

Wiesław PTACH

Katedra Kształtowania Środowiska i Melioracji SGGW

Badania modelowe nawodnień wglębnych z wykorzystaniem miernika TDR

Wstęp

Za pomocą mikronawodnień kształtuje się w strefie korzeniowej warunki rozwoju roślin. Istotne są tu takie czynniki jak: właściwe uwilgotnienie gleby, warunki pokarmowe, poziom zasolenia oraz rodzaj i ilość organizmów glebowych. Charakterystyczną cechą mikronawodnień jest bardzo oszczędne wykorzystanie wody, nawozów i energii koniecznej do dostarczenia ich roślinom. Mikronawodnienia obejmują różne systemy nawadniające, wśród których wyróżnić można nawodnienia wglębne, kropłowe i mikrodeszczownie. Specyfiką nawodnień wglębnych jest możliwość dostarczania wody lub roztworów nawozowych bezpośrednio pod powierzchnię terenu do strefy korzeniowej roślin. Taki sposób nawadniania ogranicza straty wody na parowanie z powierzchni roślin i gleby oraz zapobiega niekorzystnemu procesowi zaskorupiania się jej powierzchni. Przy nawadnianiu wglębnym doprowadzenie nawozów w sąsiedztwo korzeni zwiększa efektywność ich wykorzystania i pozwala na uniknięcie strat

spowodowanych splukiwaniem w czasie opadów.

W nawodnieniach wglębnych poziom uwilgotnienia gleby oraz zawartości w niej soli pokarmowych regulować można przez zmianę wielkości dawek polewowych lub częstotliwości ich podawania. Ta możliwość elastycznego dostosowywania systemu technicznego do aktualnych potrzeb wodnych i pokarmowych roślin jest dużą zaletą tego rodzaju nawodnień. Oprócz technologii nawadniania o stopniu i zasięgu zwilżania gleby decyduje wiele czynników, w tym głównie właściwości fizykochemiczne gleb. Określenie zasięgu i przebiegu zmian zawartości soli pokarmowych oraz uwilgotnienia gleby wokół przewodów nawadniających stanowi jedno z kluczowych zagadnień przy projektowaniu systemu nawadniającego. Proces przepływu roztworu nawozowego w przypowierzchniowej strefie nienasyconej jest zjawiskiem bardzo złożonym, gdyż zachodzą tu wzajemnie sprzężone procesy fizykochemiczne i biologiczne. Dlatego też dopiero stosunkowo niedawno pojawiły się prace przedstawiające teoretycz-

ne rozwiązania tego zagadnienia. W przypadku nawodnień wglębnych nie opracowano jednak jeszcze w pełni zweryfikowanego modelu matematycznego do prognozowania migracji roztworów nawozowych, a w szczególności roztworów azotowych. Dotychczasowe badania eksperymentalne wykonywano za pomocą stosunkowo mało dokładnej aparatury pomiarowej (Marcilonek 1956, Pierzgałski 1992). Ponadto dotyczyły one jedynie uwilgotnienia gleby. Dlatego też w celu zebrania wstępnego rozpoznawczego materiału dla empirycznego stwierdzenia możliwości i efektywności powierzchniowego nawożenia wykonano badania modelowe na modelu gruntowym poddając jednocześnie analizie możliwość zastosowania w nich miernika TDR. Uzyskane wyniki będą pomocne do planowanych przyszłych prac nad weryfikacją rozwiązań teoretycznych.

Pomiary wilgotności i zasolenia gleby z zastosowaniem techniki reflektometrii czasowej (TDR)

Mimo iż możliwość zastosowania zasilanej impulsem napięcia symetrycznej linii transmisyjnej do określania przenikalności elektrycznej gleby wykazana została stosunkowo wcześniej (Malicki 1993 za Kirkschetherem), to pierwsza udana próba wykorzystania miernika TDR do pomiaru wilgotności gleby na podstawie pomiaru jej przenikalności elektrycznej miała miejsce na początku lat 70. (Davisa i Chudobiaka). Cytowane

przez Malickiego (1993) pozytywne rezultaty podobnych badań podjętych przez innych badaczy (Dasberga i Daltona, Malickiego i Skieruchę, Toppa i Davisa) spowodowały gwałtowny wzrost zainteresowania wykorzystaniem TDR do pomiaru wilgotności gleb.

Jako reflektometr do badań laboratoryjnych stosowano oscyloskop próbujący z wkładką TDR, natomiast do pomiarów w polu stosowano i nadal stosuje się przenośny tester kabli, oryginalnie przeznaczony do lokalizacji i określania charakteru uszkodzeń linii transmisyjnych. Pierwszy połowy jak i laboratoryjny miernik TDR, oryginalnie przeznaczony do jednoczesnego pomiaru elektrycznej przenikalności i konduktywności oraz temperatury gleby, został opracowany i wykonany przez Malickiego i Skieruchę w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Zastosowana przez nich metoda pomiaru nie wymaga specyficznej kalibracji dla poszczególnych gleb.

Pomiar wilgotności gleby. Wilgotność objętościowa gleby (Θ) obliczana jest z jej stałej dielektrycznej (ϵ), na podstawie wcześniejszej, empirycznej kalibracji. Wielkość stałej dielektrycznej wyznaczana jest na podstawie pomiaru prędkości przemieszczania się w glebie impulsu elektromagnetycznego (V), z zależności:

$$\epsilon = \left(\frac{c}{V} \right)^2$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni

Źródłem fal elektromagnetycznych w mierniku jest generator impulsu szpilkowego, połączony przewodem z oscyloskopem oraz zainstalowanym w glebie czujnikiem. Czujnik pomiarowy zbudowany jest z dwu nieizolowanych, równoległych prętów. Sferę czułości czujnika wyznacza opisany na jego prętach walec wysokości równej długości prętów i średnicy ok. trzykrotnie większej od ich wzajemnej odległości.

Gwałtowna zmiana napięcia generatora rozwija impuls elektromagnetyczny, który biegnie przewodem do czujnika, osiąga jego początek w chwili t_1 i dalej już w glebie, gdzie w chwili t_2 osiąga koniec czujnika. Na połączeniu czujnika z przewodem występuje nieciągłość elektrycznej impedancji systemu (impedancja czujnika i przewodu są różne). Dlatego w chwili t_1 część energii impulsu odbija się i wraca do generatora. Pozostały impuls przebiega dalej, wzdłuż prętów zainstalowanych w glebie. Impuls ten osiąga koniec czujnika w chwili t_2 , na skutek nieciągłości impedancji w tym punkcie, odbija się i powraca do generatora.

Im większa jest wilgotność gleby, tym większa jest wartość jej stałej dielektrycznej i odpowiednio mniejsza prędkość przemieszczania impulsu w glebie oraz konsekwentnie dłuższy odcinek czasu $t = t_2 - t_1$, dzielący odbicia impulsu od początku i końca czujnika. Mierząc czas t oraz znając długość prętów czujnika L można wyliczyć współczynnik załamania fal elektromagnetycznych ε , a następnie liniowo z nim związaną wilgotność objętościową gleby Θ :

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{2L} t$$

$$\Theta = f(\sqrt{\varepsilon})$$

Pomiar zasolenia gleby. Na podstawie technologii TDR mierzyć można, posługując się tym samym miernikiem, elektryczną przewodność gleby (σ), która odzwierciedla jej zasolenie.

Pochodzący z generatora impuls napięcia elektrycznego U_{in} , który wchodzi do gleby wzdłuż czujnika, jest w momencie jej opuszczania stłumiony do poziomu U_{out} . Stosunek tych dwu amplitud wyznacza elektryczną przewodność gleby:

$$\sigma = \frac{1}{120L\pi} \ln\left(\frac{U_{in}}{U_{out}}\right) \sqrt{\varepsilon}$$

Zasolenie gleby wyznacza się na podstawie wyników jednoczesnych pomiarów elektrycznej przewodności gleby (σ) i jej stałej dielektrycznej (ε). Miarą bezwzględnego zasolenia gleby (σ_w) jest przewodność obecnego w glebie elektrolitu, określana z zależności:

$$\sigma_w = \frac{\sigma - 0,08}{(\varepsilon - 6,2)(0,0570 + 0,0000710sc)}$$

gdzie:

sc – zawartość frakcji piasku

Opis modelu i systemu pomiarowego. Badania modelowe mające na celu określenie skuteczności działania nawodnień wglębnych w warunkach labo-

ratoryjnych rozpoczęto od przygotowania modelu. W pierwszej kolejności przygotowano konstrukcję skrzyniową o wymiarach: szerokość 1 m, wysokość 1,10 m, grubość 0,2 m. Skrzynię napełniono glebą z poletka doświadczalnego Katedry Kształtowania Środowiska i Melioracji SGGW.

Gleba na poletku na poszczególnych poziomach jest dość jednorodna. Powierzchniową warstwę profilu glebowego tworzy glina lekka pylasta zalegająca na piasku gliniastym lekkim. Właściwości fizykowodne gleb scharakteryzowano w tabeli 1.

Przenoszenie profilu glebowego do skrzyni modelu przeprowadzono w ten sposób, aby w miarę możliwości jego stan końcowy był zbliżony do warunków naturalnych. W tym celu glebę na poletku zdejmowano warstwami, które w odwrotnej kolejności przenoszono do tworzonego modelu, zagęszczając mechanicznie kolejne warstwy o miąższościach ok. 5 cm. Jednocześnie w trakcie wypełniania skrzyni na bieżąco kontrolowano stopień zagęszczenia gleby i porówny-

wano go ze stanem naturalnym. Usypywanie gruntu przzerwano na głębokości 0,45 m poniżej planowanej powierzchni, aby zainstalować na niej dwa zaadaptowane do nawodnień wgłębnych emiterzy typu NAAN-TIF o natężeniu wypływu $2,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ w rozstawie 0,68 m. Emiterzy połączono przewodami z laboratoryjną pompą dozującą typu Unipan PMP 341, mającą za zadanie zasilanie systemu nawadniającego. W trakcie usypywania gruntu ponad emiterami umieszczono pionowo trzy paski z włókniny filtracyjnej szerokości 3 cm i długości 30 cm każdy, przy czym każdy z nich wyprowadzony został ponad powierzchnię gleby w modelu. Zadaniem tak umieszczonej włókniny miała być próba odwzorowania poboru wody przez korzenie roślin. Po wykonaniu modelu profilu glebowego przystąpiono do modelowania warunków atmosferycznych. Dopływ energii słonecznej do powierzchni gleby zasymulowano, używając do tego celu dwu promienników ciepła (250 W każdy), pod którymi umieszczono przesłonę z kalki technicznej mającą za zadanie za-

TABELA 1. Właściwości fizykowodne gleby na poletku doświadczalnym

Głębokość [cm]	Gęstość fazy stałej [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Gęstość gleby suchej [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Porowatość [%]	Współczynnik filtracji [m/d] ⁻¹	Polowa poj. wodna [%]	Typ gleby
0–10	2,50	1,36	45,6	1,82	32,0	glina lekka pylasta
20–25	2,50	1,37	45,2	1,17	22,4	glina lekka pylasta
40–45	2,34	1,62	30,1	0,68	24,8	piasek gliniasty lekki
70–75	2,27	1,42	37,4	0,40	25,6	piasek gliniasty lekki

pewnić równomierność naświetlania powierzchni.

Zaprojektowany system pomiarowy składał się z dwu niezależnych części

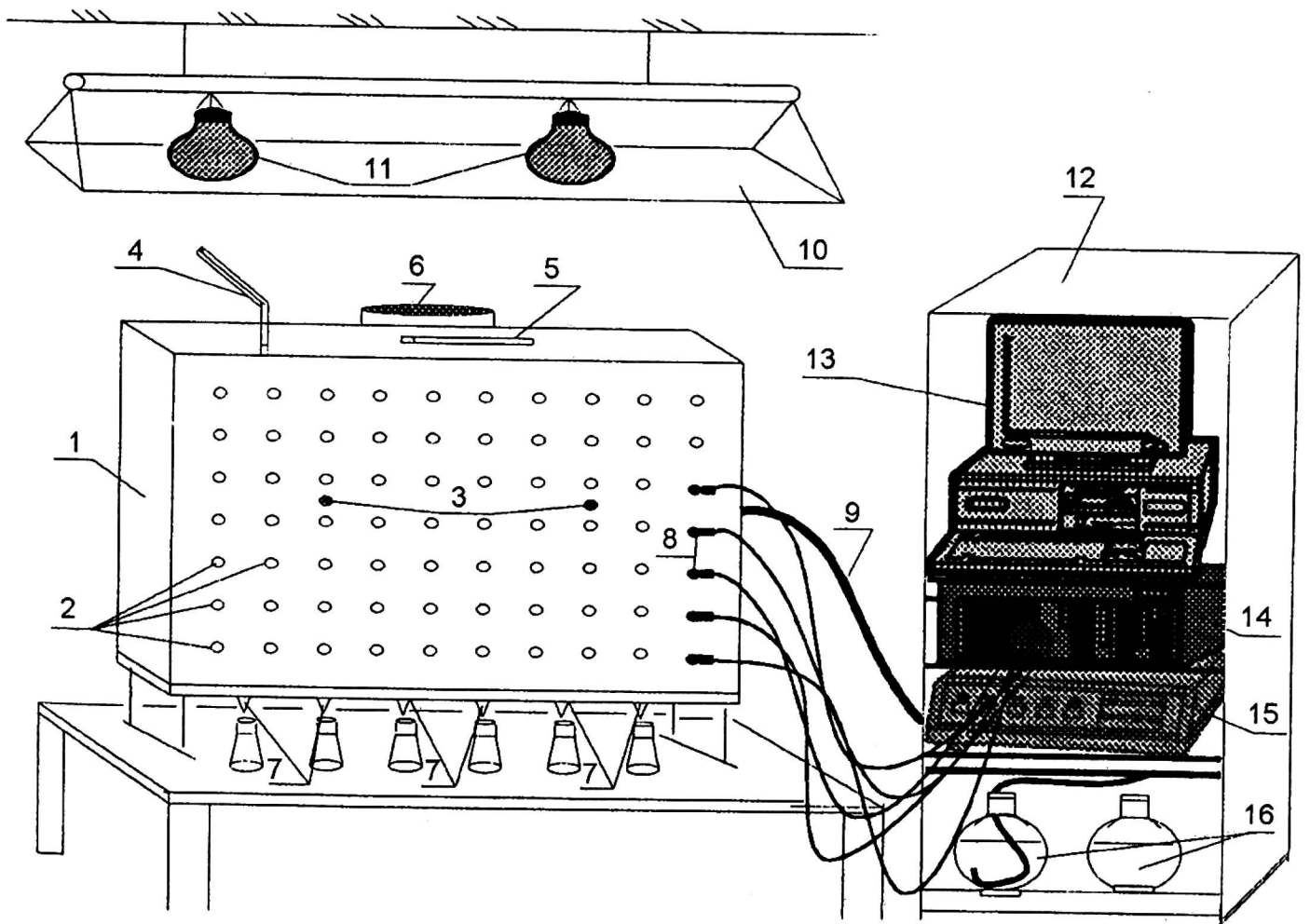
1) zestawu do pomiaru warunków środowiska eksperymentu:

- termometr do pomiaru temperatury powietrza przy powierzchni gleby,
- termometr do pomiaru temperatury gleby na głębokości 20 cm,
- ewaporometr Wilda;

2) zestawu urządzeń do pomiaru wielkości zasolenia i uwilgotnienia w profilu glebowym:

- LOM / mpts – laboratoryjny miernik uwilgotnienia i zasolenia gleby wykorzystujący do pomiaru technikę reflektometrii czasowej (TDR),
- zestaw 5 elektrod pomiarowych połączonych bezpośrednio z miernikiem,
- komputer PC 286 służący do sterowania pomiarami oraz rejestracji ich wyników w trakcie doświadczenia.

Po zestawieniu konstrukcji modelu (rys.1) przystąpiono do realizacji eksperymentu.

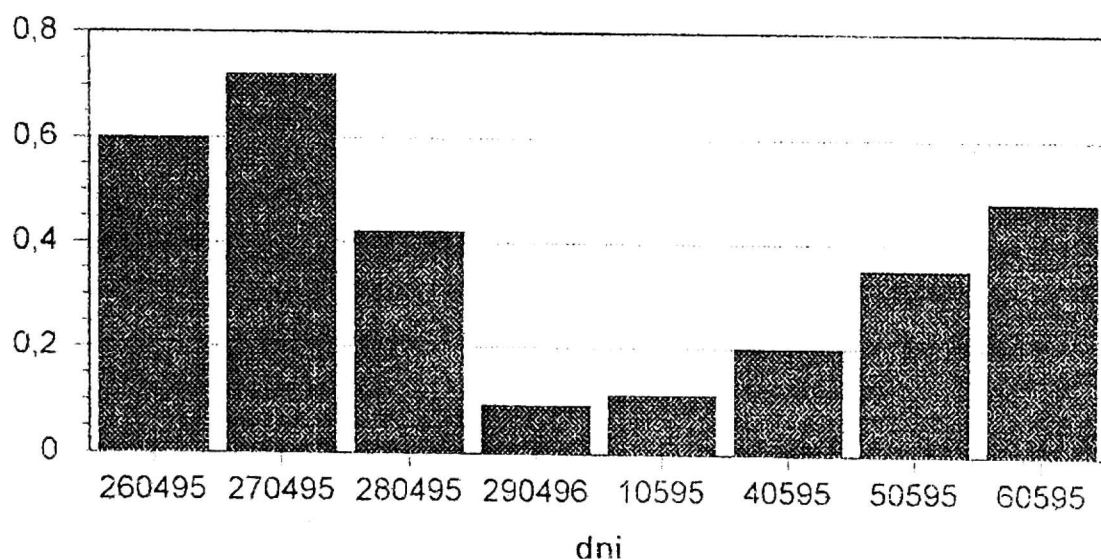


RYSUNEK 1. Schemat konstrukcji modelu gruntowego wraz z systemem pomiarowym: 1 – skrzynia modelu gruntowego, 2 – punkty pomiarowe, 3 – emitery nawadniające, 4 – termometr gruntowy, 5 – termometr powierzchniowy, 6 – ewaporometr Wilda, 7 – odcieki z modelu, 8 – elektrody TDR w punktach pomiarowych, 9 – przewód zasilający emitery, 10 – ekran rozpraszający promieniowanie cieplne, 11 – promienniki ciepła, 12 – szafa laboratoryjna, 13 – komputer sterująco-rejestrujący, 14 – miernik TDR, 15 – pompa dozująca, 16 – roztwór KNO₃

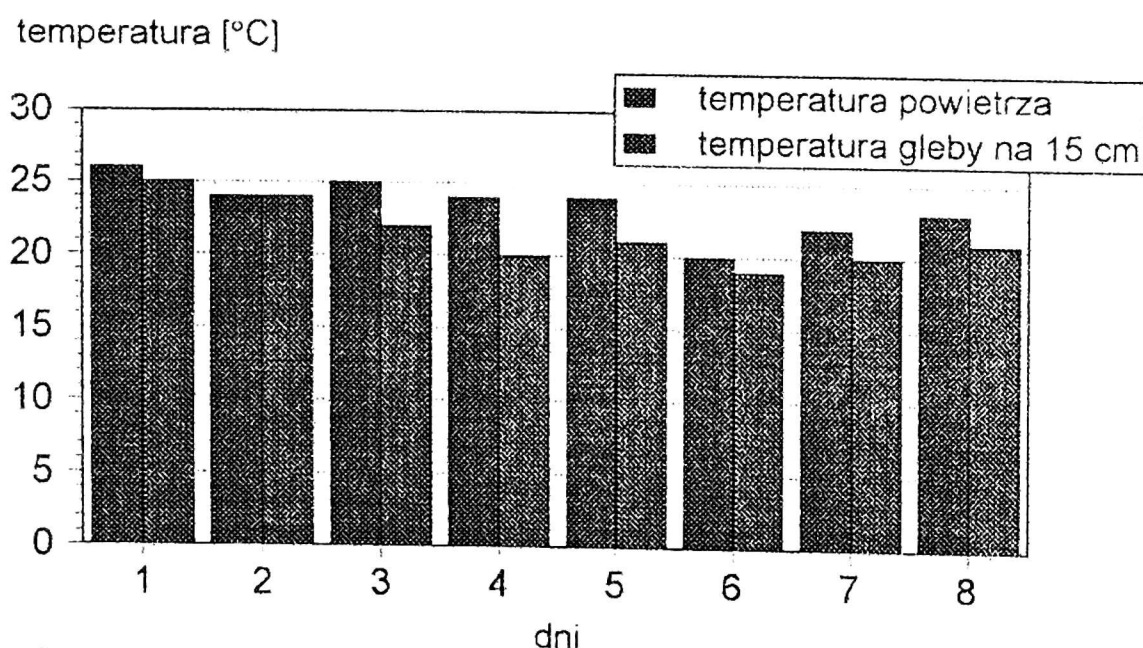
Cel i przebieg badań

Celem eksperymentu była ocena możliwości wykorzystania miernika TDR do rejestracji dynamiki uwilgotnienia i zasolenia dwuwymiarowego profilu gruntowego w trakcie trwania cyklu nawodnieniowo-nawożeniowego realizowanego za pomocą nawodnień wgłębnych. Modelowane warunki atmosfery-

czne, w których przeprowadzono doświadczenie, starano się dopasować do naturalnego, zmiennego w okresie doby dopływu energii słonecznej do powierzchni gleby. Warunki te osiągnięto przez ustalenie ośmiogodzinnych, regularnych cykli naświetlań modelu gruntowego promiennikami ciepła. Prowadzone w trakcie doświadczenia pomiary ewaporacji (rys. 2) oraz temperatury powietrza



RYSUNEK 2. Przebieg zmian ewaporacji w trakcie trwania doświadczenia



RYSUNEK 3. Przebieg zmian temperatury powietrza i gleby (na głębokości 15 cm) w trakcie trwania doświadczenia

i gleby (rys. 3) pozwoliły na określenie rzeczywistego przebiegu warunków badań.

Zmiany uwilgotnienia i zasolenia mierzono cyklicznie w przygotowanych uprzednio w modelu punktach pomiarowych. Właściwe pomiary poprzedzono cyklem pomiarów próbnych (testujących) służących określeniu stopnia dokładności uzyskiwanych wyników w trakcie realizacji doświadczenia. W tym celu wykonano po trzy pomiary aktualnych wielkości wilgotności i zasolenia w każdym z punktów pomiarowych modelu, przy odstępie czasowym pomiędzy kolejnymi pomiarami wynoszącym 2 minuty. Analiza uzyskanych wyników pomiarów wykazała, iż różnice między zarejestrowanymi wielkościami wahały się w przedziale 0–0,8 % i były mniejsze od gwarantowanej przez producenta wielkości maksymalnego błędu pomiaru wynoszącej $\pm 2\%$. Dlatego też ze względów technicznych, oraz aby wyeliminować ewentualne błędy grube, ograniczono liczbę pomiarów wykonanych w jednym punkcie do dwóch, oddzielonych dwuminutowym odstępem czasowym. Ponieważ w trakcie eksperymentu dysponowano jedynie pięcioma elektrodami, zaistniała konieczność zrezygnowania z ciągłej, płynnej rejestracji wyników pomiarów na rzecz pomiarów wykonywanych cyklicznie, przemieszczając elektrody do kolejnych punktów pomiarowych.

W trakcie trwania eksperymentu wykonano trzykrotnie nawodnienie połączone z nawożeniem zgodnie z harmonogramem przedstawionym w tabeli 2. Cykle pomiarowe (po 70 punktów pomiarowych w każdym), skorelowano z kolej-

TABELA 2. Harmonogram realizacji eksperymentu

Lp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Czas od rozpoczęcia eksperymentu	0	1,54	20,59	30,09	49,08	50,06	56,29	57,23	75,53	77,78	79,48	80,46	130,34	131,29	239,59	241,29	241,44	242,39
Data	26.04.95	27.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	28.04.95	29.04.95	29.04.95	01.05.95	01.05.95	05.05.95	05.05.95	05.05.95	05.05.95
Dawka roztworu nawozowego [dm ³]			2,0				0,70											0,60
Wykonany pomiar wilgotności i zasolenia	1				2				3		4		5					6

nymi nawodnieniami i nawożeniami, przy czym średni czas trwania jednego cyklu wynosił 55 minut. W trakcie trwania doświadczenia wykonano 6 cykli pomiarowych.

Liczba cykli pomiarowych w trakcie trwania doświadczenia ograniczona została do 6, aby zminimalizować błędy pomiaru wynikające z postępującego w miarę kolejnych przemieszczeń elektrod rozluźnienia gleby w punktach pomiarowych i związanego z nim zmniejszania się kontaktu elektrody z fazą stałą gleby. Wyniki uzyskanych pomiarów gromadzone były automatycznie w pamięci komputera jako zbiory danych. Zarejestrowane w trakcie doświadczenia zbiory danych z wynikami pomiarów zawierały:

- datę i dokładny czas wykonania pomiaru
- wilgotność gleby w danym punkcie [%]
- stopień zasolenia gleby w punkcie pomiarowym [S\m]

Po zakończeniu doświadczenia uzyskane wyniki przekształcono za pomocą komputera z postaci nie powiązanych ze sobą danych liczbowych do zintegrowanej postaci graficznej. Przekształcenie uzyskanych wyników do postaci graficznej pozwoliło na prezentację za pomocą map izolinii aktualnego w momencie pomiaru rozkładu uwilgotnienia i zasolenia w modelowym profilu gruntowym.

Wyniki badań

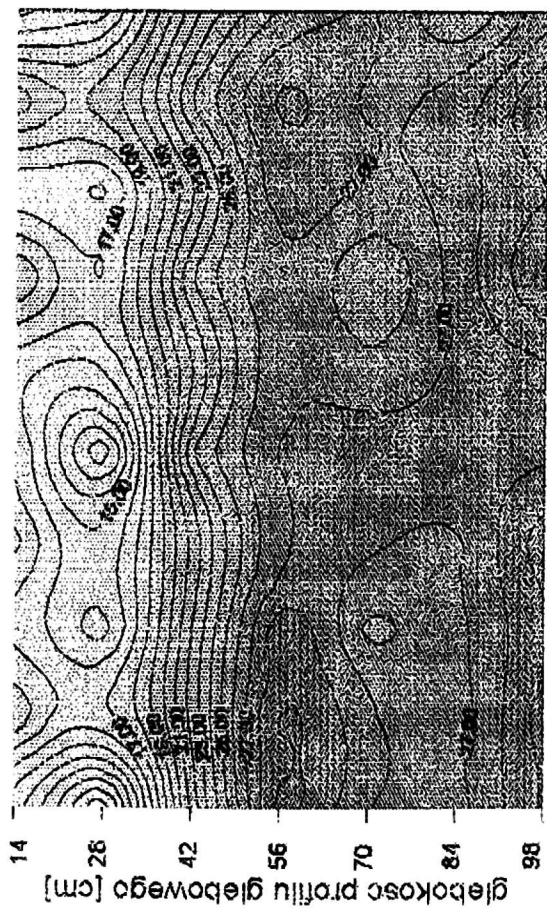
Na rysunku 4 (1–12) przedstawiono uzyskane wyniki badań nad przepływem wody i roztworu nawozowego w przekroju osi rurociągu.

Gleba w modelu swymi parametrami i układem warstw zbliżona była do naturalnego profilu na poletku badawczym, dlatego uzyskane w postaci przebiegu izolinii wyniki cechuje pewna nieregularność. Wskazują one, że przy zastosowanej technologii małych i częstych dawek nie wystąpił odciek do dolnych warstw gleby, który uznaje się za główną wadę nawodnień wgłębnych prowadzącą do dużych strat wody, a także przy podawaniu roztworów nawozowych do niebezpieczeństwa zanieczyszczenia wód gruntowych.

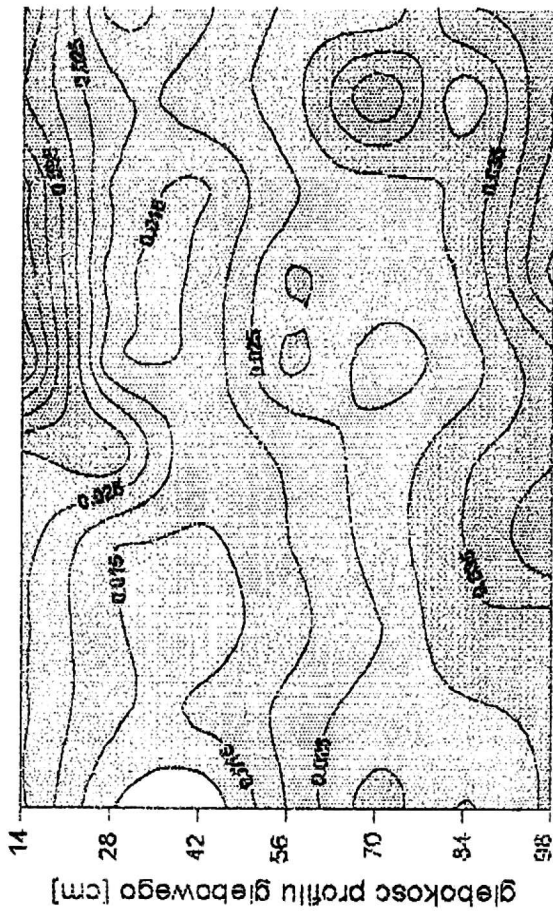
W trakcie eksperymentu najlepsze warunki wodne i pokarmowe uzyskano na głębokości od 0,3 do 0,6 m od powierzchni modelowego profilu glebowego. Warstwa ta odpowiada strefie celowego zwilżania dla większości roślin ogrodniczych. Nie zaobserwowano zmian uwilgotnienia i zasolenia w powierzchniowej warstwie gleby (0–0,15 m), co potwierdza zalety nawodnień wgłębnych odnośnie znacznego ograniczenia strat wody na parowanie.

Analiza uzyskanych eksperymentalnie wyników pozwala na stwierdzenie, że zaproponowaną metodykę doświadczenia uznać należy za prawidłową i zgodną z celem badań. Minimalizacja czasu wykonania pojedynczego pomiaru wraz z jego nie niszczącym charakterem są czynnikami pozwalającymi na zastosowanie miernika TDR do badań nad dynamiką przemieszczania zarówno wody, jak i roztworu nawozowego w profilu glebowym. Wyniki uzyskane potwierdziły wcześniejsze badania modelowe (Pierzgalski 1992, Kałka 1992). Model gruntowy z automatycznym systemem

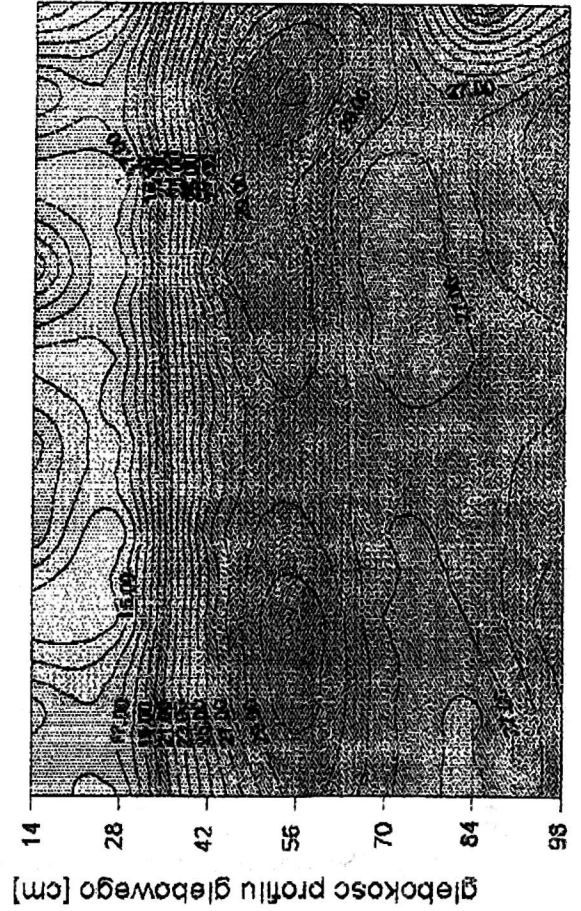
uwilgotnienie profilu glebowego [%], 26.04.95, czas: 0+0h



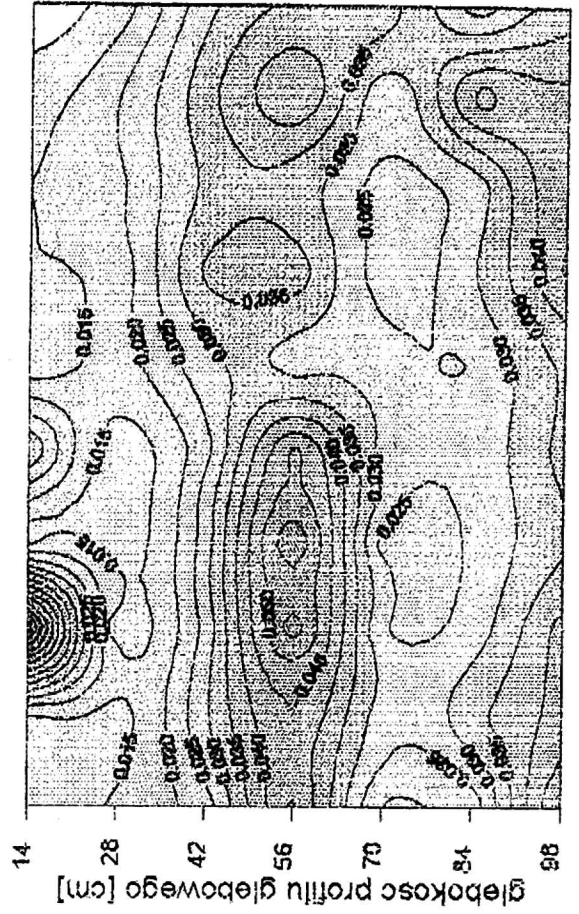
zasolenie profilu glebowego [S/m], 26.04.95, czas: 0+0h



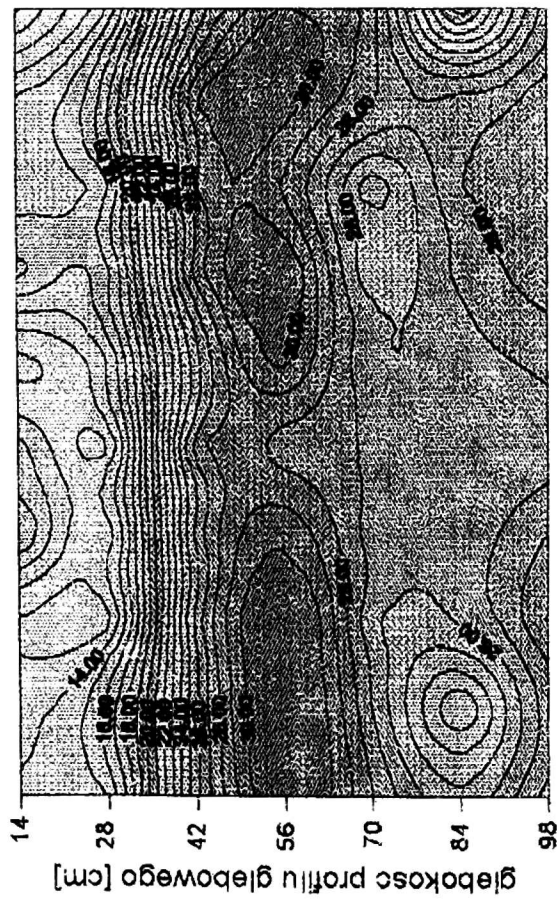
uwilgotnienie profilu glebowego [%], 28.04.95, czas 0+50.06h



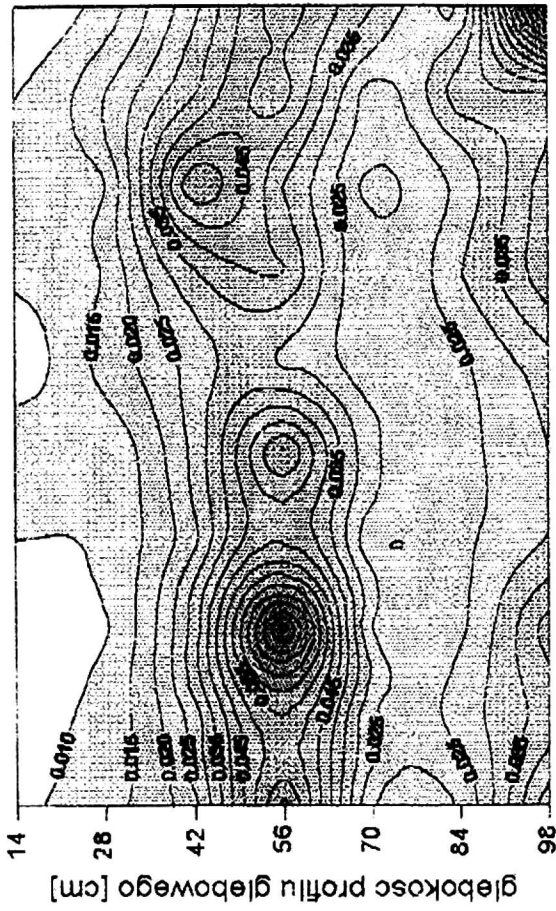
zasolenie profilu glebowego [S/m], 28.04.95, czas: 0+50.06h



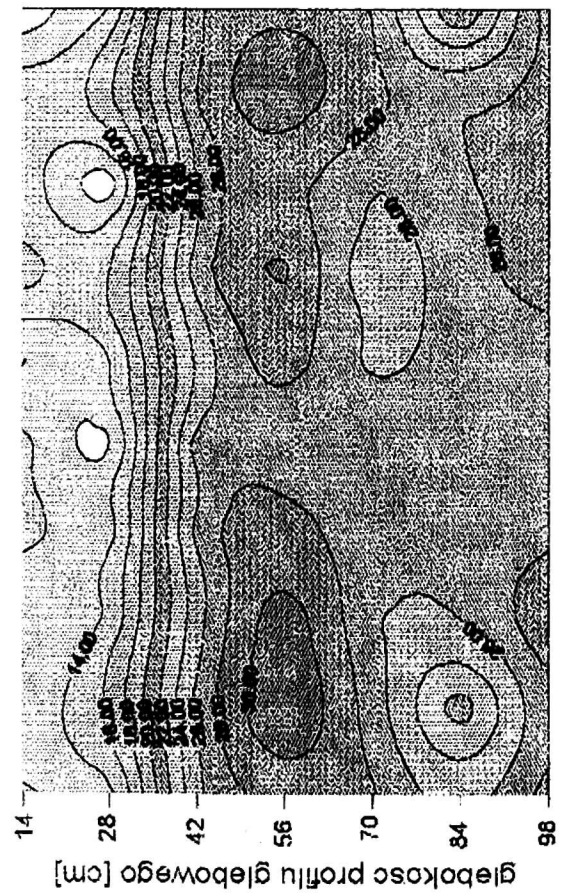
uwilgotnienie profilu glebowego [%], 29.04.95, czas: 0+80.46h



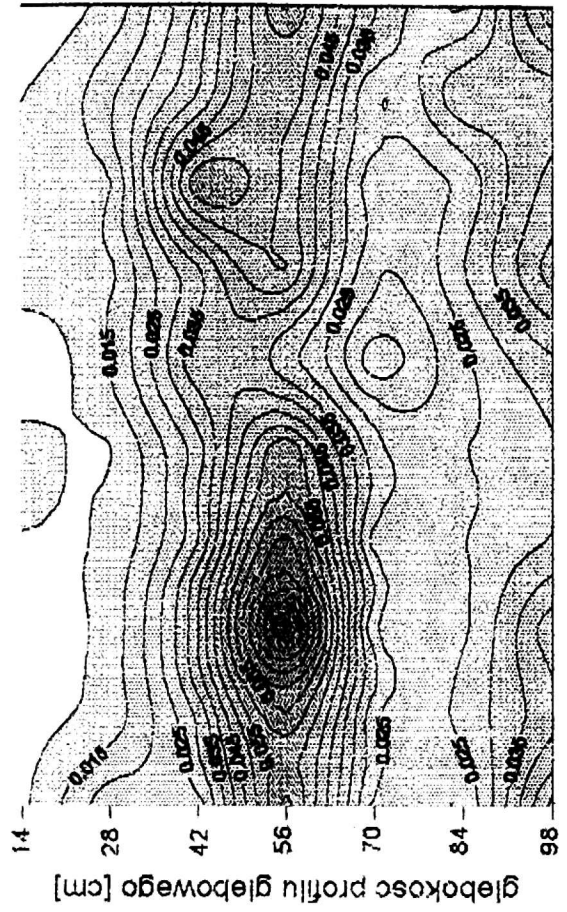
zasolenie profilu glebowego [S/m], 29.04.95, czas: 0+80.46h



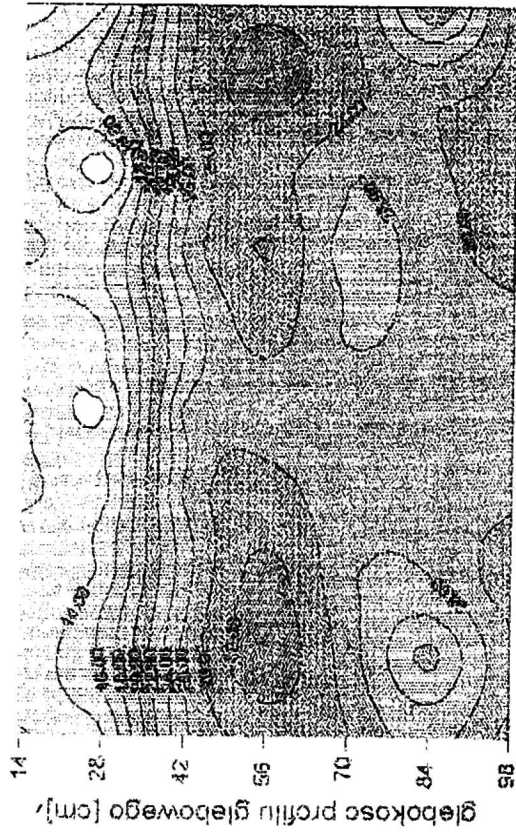
uwilgotnienie profilu glebowego [%], 01.05.95, czas: 0+131.29h



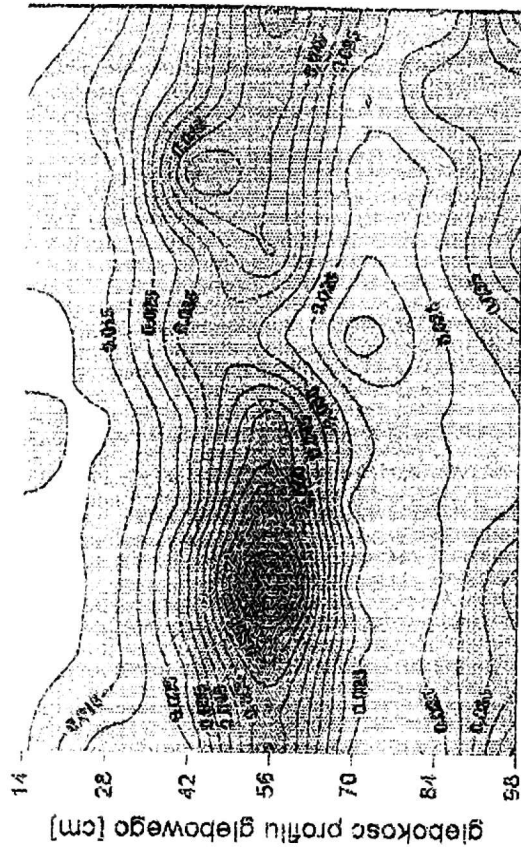
zasolenie profilu glebowego [S/m], 01.05.95, czas: 0+131.29h



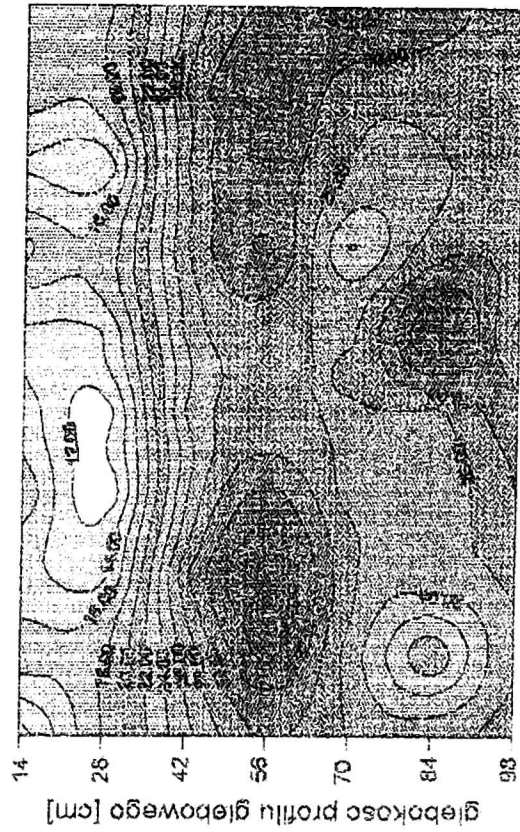
uwilgotnienie profilu glebowego [%], 01.05.95, czas: 0+131.29h



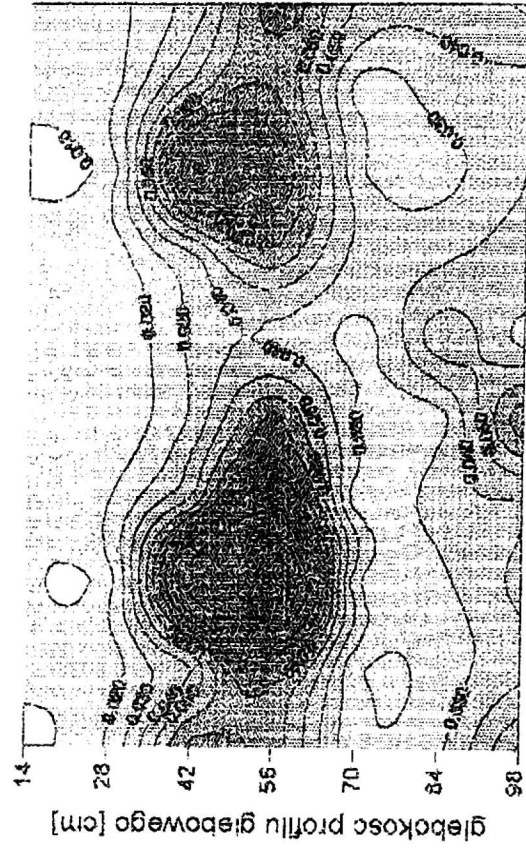
zasolenie profilu glebowego [S/m], 01.05.95, czas: 0+131.29h



uwilgotnienie profilu glebowego [%], 05.05.95, czas: 0+242.39h



zasolenie profilu glebowego [S/m], 05.05.95, czas: 0+242.39h



RYSUNEK 4 (1-12). Zmienność rozkładu uwilgotnienia i zasolenia w modelowym profilu glebowym w trakcie trwania eksperymentu

pomiarowym opartym na zastosowaniu miernika LOM\mpts wykorzystującego do pomiarów technikę TDR (Time Domain Reflectometry) umożliwia modelowanie i obserwację procesów przepływu wody i roztworów nawozowych przy nawodnieniach wgłębnych z wysoką dokładnością niezbędną do weryfikacji modeli matematycznych.

Wnioski

1. Zastosowanie miernika TDR pozwala na automatyzację i dużą dokładność badań na modelach gruntowych.

2. Opracowany system gromadzenia danych oraz ich przetwarzania do postaci graficznej umożliwia pełną kontrolę i analizę przebiegu eksperymentu.

3. Wstępne wyniki badań wskazują na możliwość nawożenia za pomocą nawodnień wgłębnych w sposób kontrolowany tzn. ograniczający w znacznym stopniu przenikanie roztworu nawozowego do głębszych warstw profilu glebowego i wód gruntowych.

Literatura

- MALICKI M. 1993: *Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody\gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia*. Acta Agrophysica, Lublin.
- PIERZGALSKI E. 1992: *Regulowanie uwilgotnienia gleby za pomocą nawodnień wgłębnych*. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- KAŁKA W. 1992: *Badania modelowe nawodnień wgłębnych*. SGGW, Warszawa (praca magisterska).