kg H_2O/kg s.m. plonu) wyniosły: 633,3 (1981 r.), 596,4 (1985 r.), 504,9 (1989 r.) i 228,3 (1994 r.).

Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez pszenicę ozimą w latach 1981, 1985, 1989, 1994 wahał się w zakresie od 1,1 do 6,1 (średnio 2,5) $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 31). Wartości wskaźnika WUE na glebie gliniastej wahały się w granicach od 1,6 do 6,1 (średnio 3,1) $g.mm^{-1}.m^{-2}$. Niższe wartości wskaźnika WUE zaobserwowano na pozostałych dwóch glebach: glebie lessowej od 1,3 do 4,7 (średnio 2,2); glebie piaskowej od 1,1 do 4,5 (średnio 2,2) $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 31, rys. 39).

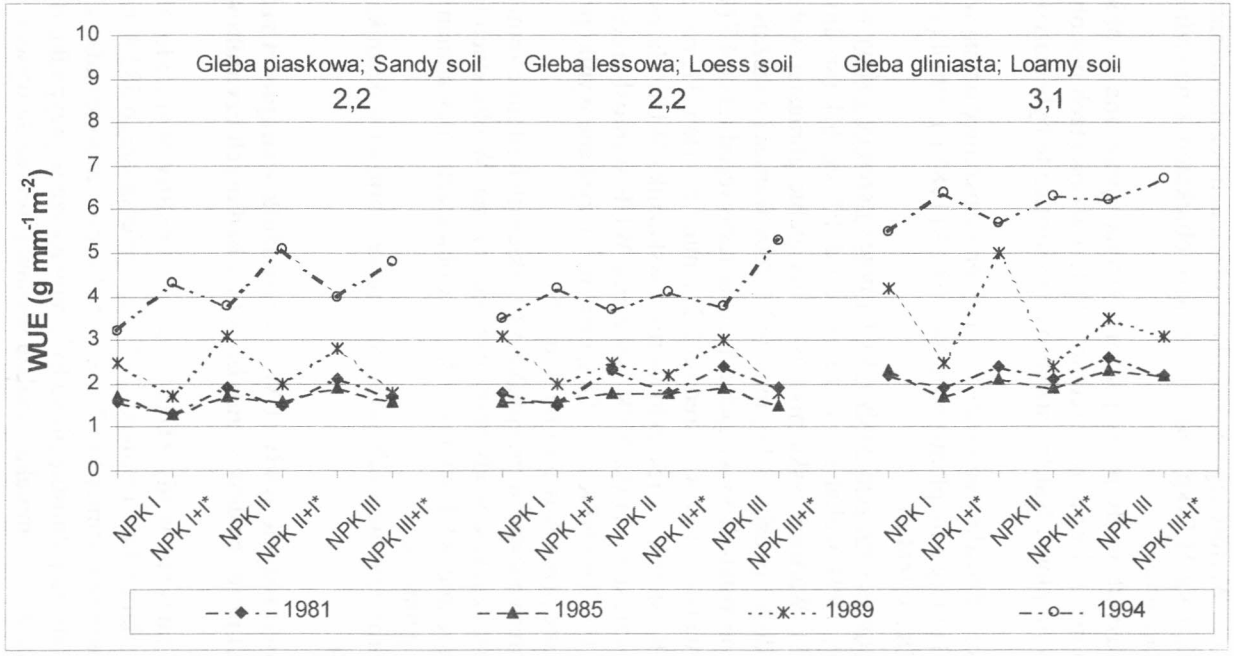
Nawożenie NPK istotnie zwiększyło wartość wskaźnika WUE dla pszenicy ozimej. Wraz ze wzrostem dawki NPK wskaźnik WUE wyniósł średnio dla: NPK I – 2,5, NPK II – 2,6 i NPK III – 2,8 $g.mm^{-1}.m^{-2}$. Uzyskane wyniki potwierdzają dane otrzymane przez A w a s t h i i in. (5).

Nawadnianie interwencyjne w przypadku wszystkich gleb istotnie zmniejszało wskaźnik wydajności zużycia wody przez pszenicę ozimą. W obiektach bez nawodnień wartości średnie WUE wyniosły 2,6, a w obiektach z nawadnianiem interwencyjnym 2,4 $g.mm^{-1}.m^{-2}$.

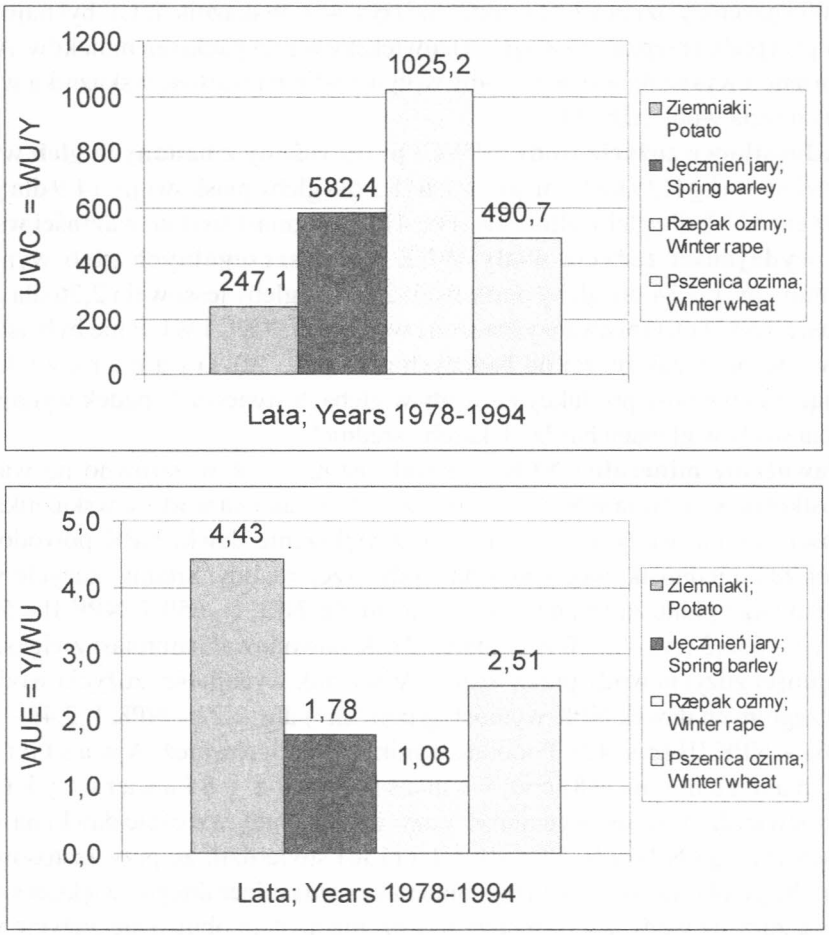
Nawożenie obornikiem nie modyfikowało istotnie wartości wskaźnika WUE dla pszenicy ozimej.

6.5.5. Jednostkowe zużycie wody (UWC) i wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny w zależności od badanych czynników

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez rośliny wyniosło średnio (w kg H_2O/kg s.m. plonu) dla: ziemniaka 247,1; jęczmienia jarego 582,4; rzepaku ozimego 1025,2 i pszenicy ozimej 490,7 (rys. 40). Przeprowadzone badania wykazały, że zużycie wody na jednostkę plonu było największe w przypadku rzepaku ozimego a najmniejsze – ziemniaka. Analiza wariancji wykazała wysoce istotny wpływ roślin na jednostkowe zużycie wody (tab. 29). Dane literaturowe (137, 138, 150) oraz badania własne (24-26) potwierdzają, że najkorzystniejszy wskaźnik jednostkowego zużycia wody uzyskuje się w optymalnych warunkach pogodowych i agrotechnicznych. W ostatnich latach dzięki doskonaleniu agrotechniki i wzrostowi plonowania roślin obniżył się wyraźnie wskaźnik jednostkowego zużycia wody. W wielu opracowaniach wykazano, że zużycie wody na produkcję jednego kilo-



Rys. 39. Wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) na produkcję plonu pszenicy ozimej – wartości średnie
Water use efficiency WUE by winter wheat – mean values



Rys. 40. Jednostkowe zużycie wody UWC (kg H_2O . kg^{-1} s.m. plonu) i wskaźnik wydajności zużycia wody WUE (g s.m. plonu . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) dla roślin uprawnych (wartości średnie)
Unit water consumption UWC (kg H_2O . kg^{-1} d.m. yield) and water use efficiency WUE (g d.m. yield . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) for plants (mean values)

grama plonu ziemniaka wahało się: w doświadczeniach polowych od 80 do 440 kg H_2O (151, 152), a w doświadczeniach lizymetrycznych od 60 do 280 kg H_2O (1). W przypadku pszenicy ozimej – zużycie wody na produkcję jednego kilograma ziarna w latach 1963–1967 wyniosło 1500–3000 kg H_2O (31), a w latach 1971–1978 od 120 do 550 kg H_2O (150). Ś l u s a r c z y k i in. (152) podaje, że w suchym roku 1979 na wyprodukowanie 1 kg plonu niezbędna ilość wody wyniosła: dla ziemniaka (bulwy) – 84; dla jęczmienia (plon całkowity) – 282, (ziarno) – 984 kg H_2O.

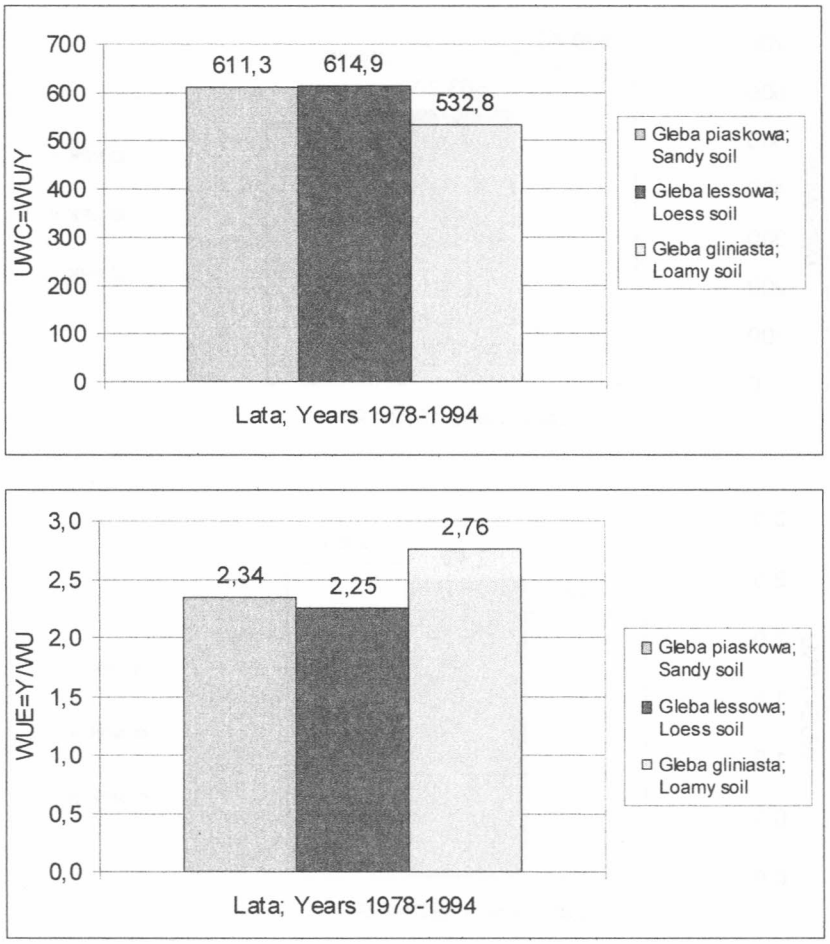
Wartości wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny uprawne wyniosły średnio dla: ziemniaków 4,43; jęczmienia jarego 1,78; rzepaku ozime-

go 1,08 i pszenicy ozimej 2,51 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (rys. 40). Wskaźnik WUE był najmniejszy w przypadku rzepaku ozimego, a największy w przypadku ziemniaków. Analiza wariancji wykazała wysoce istotny wpływ roślin na wartość wskaźnika wydajności zużycia wody (tab. 29).

Jednostkowe zużycie wody (UWC) przez rośliny z badanych gleb wyniosło średnio w (kg $H_2O.kg^{-1}$ s.m. plonu): 611,3 dla gleby piaskowej; 614,9 dla gleby lessowej i 532,8 dla gleby gliniastej (rys. 41). Natomiast średnie **wartości wskaźnika wydajności zużycia wody WUE dla poszczególnych gleb** wyniosły w ($g.mm^{-1}.m^{-2}$): 2,34 dla gleby piaskowej; 2,25 dla gleby lessowej i 2,76 dla gleby gliniastej (rys. 41). Obydwa wyznaczone wskaźniki UWC i WUE nie były istotnie zróżnicowane w zależności od badanych gleb (tab. 29). Grabarczyk (55) badając efektywność produkcyjną wody w glebach stwierdził spadek wydajności zużycia wody w glebach bardzo lekkich i średnich.

Nawożenie mineralne NPK wykazało istotny wpływ zarówno na wartość jednostkowego zużycia wody UWC przez rośliny, jak i na wartość wskaźnika wydajności zużycia wody WUE (tab. 29). Zwiększenie dawki NPK powodowało zmniejszenie jednostkowego zużycia wody przez rośliny. Średnie zużycie wody w kg $H_2O.kg^{-1}$ plonu za 16 lat badań wyniosło dla: NPK I – 659,7; NPK II – 563,2; NPK III – 536,3 (rys. 42). Wzrost dawki NPK powodował natomiast zwiększenie wydajności zużycia wody przez rośliny. Wskaźnik wydajności zużycia wody dla poszczególnych dawek NPK wyniósł ($g.mm^{-1}.m^{-2}$) dla: 2,22 – NPK I; 2,49 – NPK II; 2,63 – NPK III (rys. 42). Podobne wyniki uzyskali również Awasthi i in. (5), Chauhan i in. (18) oraz Tomaszewska i Ślusarczyk (154), którzy stwierdzili wzrost wydajności zużycia wody przy wzroście dawki nawożenia mineralnego NPK i N. Trybała (156) stwierdził, że przy zastosowaniu optymalnego dla wzrostu roślin poziomu nawożenia mineralnego zwiększa się wydajność zużycia wody. Ze wzrostem nawożenia azotem obniża się zużycie wody na jednostkę plonu roślin, natomiast spadek polowego zużycia wody na jednostkę plonu zwiększa efektywność produkcyjną wody twierdzą Fotyma i in. (49), Koszański i in. (81), Ślusarczyk (150) oraz Tomaszewska i Ślusarczyk (154). W badaniach modelowych Van Keulen i Wolf (160) stwierdzili wzrost wartości polowego zużycia wody (WU) i wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) przy stosowaniu nawożenia mineralnego NPK w porównaniu z nawożeniem PK; związane to było ze zwiększeniem ubytku wody z profilu glebowego w okresie wegetacji i większym plonowaniem roślin. Autorzy ci wskazują również, że przy wzroście nawożenia NPK, wzrasta wskaźnik wydajności zużycia wody WUE w wyniku większej transpiracji i plonowania roślin. Andersen i in. (3) podają, że na glebie piaskowej w uprawie jęczmienia, przy wysokim nawożeniu K, wzrastała wartość wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) dla plonu całkowitego (ziarno i słoma) i nie ulegała zmianie dla ziarna.

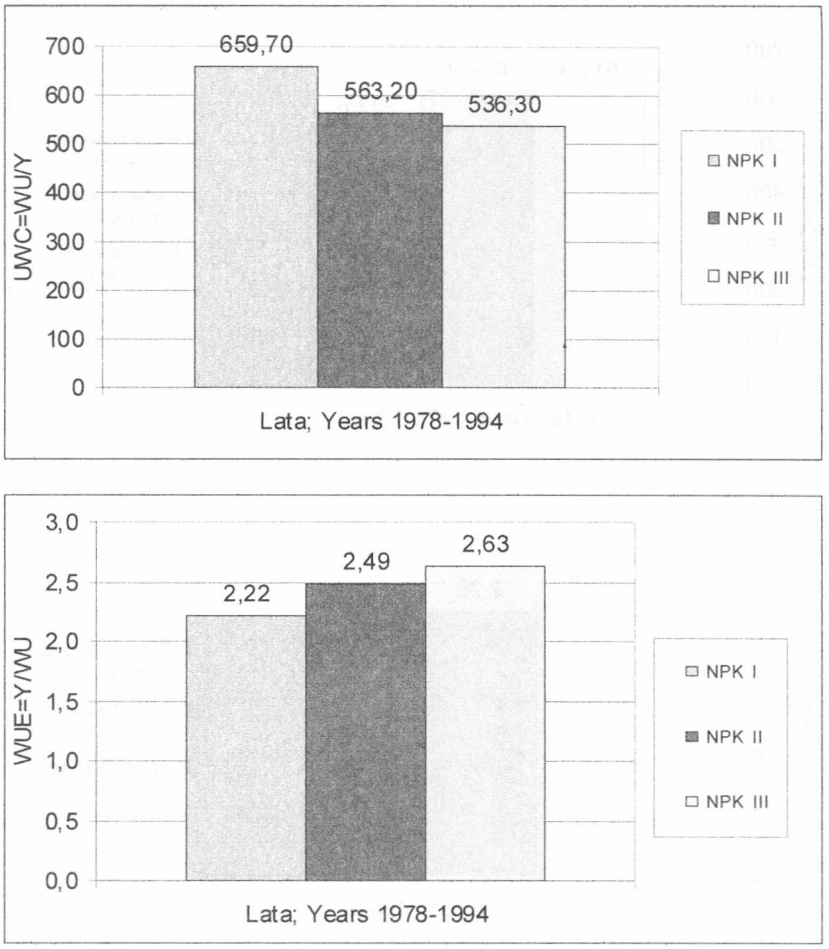
Z badań Fotymy i in. (48, 49) wynika, że produkcyjne zużycie wody na jednostkę plonu ziarna pszenicy ozimej stanowiło od 50 do 70% zużycia wody



Rys. 41. Jednostkowe zużycie wody UWC (kg H_2O . kg^{-1} s.m. plonu) i wskaźnik wydajności zużycia wody WUE (g s.m. plonu . mm^{-1} H_2O. m^{-2}) przez rośliny na trzech badanych glebach (wartości średnie)
Unit water consumption UWC (kg H_2O. kg^{-1} d.m. yield) and water use efficiency WUE (g d.m. yield . mm^{-1} H_2O. m^{-2}) for plants for three soils (mean values)

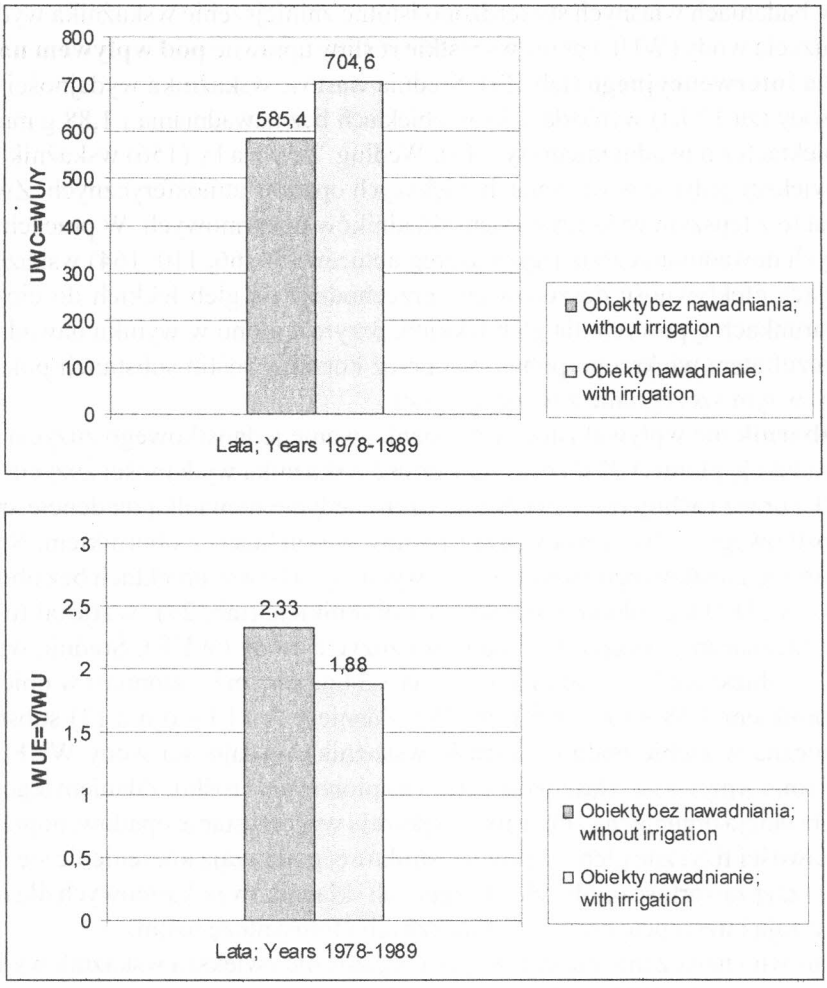
stwierdzonego w obiekcie kontrolnym. Jęczmień jary zużywał więcej wody na jednostkę plonu ziarna niż pszenica ozima. K a r c z m a r c z y k i in. (71) stwierdzili, że produkcyjne zużycie wody na wyprodukowanie świeżej masy bulw ziemniaka na glebie lekkiej może być nawet o 40% mniejsze przy potrójnej dawce NPK niż w obiektach kontrolnych.

Stwierdzono wysoce istotny wpływ **nawadniania interwencyjnego** na wzrost zużycia wody na wytworzenie jednostki masy plonu (UWC) badanych roślin (tab. 29). Jednostkowe zużycie wody było większe w obiektach z nawadnianiem



Rys. 42. Wpływ nawożenia NPK na jednostkowe zużycie wody UWC (kg H_2O. kg^{-1} s.m. plonu) i wskaźnik wydajności zużycia wody WUE (g s.m. plonu . mm^{-1} H_2O. m^{-2}) przez rośliny uprawne (wartości średnie)
Effects of mineral fertilization NPK on unit water consumption UWC (kg H_2O. kg^{-1} d.m. yield) and water use efficiency WUE (g d.m. yield . mm^{-1} H_2O. m^{-2}) for all plants (mean values)

niż bez nawadniania. Wynika stąd, że rośliny w obiektach z nawadnianiem gospodarują wodą mniej oszczędniej. Jest to zgodne z wcześniejszymi badaniami własnymi (26). Z drugiej strony jednostkowe zużycie wody zmniejsza się wraz ze wzrostem poziomu nawożenia NPK (zwłaszcza ze wzrostem od NPK I do NPK III). Podobne rezultaty w tym względzie uzyskano w pracy M a t u l a i S a r n a c k i e j (96). Średnia wartość jednostkowego zużycia wody (za 12 lat)



Rys 43. Wpływ nawadniania na jednostkowe zużycie wody UWC (kg H_2O . kg^{-1} s.m. plonu) i wskaźnik wydajności zużycia wody WUE (g s.m. plonu . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) przez rośliny uprawne (wartości średnie)
Effects of irrigation on unit water consumption UWC (kg H_2O . kg^{-1} d.m. yield) and water use efficiency WUE (g d.m. yield . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) for all plants (mean values)

wyniosła 585,4 w obiektach bez nawadniania i 704,6 kg $H_2O.kg^{-1}$ plonu w obiektach z nawadnianiem (rys. 43). Również wyniki badań D z i e ż y c a i in. (38) nad efektywnością produkcyjną deszczowania roślin w uprawie polowej wykazały wzrost tego wskaźnika. W badaniach tych stwierdzono wyższą efektywność deszczowania na glebach lżejszych w porównaniu z ciężkimi.

W badaniach własnych stwierdzono istotne zmniejszenie wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) przez wszystkie rośliny uprawne **pod wpływem nawadniania interwencyjnego** (tab. 29). Średnia wartość wskaźnika wydajności zużycia wody (za 12 lat) wyniosła 2,33 w obiektach bez nawadniania i 1,88 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ w obiektach z nawadnianiem (rys. 43). Według T r y b a ł y (156) wskaźnik WUE jest większy jedynie w warunkach większych opadów atmosferycznych. Związane jest to z lepszym wykorzystaniem składników pokarmowych. W pracach dotyczących nawadniania zbóż jarych szereg autorów (54, 66, 110, 164) wskazuje na malejącą efektywność deszczowania przechodząc od gleb lekkich do ciężkich. W warunkach typowych dla gleb lekkich, przyrost plonu w wyniku nawadniania jest rezultatem większego pobierania przez korzenie roślin substancji pokarmowych, w tym szczególnie z warstwy ornej.

Obornik nie wpływał istotnie na różnicowanie jednostkowego zużycia wody na produkcję plonu (UWC) oraz na wartość wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny (tab. 29). Stwierdzono jedynie niewielką tendencję spadku jednostkowego zużycia wody przez rośliny w obiektach z obornikiem. Średnie wartości jednostkowego zużycia wody wyniosły: 416,8 w obiektach bez obornika i 404,2 kg $H_2O.kg^{-1}$ plonu w obiektach z obornikiem (tab. 29). Wzrastał tu natomiast nieznacznie wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE). Średnia wartość WUE w obiektach bez obornika wyniosła 3,34 $g.mm^{-1}.m^{-2}$, natomiast w obiektach z obornikiem 3,58 $g.mm^{-1}.m^{-2}$ (tab. 29). Zdaniem A l l i s o n a (2) substancja organiczna w glebie podnosi wartość wskaźnika wydajności wody WUE, gdyż korzystnie wpływa na właściwości gleb i na plonowanie roślin. Zdaniem tego autora, substancja organiczna i obornik zwiększają wykorzystanie opadów, poprawiają właściwości fizyczne gleby – głównie strukturę, polepszają korzenienie się roślin, zwiększają zawartość ogólnych i dostępnych składników pokarmowych dla roślin, zwiększają intercepcję promieni słonecznych i fotosyntezę roślin.

Zarówno nawożenie mineralne, jak i organiczne zwiększa wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE). A l l i s o n (2) zwraca uwagę, że najwyższa wartość wskaźnika WUE może nie być ekonomicznie uzasadniona z uwagi na fakt, że wzrastające nawożenie mineralne zwiększa plonowanie roślin do pewnego optimum, a następnie powoduje jego spadek.

Stwierdzono istotny wpływ **rotacji zmianowania** na zróżnicowanie średnich wartości wskaźników UWC i WUE dla roślin (tab. 29). Porównując kolejne rotacje zmianowania stwierdzono następujące wartości jednostkowego zużycia wody UWC w (kg $H_2O.kg^{-1}$ plonu): 632,5 (1978–1981); 644,7 (1982–1985); 657,9 (1986–1989); 410,5 (1991–1994) i wartości wskaźnika wydajności zużycia wody WUE (w $g.mm^{-1}.m^{-2}$): 2,26 (1978–1981); 1,94 (1982–1985); 2,13 (1986–1989); 3,46 (1991–1994) (tab. 30).

Uwaga dotycząca porównania średnich wartości UWC i WUE. Z definicji obydwu badanych wskaźników: jednostkowego zużycia wody (UWC = kg $H_2O.kg^{-1}$ plonu) i wydajności zużycia wody (WUE = g plonu.mm^{-1} $H_2O.m^{-2}$ = g plonu.kg^{-1} H_2O), wynika że WUE/1000 = kg plonu.kg^{-1} H_2O, można więc stwierdzić, że 1/UWC = WUE/1000 i są one wzajemnie zależne:

$$UWC \times WUE = 1000^* \qquad (1)$$

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że dla każdego pojedynczego lizymetru i każdego pomiaru w roku równanie (1) będzie dokładne (przykładem są tu wartości wskaźników UWC i WUE na rysunkach 32-39).

Jakkolwiek, kiedy różne wartości są włączane i tworzą średnie, równanie (1) nie będzie spełnione. Jest to spowodowane tym, że jeśli UWC, na przykład, jest obliczane jako średnia arytmetyczna:

$$\bar{x}_{aryt} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n) \qquad (2)$$

wówczas odpowiednia średnia dla WUE będzie średnią harmoniczną:

$$\bar{x}_{harm} = \left[\frac{1}{n}\left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + ... + \frac{1}{x_n}\right)\right]^{-1} \qquad (3)$$

Jeśli nie wszystkie wartości x są identyczne (jednakowe), średnia arytmetyczna ($\bar{x}_{aryt}$) i średnia harmoniczna ($\bar{x}_{harm}$) będą różne. Jest to przypadek ze średnimi wartościami UWC i WUE pokazanymi na rysunkach 40-43 i wyjaśnia, dlaczego iloczyn wartości UWC i WUE podany na rysunkach nie wynosi dokładnie 1000.

Z tego powodu, należy zachować szczególną ostrożność przy interpretacji wyników jeśli porównania są rozbieżne pomiędzy publikowanymi wartościami wskaźników UWC i WUE.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że warunki wilgotnościowe badanych gleb zależały od ich składu granulometrycznego, poziomu nawożenia mineralnego i nawadniania interwencyjnego.

2. Wraz ze wzrostem poziomu nawożenia mineralnego następowało istotne zmniejszenie wilgotności gleb. Największe spadki wilgotności stwierdzono w glebach piaskowej (1,2–3,2% v/v) i lessowej (1,9–4,5% v/v) nawożonych dawką NPK III i znacznie mniejsze w glebie gliniastej. Przedstawione dane wskazują na efektywniejsze wykorzystanie wody przez rośliny z gleb lessowej i gliniastej, z uwagi na większą retencję wody użytecznej w tych glebach (odpowiednio: 4,5–36,1 i 7,6–37,7% v/v) w porównaniu z glebą piaskową (2,6–25,8% v/v).

3. Wzrastający poziom nawożenia mineralnego spowodował statystycznie nieistotny wzrost rzeczywistego zużycia wody (WU): NPK I – 338,6; NPK II – 354,9; NPK III – 368,2 mm i statystycznie istotny spadek jednostkowego zużycia

* wartość liczbowa, bez uwzględnienia przeliczania jednostek

wody (UWC) przez rośliny: średnio z 659,7 przy NPK I do 536,3 kg $H_2O.kg^{-1}$ s.m. plonu przy NPK III. Nawożenie mineralne istotnie różnicowało jednostkowe zużycie wody (UWC) przez wszystkie badane rośliny. Najniższe wartości UWC dla ziemniaka, jęczmienia jarego, rzepaku ozimego i pszenicy ozimej przy NPK III wyniosły odpowiednio: 225,2; 552,5; 873,9 i 493,5 kg H_2O . kg^{-1} s.m. plonu. Wzrastające dawki NPK istotnie zwiększyły wydajność zużycia wody (WUE) średnio z 2,22 przy NPK I do 2,63 g s.m. plonu.mm^{-1} $H_2O.m^{-2}$ przy NPK III.

4. Nawożenie obornikiem spowodowało nieistotny wzrost uwilgotnienia badanych gleb i zmniejszenie rzeczywistego zużycia wody przez rośliny. Nie stwierdzono również istotnego wpływu nawożenia obornikiem na kształtowanie się wartości jednostkowego zużycia wody (UWC) i wskaźnika wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny. Stwierdzenia te należy traktować z dużą ostrożnością ze względu na krótki okres badań prowadzonych w tym zakresie (jedna rotacja roślin z nawożeniem obornikiem).

5. Nawadnianie interwencyjne wpłynęło istotnie korzystnie na zwiększenie uwilgotnienia gleb: piaskowej o 0,5–4,8 (średnio 2,4); lessowej o 0,5–6,4 (średnio 3,0) i gliniastej o 0,2–7,3 (średnio 2,9) % v/v. Nawadnienie interwencyjne w największym stopniu poprawiło stosunki wilgotnościowe gleby gliniastej nawożonej NPK III, szczególnie w latach suchych. Nawadnianie interwencyjne istotnie zwiększyło rzeczywiste zużycie wody (WU) przez rośliny; w obiektach bez nawodnień 149,3–497,8 (średnio 312,4), w obiektach z nawadnianiem 296,7–608,7 (średnio 437,2) mm. Stwierdzono istotny wpływ nawadniania na zwiększenie jednostkowego zużycia wody (UWC) przez rośliny. Średnia wartość jednostkowego zużycia wody przez rośliny w obiektach bez nawadniania wyniosła 585,4, a z nawadnianiem 704,6 kg $H_2O.kg^{-1}$ s.m. plonu. Nawadnianie interwencyjne istotnie obniżyło wskaźnik wydajności zużycia wody (WUE) przez rośliny z wartości średniej 2,33 g s.m. plonu.mm^{-1} $H_2O.m^{-2}$ w obiektach bez nawadniania do 1,88 g s.m. plonu.mm^{-1} $H_2O.m^{-2}$ w obiektach z nawadnianiem. Efektywność wykorzystania wody przez rośliny była mniejsza w warunkach nawadniania niż w przypadku braku tego zabiegu, przy czym zarówno nawożenie mineralne, jak i organiczne zmniejszały spadek efektywności wykorzystania wody.

6. Rzeczywiste zużycie wody (WU) było znacznie zróżnicowane w zależności od gatunku rośliny i kształtowało się następująco: pszenica ozima 297,6; jęczmień jary – 357,4; ziemniak – 376,9; rzepak ozimy – 383,7 mm. Badane rośliny różniły się istotnie jednostkowym zużyciem wody (UWC) i wskaźnikiem wydajności zużycia wody (WUE). Wartość wskaźnika UWC badanych roślin wynosiła dla: rzepaku ozimego – 1025,2; jęczmienia jarego – 582,4; pszenicy ozimej – 490,7 i ziemniaka – 247,1 kg $H_2O.kg^{-1}$ s.m. plonu. Najniższym wskaźnikiem wydajności zużycia wody (WUE) charakteryzował się rzepak ozimy – 1,08, wyższym jęczmień jary – 1,78, następnie pszenica ozima – 2,51, a największym ziemniak – 4,43 g s.m. plonu.mm^{-1} $H_2O.m^{-2}$. Wartości rzeczywistego zużycia wody (WU) nie są miaro-

dajnym wskaźnikiem oceny gospodarki wodnej roślin. Lepsze w tym względzie są wskaźniki UWC i WUE. Wykorzystywanie tych wskaźników musi być jednak ostrożne ponieważ średnie wartości UWC są średnią arytmetyczną, a WUE średnią harmoniczną.

7. Ilość przesiąków glebowych zależała od gatunku gleby, poziomu nawożenia mineralnego, nawadniania i użytkowania gleby. Nawożenie mineralne ograniczało straty wody z gleb (przesiąki glebowe), których ilość była dodatnio skorelowana z ilością opadów i nawodnień. Największe straty wody stwierdzono w przypadku gleb ugorowanych (czarny ugór).

8. Plonowanie badanych roślin istotnie zależało od gatunku gleb, poziomu nawożenia mineralnego i nawadniania. Wpływ obornika w tym względzie był nieistotny (ze względu na krótki okres badań stwierdzenie to należy traktować bardzo ostrożnie). Największe plony roślin uzyskano na glebie gliniastej. Najniższe plony jęczmienia jarego, pszenicy ozimej i rzepaku ozimego stwierdzono na glebie piaskowej. Wraz ze wzrostem nawożenia mineralnego z NPK I do NPK III wzrastało plonowanie roślin. Nawadnianie przy wzrastającym nawożeniu z NPK I do NPK III spowodowało istotny wzrost plonu roślin, z wyjątkiem pszenicy ozimej plonującej na ogół najwyżej przy dawce NPK II. Indeks żniwny (HI) określający udział plonu głównego (ziarna lub nasion) w całkowitym plonie biomasy roślin przedstawiał się następująco: jęczmień jary 0,43–0,54 (średnio 0,50); pszenica ozima 0,43–0,50 (średnio 0,47); rzepak ozimy 0,32–0,39 (średnio 0,34).

8. LITERATURA

1. Allen R.G., Pruitt W.O., Jensen M.E.: Environmental requirements of lysimeters. IR Div/ASCE/Honolulu, Reprinted from „Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements", HI/July 23-25, 1991, 170-181.
2. Allison F.E.: Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier, Amsterdam, 1973, 346-359.
3. Andersen M.N., Jensen C.R., Losch R.: The interaction effects of potassium and drought in field-grown barley. I. Yield, water-use efficiency and growth. Acta Agric. Scand. Section B, Soil Plant Sci., 1992, **42:** 34-44.
4. Arvidsson J., Jokela W.E.: A lysimeter study of soil compaction effects on evapotranspiration in a barley crop. Swedish J. Agric. Res., 1995, **25:** 109-118.
5. Awasthi U.D., Bhan S., Uttam S.K.: Root development and moisture use in wheat (Triticum aestivum) and barley (Hordeum vulgare) as influenced by crop variety and nitrogen. Indian J. Agron., 1993, **38:** 559-561.
6. Bac S.: Badania metodyczne nad zużyciem wody przez rośliny uprawne. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1974, **161:** 43-54.
7. Bac S.: Polowe zużycie wodne roślin uprawnych. Rocz. Nauk Rol., 1957, **74-A-4:** 42-46.
8. Bac S.: The influence of cultivated plants on the water cycle. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1991, **396:** 11-18.
9. Bac S., Żyromski A.: Ewapotranspiracja rzeczywista i polowe zużycie wody przez pszenicę jarą w zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1990, **390:** 49-57.

10. Bailey R.J., Groves S.J., Spackman E.: A model for estimating soil moisture changes as an aid to irrigation scheduling and crop water-use studies. II. Field test of the model. Soil Use and Management, 1996, **12:** 129-133.
11. Baledev Singh, Chanasyh D.S., McGill W.B.: Soil water regime under barley with long-term tillage - residue system. Soil Till. Res., 1988, **45:** 59-74.
12. Bamford S.J., Parker C.J., Carr M.K.V.: Effects of soil physical conditions on root growth and water use of barley grown in containers. Soil Till. Res., 1991, **21:** 309-323.
13. Baranowski P., Mazurek W.: Modelowanie procesu ewapotranspiracji - przegląd metod. VIII Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki". Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1996, 107-127.
14. Boesten J.J.T.I., Stroosnijder L.: Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in temperate climate. Neth. J. Agric. Sci., 1986, **34:** 75-90.
15. Brandyk T.: Nawadnianie terenów dolinowych. W: Podstawy melioracji rolnych. Red.: P. Prochal. PWRiL Warszawa, 1986, 406-616.
16. Brisson N., Perrier A.: A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. Water Res., 1991, **27(5):** 719-727.
17. Buniak W., Dmowski Z., Dzieżyc J.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotowego na polowe zużycie wody w płodozmianie czteropolowym w zależności od zwięzłości gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **343:** 139-145.
18. Chauhan C.P.S., Chauhan R.P.S.: Moisture extraction pattern in relation to soil depth and age of [barley, Brassica juncea and Cicer arietinum] crop. J. Agric. Res., 1991, **6:** 344-347.
19. Chmielewski J.M.: Ocena warunków fizycznych gleb jako czynników wpływających na plonowanie roślin w doświadczeniu lizymetrycznym. IUNG Puławy, 1986, **R(222):** 1-81.
20. Chmielewski J.M.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia i gradientu temperatury na uwilgotnienie gleby w modelowych doświadczeniach i mikropoletkach. Pam. Puł., 1976, **66:** 17-32.
21. Chmielewski J.M., Czyż E.: Analysis of water-aeration and thermical relations of model soils in lysimetric experiment on a background of the increasing mineral fertilization and plant cropping. III Int. Con. on Physical Properties of Agricultural Materials. Prague, Czechoslovakia, 1985, **1:** 105-110.
22. Chmielewski J.M., Czyż E.: Wpływ nawadniania na stosunki wodne gleb w doświadczeniu lizymetrycznym. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **343:** 177-182.
23. Czyż E.: Analiza zmian wartości potencjału oksydoredukcyjnego gleb (Eh) w doświadczeniu lizymetrycznym a plonowanie roślin uprawnych. III Międz. Symp. „Ekologiczne aspekty mechanizacji, nawożenia, ochrony roślin i uprawy gleby", Warszawa, 25 września 1996, 195-201.
24. Czyż E.: Effect of the various mineral fertilization and watering on the soil moisture and plant yields. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1994, **405:** 55-61.
25. Czyż E.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia mineralnego i nawadniania interwencyjnego na stosunki wodne w glebach modelowych i plonowanie roślin w płodozmianie. III Symp. Naukowe „Klimat pola uprawnego", Puławy, 15-16 października 1992, 34-35.
26. Czyż E: Zużycie wody przez wybrane rośliny uprawne przy zróżnicowanym nawożeniu na glebie piaskowej w doświadczeniu lizymetrycznym. Mat. II Międz. Symp. „Ekologiczne aspekty mechanizacji nawożenia, ochrony roślin i gleby". IBMER Warszawa, 28 listopada 1995, 135-144.
27. Czyż E., Chmielewski J.M.: Analiza efektu różnicowania uwilgotnienia gleb w układach modelowych przez wzrastające dawki nawożenia mineralnego. Materiały II Szkoły Młodych Pracowników Nauki „Przemiany składników pokarmowych w glebach". Olsztyn, 23-29 czerwca 1985, ART Olsztyn, 1985, 60-75.
28. Czyż E., Kukier U.: The effects of soil bulk density and water content on soil aeration, nitrogen forms and spring barley yield. Bibl. Fragm. Agron., 1997, **2A:** 163-166.
29. Dechnik J., Lipiec J.: Przewodnictwo wodne nienasycone i metody jego pomiaru. Probl. Agrofiz., 1980, **32:** 3-47.

30. Doboszyński L: Wpływ nawożenia azotowego użytków zielonych na tworzenie się plonu i zużycie wody (II). Wiad. Melior., 1968, **2:** 45-47.
31. Dobrzański B., Uziak S., Klimowicz Z., Melke J.: Badanie gleb w laboratorium i w polu. (red. St. Uziak). Lublin UMCS, 1987, 133-156.
32. Doorenbos J., Kassam A.H.: Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage, Rome, 1979, 193.
33. Dzieżyc J.: Melioracje jako czynnik kształtowania środowiska przyrodniczego i produkcji rolniczej. W: Podstawy melioracji rolnych, t. 1. Red.: P. Prochal, PWRiL Warszawa, 1986, 11-41.
34. Dzieżyc J.: Polowe zużycie wody przez rośliny uprawne na glebach lekkich w różnych warunkach wodnych i nawozowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1973, **140:** 227-243.
35. Dzieżyc J.: Potrzeby wodne roślin uprawnych. PWN Warszawa, 1989.
36. Dzieżyc J.: Rolnictwo w warunkach nawadniania. PWN Warszawa, 1988, 17-43, 297-298, 360-373.
37. Dzieżyc J.: Zależność między dynamiką polowego zużycia i zapasów wody w roślinach a przyrostem plonów. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1974, **161:** 125-142.
38. Dzieżyc J., Dmowski Z., Nowak L., Panek K.: Efekty i efektywność produkcyjna deszczowania roślin w uprawie polowej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1987, **326:** 27-43.
39. Dzieżyc J., Nowak L., Panek K.: Dekadowe wskaźniki potrzeb opadowych roślin uprawnych w Polsce. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1987, **314:** 11-33.
40. Dzieżyc J., Rojek S.: Wstępne wyniki badań nad wpływem deszczownia i wysokiego nawożenia na plony niektórych roślin okopowych, zbożowych, pastewnych. Post. Nauk Rol., 1963, **10(B-5):** 65-78.
41. Dzieżyc J., Trybała M.: Rola wody w intensyfikacji produkcji roślinnej na glebach lekkich. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **337:** 179-195.
42. Dzieżyc J., Trybała M.: Zmiany polowego zużycia wody przez buraki cukrowe, pszenicę jarą i ozimą pod wpływem nawadniania. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1969, **88:** 87-100.
43. Elkins C.B., Hoveland C.S.: Soil oxygen and temperature effect on redox potential of three annual forage species. Agron. J., 1977, **69:** 626-628.
44. Fotyma E.: Efektywność nawożenia azotem zbóż w warunkach suszy. The efficiency of cereals N-fertilization in drought conditions. Fragm. Agron., 1993, **4(40):** 105-106.
45. Fotyma E.: Reakcja roślin uprawny polowej na nawożenie azotem. II. Rośliny okopowe. Pam. Puł., 1990, **96:** 37-59.
46. Fotyma E.: Reakcja roślin uprawy polowej na nawożenie azotem. I. Zboża. Pam. Puł., 1992, **93:** 37- 60.
47. Fotyma E., Fotyma M., Maćkowiak H.: Wycena efektu bezpośredniego i następczego nawożenia azotem w dwupolowych członach zmianowań. Pam. Puł., 1992, **100:** 37-59.
48. Fotyma M., Fotyma E., Igras J.: Bilans wody w polu jęczmienia jarego uprawianego na glebie wytworzonej z piasków gliniastych. Fragm. Agron., 1996, **2(50):** 123-136.
49. Fotyma M., Fotyma E., Igras J.: Bilans wody w polu pszenicy ozimej uprawianej na glebie wytworzonej z piasków gliniastych. Fragm. Agron., 1996, **2(50):** 107-123.
50. Gąsior J.: Wpływ wybranych elementów agrotechniki na wartość nasienną ziemniaków. Cz. II. Plon bulw i ich zdrowotność. Zesz. Nauk., AR Kraków, Rolnictwo, 1993, **31:** 101-116.
51. Gianquinto G., Dalla Costa L., Giovanardi G.: Yield, water use efficiency and nitrogen recovery in potato: influence of water table depth. Adv. Horti. Sci., 1997, **11:** 91-96.
52. Gliński J., Łabuda S., Stępniewski W.: Oxygen content, redox potential, and ODR as indices characterizing soil conditions for winter wheat emergence. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1979, **220:** 125-135.
53. Górski T., Marciniak K.: Temperatura powietrza w Puławach w ciągu lat 1987–1990. I. Średnia temperatura miesięczna. Pam. Puł., 1992, **100:** 7-26.
54. Grabarczyk S.: Kryteria lokalizacji deszczowni. Fragm. Agron., 1986, **1:** 15-28.

55. Grabarczyk S.: Wpływ wzrostu plonów na zużycie wody w 1 m warstwy gleby średniej i bardzo lekkiej. Prace i Studia Komitetu Inżynierii i Gospodarki Wodnej, PWN Warszawa, 1965, **7(1):** 125-161.
56. Grabarczyk S. i in.: Możliwości produkcyjne gleby bardzo lekkiej w warunkach deszczowania. Productive Potential of a Very Light Soil Under Spray Irrigation Conditions. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1994, **414:** 145-152.
57. Grabarczyk S., Żarski J., Dudek S.: Porównanie ewapotranspiracji potencjalnej obliczonej różnymi formułami z polowym zużyciem wody. Zesz. Nauk AR Wrocław, Melioracja XXXV, 1990, **191:** 23-29.
58. Gregory P.J.: Growth and functioning of plants roots. In Russell's Soil Conditions and Plant Growth. Ed. A. Wild. Longman Group UK Ltd. Marlow UK, 1999, 113-167.
59. Gregory P.J., Tennant D., Belford R.K.: Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a mediterranean-type environment. Aust. J. Agric. Res., 1992, **43:** 555-573.
60. Igras J.: Field water use by winter wheat. Polowe zużycie wody przez pszenicę ozimą. Fragm. Agron., 1995, **2(46):** 260-261.
61. Igras J.: Polowe zużycie wody roślin ozimych i jarych uprawianych na glebie wytworzonej z gliny średniej, w zależności od nawożenia azotowego i nawadniania (deszczownianego). Fragm. Agron., 1997, **1(53):** 34-45.
62. Igras J.: Porównanie symulowanego i rzeczywistego uwilgotnienia gleby pod pszenicą ozimą. Fragm. Agron., 1995, **1(45):** 13-19.
63. Igras J., Jankowiak J.: Wpływ nawożenia azotem na zużycie wody przez rośliny uprawy polowej. Fragm. Agron., 1988, **2(58):** 72-86.
64. Igras J., Jankowiak J.: Zależność pomiędzy polowym zużyciem wody, ewapotranspiracją potencjalną i plonowaniem wybranych gatunków roślin. Fragm. Agron., 1988, **2(58):** 87-94.
65. Jankowiak J.: Wpływ nawadniania i nawożenia mineralnego na wielkość i jakość plonów roślin. IUNG Puławy, 1982, **R(164):** 66.
66. Jankowiak J., Tomaszewska J.: Efekty deszczowania roślin w zależności od warunków klimatycznych i glebowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1987, **314:** 173-181.
67. Johnsson H., Jansson P.E.: Water balance and soil moisture dynamics of field plots with barley and grass ley. J. Hydrol., Amsterdam , 1991, **129(1-4):** 149-179.
68. Kaczorek S.: Wpływ naturalnych warunków wilgotnościowych na efektywność nawożenia ziemniaków azotem na różnych glebach. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1986, **284:** 257-368.
69. Kalembasa S., Kalembasa D., Król M.: Wpływ dawek azotu i terminów jego stosowania na plon ziarna i białka jęczmienia jarego. Rocz. Nauk Rol., A, 1993, **109(4):** 97-104.
70. Kamińska J., Mazgalska W.: Porównanie dziesięciu genotypów jęczmienia jarego pod względem wykorzystania wody przy różnej wilgotności gleby. Biul. IHAR, 1992, **181/182:** 163-170.
71. Karczmarczyk S., Kopczyński J., Koszański Z., Podsiadło C.: Porównanie reakcji trzech odmian pszenicy jarej uprawianej na glebie lekkiej na deszczowanie oraz intensywne nawożenie mineralne. Inżynieria Rolnicza, Warszawa, 1999, **5(11):** 131-140.
72. Karczmarczyk S., Koszański Z., Podsiadło C.: Przebieg niektórych procesów fizjologicznych oraz plonowanie pszenicy ozimej i pszenżyta pod wpływem deszczowania i nawożenia azotem. Cz. I. Acta Agrobot., 1993, **46(1):** 15-30.
73. Karczmarczyk S., Nowicka S., Koszański Z.: Wpływ deszczowania i nawożenia mineralnego ziemniaków i buraków cukrowych uprawianych na glebie dwóch kompleksów na polowe zużycie wody. Cz. I i II. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **343:** 75-93.
74. Klatt F.: Warunki sukcesów gospodarczych nawadniania oraz możliwości zwiększania plonów przez nawadnianie deszczowniane. Mat. Międz. Konf. Nauk., 23-28.VI.1969, Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1970, **110:** 359-374.

75. Kołodziej J., Liniewicz K.: Intercepcja opadów atmosferycznych w łanie wybranych roślin uprawnych. Wydawnictwo Naukowe FRNA, 1999, **1:** 26-28.
76. Kopeć S., Kostuch R.: Kształtowanie się wilgotności gleby oraz plonów na pastwiskach górskich nawożonych i nienawożonych w zlewni Czarnej Wody koło Jaworek. Rocz. Nauk Rol., 1966, **118(D):** 135-160.
77. Koszański Z., Karczmarczyk S., Podsiadło C.: Reakcja pszenicy ozimej uprawianej na glebie kompleksu żytniego dobrego na deszczowanie i nawożenie azotem. Cz. I. Plonowanie pszenicy ozimej. Zesz. Nauk AR Szczecin, Rolnictwo, 1995, **59(165):** 3-9.
78. Koszański Z., Karczmarczyk S., Podsiadło C.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na jęczmień browarny i pastewny uprawiany na glebie kompleksu żytniego dobrego. Cz. I. Plonowanie roślin. Zesz. Nauk AR Wrocław, Konf., 1995, **9(267):** 161-170.
79. Koszański Z., Karczmarczyk S., Podsiadło C., Roy M.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na pszenicę i pszenżyto ozime uprawiane na glebie kompleksu żytniego dobrego. Cz. I. Plonowanie roślin. Zesz. Nauk AR Szczecin, Rolnictwo, 1995, **59(165):** 35-41.
80. Koszański Z., Karczmarczyk S., Podsiadło C., Śnieżko D.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na ziemniaki i glebę. Cz. III. Gospodarka wodna oraz chemiczne właściwości gleby. Zesz. Nauk AR Szczecin, 1995, **59(165):** 29-34.
81. Koszański Z., Karczmarczyk S., Zbieć I.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na ziemniaki i glebę. Cz. I. Plonowanie roślin. Zesz. Nauk AR Szczecin, Rolnictwo, 1995, **59(163):** 17-22.
82. Koszański Z., Podsiadło C., Roy M., Zbieć I.: Reakcja zbóż jarych na deszczowanie. Reaction of spring cereals on overhead irrigation. Mat. Sesji Naukowej AR Szczecin, 1994, 145-148.
83. Koźmiński C., Michalska B.: Extreme soil moisture under winter crops in spring in Poland. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1995, **419:** 59-67.
84. Kuszelewski L., Łabętowicz J.: Studia nad współdziałaniem nawożenia i nawadniania w uprawie roślin polowych. Cz. I. Wpływ nawadniania na ilość i jakość plonów oraz wykorzystanie nawozów. Rocz. Nauk Rol., 1975, A, **100(4):** 66-87.
85. Kuś J.: Wpływ pogłębionej uprawy oraz nawożenia na plonowanie roślin i kształtowanie się niektórych właściwości gleb w zmianowaniach o różnym udziale zbóż. IUNG Puławy, 1976, **R(108)**.
86. Kuziemska B., Kalembasa S.: Wpływ wapnowania, dawki i rodzaju osadów ściekowych oraz nawożenia NPK na plon, skład chemiczny roślin i gleby. Cz. 1. Plon roślin. Arch. Ochr. Środ., 1997, **1/2:** 97-108.
87. Kuźniar K.: Kształtowanie się plonowania ziemniaków „Dar" w zależności od wpływu wilgotności gleby i niektórych elementów meteorologicznych. Hod. Rośl. Aklim. i Nasien., 1968, **2:** 159-174.
88. Kuźniar K.: The influence of the moisture content of soil, severals of fertilization, and some meteorological elements on the yields of winter wheat. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1979, **220:** 228-241.
89. Leenhardt D., Voltz M., Rambal S.: A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. Eur. J. Agron., 1996, 1-14.
90. Lu X.X., Biot Y.: Effect of soil erosion on spring barley growth in East Anglia. Pedosphere, 1994, **4:** 59-66.
91. Leuning R., Condon A.R., Dunin F.X., Zegelin S., Denmead O.T.: Rainfall interception and evaporation from soil below and from the wheat canopy. Agric. For. Meteorol., 1994, **67:** 221-238.
92. Łykowski B.: Warunki meteorologiczne zaopatrzenia roślin w wodę. W: Potrzeby wodne roślin uprawnych. Red.: J. Dzieżyc, PWN Warszawa, 1989, 11-35.
93. Malicki L.: Oznaczanie zużycia wody przez rośliny uprawne. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1968, **88:** 127-137.

94. Malicki M: Zagadnienia oraz technika pomiaru wilgotności gleb i potencjału wody glebowej. Fizyczne metody badań materiału glebowego. Mat. Instytutu Agrofizyki, Lublin, 1979, 37-74.
95. Marcilonek S.: Polowe zużycie wody przez niektóre rośliny uprawne na glebach o różnej pojemności wodnej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1974, **161:** 197-205.
96. Matul K., Sarnacka S.: Wyniki badań wpływu zwiększającego nawożenia na kształtowanie się elementów bilansu wodnego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1969, **88:** 65-75.
97. Mazur T., Koc J.: Badania lizymetryczne nad działaniem nawozowym i wymywaniem składników pokarmowych z obornika i gnojowicy. Zesz. Nauk ART. Olsztyn, Rolnictwo, 1976, **17:** 65-75.
98. Nagowiecka H.: Wskaźniki zużycia i potrzeb wodnych w produkcji roślinnej w rejonie Krakowa. Zesz. Nauk. AR Kraków, 1978, **58:** 7-78.
99. Nowak L., Trybała M.: Efektywność produkcyjna deszczowania i nawożenia (azotem) w uprawie jęczmienia jarego na glebie kompleksy żytniego dobrego. Cz. 1: Wielkość i struktura plonu oraz polowe zużycie wody. Zesz. Nauk AR Wrocław, Konf., 1995, **9(267):** 141-150.
100. Nowak L., Trybała M.: Warunki wodno-nawozowe a plonowanie odmian pszenicy. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1987, **314:** 257-270.
101. Okruszko H.: Przyrodniczo techniczne podstawy melioracji terenów dolinowych. W: Podstawy melioracji rolnych (red. P. Prochal). PWRiL Warszawa ,1986, 43-80.
102. Olszta W., Zawadzki S.: Właściwości retencyjne gleb, metody ich określania oraz sposoby wykorzystania w melioracji. Materiały instruktażowe, IMUZ Falenty, 1991, **94:** 1-54.
103. Orzeł W.: Intercepcja opadów atmosferycznych w łanach roślin uprawnych. Praca doktorska. AR Lublin, 1980.
104. Panek K.: Potrzeby wodne roślin zbożowych. W: Potrzeby wodne roślin uprawnych. Red.: J. Dzieżyc, PWN Warszawa, 1989, 50-84.
105. Panek K., Wojnowska T., Sienkiewicz S.: Wpływ nawożenia obornikiem i NPK na dynamikę uwilgotnienia gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1993, **411:** 96-100.
106. Pasela E., Zawora T.: Wpływ wilgotności mady ciężkiej na wysokość roślin i plon ziarna jęczmienia jarego. Prace Komisji Naukowych PTG. Red.: E. Chrostowska, Warszawa, 1987, **100:** 112-119.
107. Patoine M., Fortin J.P.: Ajustement d«un modèle informatise de gestion de l«irrigation. Can. Agric. Eng., 1992, **34:** 305-317.
108. Pereira A.B., Cury D.M., Pedras J.F., Villa-Nova N.A.: Use of lysimeters to assess evapotranspiration of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Centifica Jaboticabal., 1995, **23:** 265-278.
109. Podstawka E.: Deszczowanie i różne dawki azotu a polowe zużycie wody w intensywnym płodozmianie na rędzinie. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **343:** 145-151.
110. Podstawka-Chmielewska E., Kapusta B.: Plonotwórczy efekt deszczowania i nawożenia azotowego w uprawie niektórych zbóż na glebie lekkiej. Zesz. Nauk AR Bydgoszcz, Rolnictwo, 1992, **180(32):** 109-115.
111. Pondel H., Sadurski W.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia mineralnego na właściwości chemiczne gleb w doświadczeniu lizymetrycznym. Pam. Puł., 1988, **91:** 271-281.
112. Powlson D.S., Poulton P.R.: Using the long – term experiments at Rothamsted to address current agricultural and environmental issues. Arch. Acker - Pfl. Boden., 1998, **42:** 455-478.
113. Pradas U.K., Pradas T.M., Gupta A.K., Pradas S.S.: Influence of irrigation on yield, profile moisture use, water-use efficiency and net return of winter maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) intercropping. Indian J. Agric. Sci., 1997, **67:** 193-196.
114. Prośba-Białczyk U., Mydlarski M.: Uprawa ziemniaków na wczesny zbiór przy zastosowaniu osłony z włókniny. Fragm. Agron. 1998, **1(57):** 74-84.
115. Przybyła Cz.: Ewapotranspiracja rzeczywista w sterowaniu nawodnieniami deszczownianymi. Rocz. AR Poznań, Melior. Inż. Środ., 1994, **13(257):** 255-262.
116. Richi M.S.: Czasowo-przestrzenny rozkład stosunku ewapotranspiracji rzeczywistej do opadów w Wielkopolsce. Rocz. Nauk Rol., F, 1994, **83(3/4):** 43-56.

117. Rijtema P.E.: Soil Moisture Forecasting. J.C.W. Nota. Wageningen,1970, 513.
118. Riley H.: Irrigation of cereals, potato, carrot and onion on a loam soil at various levels of moisture deficit. Norwegian J. Agric. Sci., 1989, **3:** 117-145.
119. Roguski W., Gabrych K.: Parowanie terenowe niektórych roślin uprawnych na glebach wytworzonych z piasków gliniastych mocnych. Zesz.. Probl. Post. Nauk Rol., 1974, **161:** 169-185.
120. Roztropowicz S.: Środowiskowe, odmianowe i nawozowe zmienności składu chemicznego bulw ziemniaka. Fragm. Agron., 1989, **1:** 33-75.
121. Russell G.: Barley knowledge base. Agricultural Information System for EC. European Comm. Joint Res. Centre, CD NA-13040-EN-C, 1990, 142.
122. Russell G.: Crop evaporation, surface resistance and soil water status. Agric. Meteorol., 1980, **21:** 213-226.
123. Ruszkowska M., Rębowska Z., Gliński J., Baran S., Chmielewski J., Chojnacki A., Flis-Bujak M., Kusio M., Malińska H., Mroczkowski W., Stępniewski W., Szember A., Szreniawska M, Sykut S., Warchołowa M.: Dynamika i bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym. Wyniki badań za okres I rotacji (1971–1975). Rocz. Nauk Rol., Monografie, 1979, **D(173):** 1-104.
124. Ruszkowska M., Rębowska Z., Kusio M., Sykut S., Wójcikowska-Kapusta A.: Bilans mikroelementów w doświadczeniu lizymetrycznym (1985–1989). Cz. I i II. Pam. Puł., 1994, **105:** 41-77.
125. Ruszkowska M., Rębowska Z., Sykut S., Kusio M.: Bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym (1978–1981). Bilans azotu, fosforu i potasu. Pam. Puł., 1984, **82:** 7-28.
126. Ruszkowska M., Rębowska Z., Sykut S., Kusio M.: Bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym (1981–1985). I. Bilans azotu, fosforu i potasu. Pam. Puł., 1988, **81:** 215-234.
127. Ruszkowska M., Sykut S.: Wymywanie składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym w zróżnicowanych warunkach nawożenia. Zesz. Nauk. AR Kraków, 1982, **168:** 19-27.
128. Ruszkowska M., Sykut S., Kusio M.: Plony roślin i bilans składników pokarmowych w zależności od rodzaju gleby i nawożenia w doświadczeniu lizymetrycznym (1977–1989). Zesz. Nauk. AR Kraków, 1993, **37:** 153-168.
129. Ruszkowska M., Terelak T.: Wpływ warunków powietrzno-wodnych na zachowanie się składników pokarmowych w glebie i na procesy fizjologiczne roślin. Probl. Agrofiz., 1992, **67:** 53-64.
130. Ruszkowska M., Warchołowa M., Rębowska Z., Sykut S.: Bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym (1977–1981). II. Bilans wapnia, magnezu i siarki. Pam. Puł., 1984, **82:** 29-50.
131. Salam A., Al Tahir O.A., Al Tahir M.A.: Soil moisture regime effects on productivity of some barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes. Ann. Agric. Sci. Cairo, 1991, **36:** 121-127.
132. Samborski A., Kołodziej J.: Polowe zużycie wody przez ziemniaki, koniczynę czerwoną i groch lub bobik w Obserwatorium Agrometeorologicznym w Felinie (1966-1985). Ann. UMCS, Sect. E, 1993, **48**: 93-96.
133. Samborski A., Kołodziej J.: Polowe zużycie wody przez żyto ozime, pszenicę ozimą i jęczmień jary w Obserwatorium Agrometeorologicznym w Felinie (1966–1985). Ann. UMCS, Sect. E, 1993, **48**: 97-103.
134. Sarnacka S.: Badanie parowania i retencji wodnej gleb w warunkach zróżnicowanego nawożenia i nawadniania. Prace Instytutu Gosp. Wod., 1973, **7(4)**.
135. Sarnacka S.: Retencja wody użytecznej w glebie na początku okresu wegetacyjnego. Prace Komisji Fizyki Gleb (red. E. Chrostowska), Warszawa, 1987, **100**: 33-45.

136. Sarnacka S.: Wyznaczenie ewapotranspiracji rzeczywistej na podstawie ewapotranspiracji potencjalnej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1983, **277:** 219-226.
137. Sarnacka S., Świętochowski B., Krężel R.: Wpływ nawożenia i nawadniania na retencję wodną gleb, polowe zużycie wody i plonowanie roślin. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1973, **140:** 117-129.
138. Sawicka C.: Czynniki kształtujące plony czterech odmian ziemniaków. Biul. Inst. Hod. Rośl., 1984, **154:** 179-187.
139. Sharma H.K., Chakor I.S.: Studies on autumn potato tuber, dry matter yield and WUE as influenced by soil moisture regimes. Indian Agriculturist., 1993, **37:** 261-266.
140. Sharma M.L., Uehara G.: Influence of soil structure on water relations in humic latosoils. 1. Water retention., Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1968, **32:** 765-769.
141. Sharma R.A.: Land and water use efficiency of different rainfed crops in relation to nutrients. Appld. Crop Res. Hisar., 1990, **3:** 126-136.
142. Sobczuk H.A., Walczak R.T.: Problemy metrologii stosowanej w zakresie fizyki gleby. Rocz. Glebozn., Warszawa ,1996, **XLVII(3/4):** 247-250.
143. Spychalski M., Posłuszny J., Schefke R., Kędziora A.: Określenie czynnej warstwy gleby na podstawie dynamiki uwilgotnienia profilu glebowego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1986, **268:** 395-407.
144. Stępniewski W., Gliński J.: Reakcja roślin na stan aeracji gleby. Problemy Agrofizyki, 1985, **45:** 45-46.
145. Stroosnijder L.: Soil evaporation: test of practical approach under semi-arid conditions. Netherlands J. Agric. Sci., 1987, **35:** 417-426.
146. Supit I., Hooijer A., van Diepen C.: System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Agric. Information System for EC. European Comm. Joint Res. Centre, L-2920 Luxembourg, 1994.
147. Sykut S.: Dynamika procesu wymywania składników mineralnych z gleb w doświadczeniu lizymetrycznym. I. Aniony. Pam. Puł., 1993, **103:** 11-35.
148. Szymański J., Kostrzewa S.: Odwadnianie użytków rolnych. W: Podstawy melioracji rolnych, 1. Red.: P. Prochal, PWRiL Warszawa, 1986, 222-408.
149. Ślusarczyk E .: Określenie retencji użytecznej gleb mineralnych dla prognozowania i projektowania nawodnień. Melior. Rol., 1983, **3:** 1-10.
150. Ślusarczyk E.: Potrzeby i wykorzystanie wody przez rośliny uprawne w warunkach różnego uwilgotnienia. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1985, **294:** 41-51.
151. Ślusarczyk E.: Wpływ wielkości biomasy na pobieranie wody z gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1978, **228:** 115-126.
152. Ślusarczyk E., Jankowiak J., Chróst J., Tomaszewska J.: Zużycie wody na ewapotranspirację kilku roślin uprawnych w zróżnicowanych warunkach nawadniania i nawożenia. Pam. Puł., 1984, **83:** 9-27.
153. Thompson L.M., Troeh F.R.: Gleba i jej żyzność. PWRiL Warszawa, 1978, 101-130, 476-477.
154. Tomaszewska J., Ślusarczyk E.: Polowe zużycie i współczynnik jednostkowego zużycia wody wybranych roślin przy pełnym i ograniczonym zaopatrzeniu w wodę. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1989, **343:** 157-162.
155. Trought M.C.T., Drew M.C.: The development of waterlogging damage in wheat seedlings *(Triticum aestivum* L.*)*. I. Shoot and root growth in relation to changes in the concentrations of dissolved gases and solutes in the soil solution. Plant Soil, 1980, **54:** 77-94.
156. Trybała M.: Wpływ warunków glebowych na zaopatrzenie roślin w wodę. W: Potrzeby wodne roślin uprawnych. Red. J. Dzieżyc, PWN Warszawa, 1989, 227-250.
157. Trybała M.: Zużycie i produkcyjne wykorzystanie wody przez rośliny uprawne w różnych warunkach wodnych i nawozowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1986, **268:** 355-371.

158. Trybała M., Małkiewicz H.: Wpływ opadów i nawodnień na właściwości powietrzno-wodne gleby lekkiej pod burakami cukrowymi (studium metodyczne). Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1985, **294:** 383-396.
159. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Hodara J.: Metody badania i wskaźniki oceny agrofizycznego efektu działania narzędzi uprawowych na glebę. Probl. Agrofiz., 1977, **26:** 51-55.
160. Van Keulen H., Wolf J.: Modelling of Agricultural Production: weather, soils and crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1986, 479.
161. Wessolek G., Renger M.: Einfluss der Beregnungssteuerung auf Wasserhaushalt und Pflanzenertrag. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 1993, **34:** 9-18.
162. Yang Q.Y., Lu C.H.: Water surplus and deficiency for crop production in the farming area of the Xizang (Tibet) Autonomous Region. Chinese J. Arid Land Res., 1992, **5:** 265-271.
163. Zawadzki S., Olszta W.: Określenie polowej pojemności wodnej w profilu glebowym w oparciu o krzywe pF. Wiadomości IMUZ, Falenty, 1981, **14(2)**.
164. Żarski J.: Reakcja zbóż jarych na deszczowanie i nawożenie azotowe w warunkach gleby bardzo lekkiej. ART Bydgoszcz, 1993, Rozprawy **59**.
165. Żyromski A.: Wyniki wieloletnich badań (1964–1987) nad zasobami wodnymi gleby w obserwatorium agro- i hydrometeorologii AR Wrocław-Swojec. Zesz. Nauk. AR Kraków, Sesja Naukowa, 1991, **27:** 147-155.

SOIL MOISTURE AND ITS USE BY PLANTS IN RELATION TO SOME AGROTECHNICAL FACTORS

Summary

The objective of the work was to make accurate measurements of soil water balance so that the water use by plants could be determined and related to crop yield. This enabled the water use efficiency and unit water consumption of the crop plants to be calculated.

The experiments were made in the years 1978-1994 using an array of 70 drainage lysimeters at the Institute of Soil Science and Plant Cultivation (IUNG) in Puławy, Poland. The lysimeters were of 1 m^2 area and were 1.5 m deep. Three different soils were used with clay contents of 4, 8 and 12 %. In the Polish system these are classified as sand, loess and loam. A meteorological station was located near to the lysimeter station and provided precipitation measurements and other environmental data.

The lysimeters were fitted with neutron probe access tubes. Measurements with a neutron probe apparatus enabled the water content of the soils in the lysimeters to be measured throughout the growing season. The water use by the plants was assumed to be equal to the total evapotranspiration and was calculated as the difference between the water inputs (precipitation plus irrigation) and the water losses (drainage water plus the difference in the amount of water stored in the soil profile between the beginning and the end of the growing season).

A four-year crop rotation comprising potato, spring barley, winter rape and winter wheat was studied. The measurements were made for 16 years, which therefore included four complete crop rotations. In every year, three levels of inorganic fertilization were applied. In the first 12 years of the experiment (three crop rotations) an irrigation treatment was included. In the final 4 years of the experiment (one crop rotation), the irrigation treatment was replaced by an organic fertilization (manure) treatment.

The three different soils gave mean water use by plants of 349, 378 and 336 mm on average for the soils with 4, 8 and 12 % clay respectively. When crop yield was taken into consideration, the corresponding mean values of unit water consumption were 611, 615 and 533 kg water use per kg of crop yield, and of water use efficiency were 2.34, 2.25 and 2.76 g crop yield per m^2 per mm of water use.

The different crops used different total mean amounts of water of 377, 357, 384 and 298 mm for potato, spring barley, winter rape and winter wheat, respectively. This gave corresponding mean values of unit water consumption of 247, 582, 1025 and 491 kg water use per kg crop yield and of water use efficiency of 4.43, 1.78, 1.08 and 2.51 g crop yield per m^2 per mm of water use. Mean values of harvest index (HI) were 0,50; 0,34 and 0,47 for spring barley, winter rape and winter wheat. It was not possible to determine HI for potato.

Increasing levels of mineral fertilization resulted in greater crop yields and therefore smaller values of unit water consumption or higher values of water use efficiency. The mean values of water use were 339, 355 and 368 mm for the low, medium and high levels of fertilization although these values are not statistically different. The corresponding mean values of unit water consumption were 660, 563 and 536 kg water use per kg of crop yield, and of water use efficiency were 2.22, 2.49 and 2.63 g crop yield per m^2 per mm of water use. For the four different crops (potato, spring barley, winter rape and winter wheat) at the highest level of mineral fertilization, the mean values of unit water consumption were found

to be 225, 553, 874 and 494 kg water use per kg of crop yield and the corresponding mean values of water use efficiency were 4.9, 1.9, 1.3 and 2.8 g crop yield per m^2 per mm of water use. Higher levels of fertilization resulted in greater soil drying except with the 12% clay soil. The most intensive soil drying occurred with the loam soil (8% clay). With the 12% clay soil, the highest level of fertilization produced less soil drying than the intermediate level of fertilization.

Irrigation increased mean soil water content by mean values of 2,4 3,0 and 2,9 % v/v for the soils with 4, 8, and 12% clay content, respectively. The greatest increase was with the 12% clay soil at the highest level on mineral fertilization. Irrigation increased water use from a mean value of 312 mm to 437 mm. Unit water consumption was increased by irrigation from a mean value of 585 to 705 kg water use per kg crop yield. This is equivalent to a reduction in water use efficiency from 2.33 to 1.88 g crop yield per m^2 per mm of water use.

Organic fertilization (manure) had no statistically significant effect on either water use or crop yield. However, this conclusion is based on only one crop rotation.

The amount of drainage water decreased with increasing levels of mineral fertilization, and increased with increasing values of water input (precipitation plus irrigation). The amount of drainage water was greatest with the soil with 4% clay, and was least with the soil with 8% clay.

The results of this study show that to determine how to use water the most efficiently, we need to consider not only the water use by crops but the water use in relation to crop yield. This ratio, the water use efficiency, enables us to decide how to grow crops in ways which minimise the use of water. This is of importance in view of the fact that water is becoming an increasingly scarce resource.

10. OBJAŚNIENIA I SYMBOLE
(Abbreviation and symbols)

WARIANTY (TREATMENTS)

– Gleba; Soil	**{S}**
Gleba piaskowa; Sandy soil	$\{S_1\}$
Gleba lessowa; Loess soil	$\{S_2\}$
Gleba gliniasta; Loamy soil	$\{S_3\}$
– Nawożenie mineralne NPK; Fertilization	**{F}**
Nawożenie mineralne NPK I; Fertilization NPK I	$\{F_1\}$
Nawożenie mineralne NPK II; Fertilization NPK II	$\{F_2\}$
Nawożenie mineralne NPK III; Fertilization NPK III	$\{F_3\}$
– Nawadnianie interwencyjne; Irrigation	**{I}**
Obiekty bez nawadniania ($-H_2O$); No irrigation	$\{I_o\}$
Obiekty z nawadnianiem ($+H_2O$); With irrigation	$\{I_1\}$
– Nawożenie obornikiem; Manure	**{M}**
Obiekty bez obornika (-FYM); No farm yard manure	$\{M_o\}$
Obiekty z obornikiem (+FYM); With farm yard manure	$\{M_1\}$
– Kontrola (ugór, tzw. czarny ugór); Control (fallow)	**{0}**
– Zmianowanie roślin; Crop rotation	**{C}**
Ziemniak; Potato	$\{C_1\}$
Jęczmień jary; Spring barley	$\{C_2\}$
Rzepak ozimy; Winter rape	$\{C_3\}$
Pszenica ozima; Winter wheat	$\{C_4\}$
– Temperatura; Temperature (°C)	**T**
– Opad; Precipitation (mm)	**P**
– Ewapotranspiracja; Evapotranspiration (mm)	ET
– Przesiąk (odpływ wgłębny); Drainage (mm)	**D**
– Wilgotność gleby; Volumetric water content ($m^3.m^{-3}$) × 100%; (%, v/v)	θ
– Plon roślin; Yield (g s.m./lizymetr; kg św. m./lizymetr; $kg.m^{-2}$; $t.ha^{-1}$)	**Y**
– Głębokość; Depth (cm)	**{d}**
Głębokość 30; Depth 30 (cm)	$\{d_1\}$
Głębokość 55; Depth 55 (cm)	$\{d_2\}$
Głębokość 90; Depth 90 (cm)	$\{d_3\}$
– Warstwa gleby ; Soil layer (0–100 cm)	**{L}**
I warstwa gleby; Soil layer I (0–30 cm)	$\{L_1\}$
II warstwa gleby; Soil layer II (30–60 cm)	$\{L_2\}$
III warstwa gleby; Soil layer III (60–100 cm)	$\{L_3\}$
– Wartość średnia; Mean	$\bar{x}$
– Zapas wody w glebie dla warstw (L_1, L_2, L_3) Water stored in the soil for layers (L_1, L_2, L_3) $\mathbf{S_w = 0{,}1 \times d \times \theta}$ (mm) gdzie: **d** – grubość warstwy (cm), θ – wilgotność gleby ($m^3.m^{-3}$) × 100%; when: **d** is in cm, and θ is in ($m^3.m^{-3}$) × 100%;	S_w

- Różnica zapasu wody w glebie w warstwie 0–100 cm w okresie wegetacji ΔS_w
  Change in soil water stored for layer 0–100 cm during vegetation
  $\Delta S_w = S_i - S_f$ (mm)
- Początkowy zapas wody w glebie dla ***n*** warstw
  Initial water stored in soil for ***n*** layers (mm) S_i

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} S_{ij} \text{(mm)}$$

  dla 3 warstw gleby; for 3 soil layers used:
  $S_i = S_{i1} + S_{i2} + S_{i3}$
  Początkowy zapas wody dla I warstwy 0–30 cm $\{L_1\}$ (mm) S_{i1}
  Początkowy zapas wody dla II warstwy 30–60 cm $\{L_2\}$ (mm) S_{i2}
  Początkowy zapas wody dla III warstwy 60–100 cm $\{L_3\}$ (mm) S_{i3}
- Końcowy zapas wody w glebie dla ***n*** warstw
  Final water stored in soil for ***n*** layers (mm) S_f

$$S_f = \sum_{j=1}^{n} S_{fj} \text{ (mm)}$$

  dla 3 warstw gleby; for 3 soil layers used:
  $S_f = S_{f1} + S_{f2} + S_{f3}$
  Końcowy zapas wody dla I warstwy 0–30 cm $\{L_1\}$ (mm) S_{f1}
  Końcowy zapas wody dla II warstwy 30–60 cm $\{L_2\}$ (mm) S_{f2}
  Końcowy zapas wody dla III warstwy 60–100 cm $\{L_3\}$ (mm) S_{f3}
- Bilans wodny gleby; Water balance in soil (mm)
  $S_i + (P + I) - D = WU + S_f$ (mm)
- Polowe zużycie wody; Field water consumption /Water Use/ (mm) **WU**
  $WU = P + I - D + (S_i - S_f)$ lub $WU = P + I - D + \Delta S_w$
- Rzeczywiste (polowe) zużycie wody = ewapotranspiracja aktualna (mm) WU = ET
  Water use = ewapotranspiration (mm)
- Jednostkowe zużycie wody (kg $H_2O.kg^{-1}$ s.m. plonu); **UWC**
  Unit water consumption (kg $H_2O.kg^{-1}$ d.m. yield)
  UWC = WU/Y
- Wskaźnik wydajności zużycia wody (g s.m. plonu . mm^{-1} H_2O . m^{-2}) **WUE**
  Water use efficiency (g d.m. yield . mm^{-1} H_2O . m^{-2})
  WUE = Y/WU

IUNG Puławy, zam. 2/2001 nakł. 200 egz. B-5