Wybrany okres kalibracji charakteryzował się zmiennymi warunkami hydrologicznymi. Dobowe wartości przepływu zmieniały się w zakresie od 1,77 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> do 124 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Średni przepływ dla tego okresu wynosi 13,19 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. W tabl. 3.11 zestawiono wartości przepływów średnich, minimalnych i maksymalnych w kolejnych latach okresu kalibracji oraz wartości przepływu charakteryzujące wielolecie 1980-2011. Wartości średniego rocznego przepływu zmieniały się w zakresie od 8 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> w 2008 r. do 18,6 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> w 2011 r. Wartość średnia dla wielolecia 1980-2011 wynosi 10,4 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Uwzględnienie w okresie kalibracji zarówno niskich, jak i wysokich przepływów, pozwoliło przygotować model do symulowania przepływu w pełnym zakresie zmienności.

Tablica 3.10

Klasa	Zakres wysokości	Średnia	Powierzchnia klasy		
	[m n.p.m.]	wysokosc [m n.p.m.]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	
Ι	≤ 120	111	141,38	5,72	
Π	121-140	133	407,61	16,52	
III	141-160	152	1051,93	42,63	
IV	161-180	168	746,86	30,27	
V	> 180	188	119,94	4,86	

## Klasy wysokości obszarów cząstkowych wraz z powierzchnią, jaką zajmują w zlewni Liwca po profil w Łochowie

Tablica 3.11

Przepływy charakterystyczne w poszczególnych latach okresu 2007-2011 oraz w wieloleciu 1980-2011

Dala harden la siamura	Przepływy charakterystyczne $[m^3 \cdot s^{-1}]$				
Kok ilydrologiczny	NQ	SQ	WQ		
2007	2,8	10,9	63,1		
2008	2,0	8,0	22,2		
2009	2,7	11,1	49,1		
2010	1,8	17,2	124,0		
2011	2,4	18,6	102,0		
Okres	NNQ	SSQ	WWQ		
1980-2011	1,2	10,4	146,0		

Kalibrację przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie wykorzystano automatyczną metodę Monte Carlo. Początkowo uzyskano 1000000 losowo dobranych zestawów parametrów w zakresach ich wartości proponowanych przez Seiberta (1999) i zamieszczonych w tabl. 3.12. Dla 1340 uzyskanych zestawów współczynnik efektywności modelu  $R_{eff}$  był większy niż 0,70, a dla 198 był większy niż 0,75. Jedynie dla 6 zestawów współczynnik  $R_{eff}$  przekroczył 0,80, maksymalnie osiągając wartość 0,81. Kalibrację modelu metodą Monte Carlo prowadzono jeszcze wielokrotnie, zmieniając zakresy parametrów, jednak zawsze w granicach przedstawionych w tabl. 3.12. Zmiany zakresów podyktowane były poszukiwaniem zestawów w obszarze wartości, dla których uzyskano dobre wyniki w poprzednich obliczeniach Monte Carlo. Każdorazowo zapisywano jedynie te zestawy, dla których wartość współczynnika  $R_{eff}$  była większa niż 0,70. Po analizie otrzymanych wyników ostatecznie powstała baza danych 52 zestawów, dla których współczynnik  $R_{eff}$  wynosił 0,86. Wartości pozostałych wskaźników oceny efektywności modelu dla tych zestawów były również duże –  $R^2 = 0,86$ ,  $R_{eff \log}$  w zakresie  $\langle 0,720,78 \rangle$  oraz M w zakresie  $\langle -5-6 \rangle$ .

W drugim etapie kalibracji zastosowano ręczną metodę prób i błędów. Polegała ona na niewielkich zmianach jednego parametru, przy jednoczesnym zachowaniu wartości pozostałych. Punktem wyjścia były zestawy parametrów z bazy,

Tablica 3.12

Zakresy wartości parametrów modelu stosowane przy kalibracji modelu HBV-light metodą Monte Carlo; oznaczenia symboli: *TT, CFMAX, SFCF, CFR, CWR* – parametry modułu pokrywy śnieżnej; *FC, LP, BETA* – parametry modułu uwilgotnienia strefy aeracji; *PART, DELAY, ALPHA, K1, K2, MAXBAS* – parametry modułu generowania odpływu z opóźnieniem

Parametr	Jednostki	Zakres wartości
TT	°C	-1,5-2,5
CFMAX	mm·°C <sup>-1</sup> ·doba <sup>-1</sup>	1-10
SFCF	-	0,4-1,0
CFR	-	0,0-0,1
CWH	-	0,0-0,2
FC	mm	50-500
LP		0,3-1
BETA	-	1-6
PART	-	0-1
DELAY	doba	1-50
<i>K</i> 1	doba <sup>-1</sup>	0,01-0,4
K2	doba <sup>-1</sup>	0,001-0,15
ALPHA	-	0-1
MAXBAS	doba	1-7

opracowanej w pierwszym etapie. Kontroli podlegały zarówno zmiany wartości wskaźników oceny efektywności modelu, jak i zgodność hydrogramów przepływu obserwowanego i symulowanego, oceniana wizualnie. Na początku zmieniano wartości parametrów modułu pokrywy śnieżnej, które wpływają na symulację odpływu roztopowego. Następnie dopasowywano przepływy letnie i jesienne poprzez zmiany parametrów modułu uwilgotnienia strefy aeracji. Korekty parametrów modułu generowania odpływu pozwoliły na zmiany kształtu hydrogramu bez wpływu na wielkość odpływu. Kalibracja ręczna pozwoliła uchwycić poziom wrażliwości modelu na zmiany wartości poszczególnych parametrów i tym samym na lepsze dopasowanie wartości przepływów. Ostatecznie wytypowano trzy zestawy parametrów, które następnie posłużyły do weryfikacji modelu.

Weryfikację przeprowadzono na niezależnym okresie 2001-2005. Charakteryzował się on dobowymi wartościami przepływu w zakresie od 1,70 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> do 141 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Średni przepływ wyniósł 9,03 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Średnie roczne, minimalne i maksymalne wartości przepływu w okresie weryfikacji wraz z wartościami obliczonymi dla wielolecia 1980-2011 przedstawiono w tabl. 3.13. Średni roczny przepływ wahał się od 6,7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> w 2003 r. do 11,8 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> w 2002 r., przy wartości średniej dla wielolecia 1980-2011 równej 10,4 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Wyniki weryfikacji oceniono za pomocą współczynnika determinacji  $R^2$  i współczynnika efektywności modelu  $R_{eff}$ .

Tablica 3.13

Dalt hydrologiogray	Przepływy charakterystyczne [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]		$me[m^3 \cdot s^{-1}]$
Kok nydrologiczny	NQ	SQ	WQ
2001	2,2	8,7	27,3
2002	1,8	11,8	141,0
2003	1,7	6,7	47,9
2004	2,6	9,4	37,7
2005	1,9	8,5	97,4
Okres	NNQ	SSQ	WWQ
1980-2011	1,2	10,4	146,0

#### Przepływy charakterystyczne w poszczególnych latach okresu 2001-2005 oraz w wieloleciu 1980-2011

Wyniki kalibracji i weryfikacji modelu HBV przedstawiono w rozdz. 5.1. Trzy optymalne zestawy parametrów, uzyskane podczas kalibracji i poddane weryfikacji, zostały zastosowane w obliczeniach zasobów wodnych strefy aeracji w wieloleciu 1980-2011. "Rozgrzewka" modelu przed symulacją obejmowała okres 22 miesięcy od stycznia 1978 r. do października 1979 r. W symulacji zastosowano następujące dane wejściowe:

- dobowe wartości opadu atmosferycznego ze stacji Siedlce P<sub>SIEDLCE</sub> [mm],
- dobowe wartości temperatury powietrza ze stacji Siedlce T<sub>SIEDLCE</sub> [°C],
- średnie miesięczne z wielolecia wartości ewapotranspiracji potencjalnej, obliczone na podstawie danych z bazy MARS  $Ep_{MARS}$  [mm].

Wyniki symulacji zasobów wodnych strefy aeracji wg trzech zestawów parametrów porównano między sobą oraz z danymi z bazy GLDAS. W tym celu wszystkie ciągi danych sprowadzono do wartości względnych, stosując równanie analogiczne do równania 3.31. Zależność między danymi badano, stosując model regresji liniowej. Stopień zależności oceniono współczynnikiem determinacji  $R^2$ oraz testując poziom istotności współczynnika korelacji. Poddano weryfikacji hipotezę zerową o braku zależności między zmiennymi. Hipoteza alternatywna wskazuje na istnienie zależności na przyjętym poziomie istotności. Poziom istotności określa prawdopodobieństwo, z jakim można popełnić błąd, odrzucając hipotezę zerową. Analizując zależności między zmiennymi, za każdym razem podano krytyczny (najniższy) poziom istotności  $p_{kr}$ , na jakim hipotezę braku zależności należy odrzucić i przyjąć alternatywną. Im mniejsza wartość krytycznego poziomu istotności, tym zależność między zmiennymi jest silniejsza i oceniona z większą pewnością. W pracy przyjęto, że wartość krytycznego poziomu istotności między badanymi zmiennymi.

Wyniki modelowania porównano również z danymi z badań terenowych. Dane empiryczne posłużyły do interpretacji uzyskanych wartości zasobów wodnych strefy aeracji i określenia wartości błędu systematycznego, który wynika z ustalonej wartości parametru *FC*. Rekonstrukcja szeregów czasowych zasobów wodnych strefy aeracji pozwoliła ocenić ich sezonową i wieloletnią zmienność w zlewni.

# 4. ZASOBY WODNE STREFY AERACJI W PUNKTACH POMIAROWYCH I W ZLEWNI 4.1. Uwilgotnienie profili glebowych

Rozpoznania uwilgotnienia strefy aeracji w profilach glebowych dokonano na podstawie danych empirycznych, zebranych podczas eksperymentu terenowego. Do badań wytypowano sześć profili. Pomiary zrealizowano w osiemnastu terminach pomiarowych w latach 2008-2011. Zastosowano metodę reflektometryczną, która umożliwia wyznaczenie wilgotności objętościowej gleby. Na podstawie wyników pomiarów obliczono wartości średnie i współczynniki zmienności. Metodykę badań terenowych oraz obliczeń przedstawiono w rozdz. 3.3.1. Badane profile różnią się składem granulometrycznym, położeniem topograficznym oraz głębokością do zwierciadła wody podziemnej. Charakterystykę profili glebowych objętych pomiarami przedstawiono w rozdz. 3.2.1.

Wilgotność objętościową sześciu profili glebowych we wszystkich terminach pomiarowych zobrazowano w postaci profili wilgotnościowych na rys. 4.1. Ponadto na rysunku przedstawiono maksymalną i minimalną wartość wilgotności pomierzoną w danym profilu. W analizie uwilgotnienia gleby poszczególnych profili glebowych wykorzystano wyniki laboratoryjnych analiz granulometrycznych. Profile Sinołęka i Grochów wyróżniają się najmniejszym uwilgotnieniem. Wilgotność objętościowa gleby w profilu Sinołęka w żadnym terminie pomiarowym nie przekroczyła 15%, a w profilu Grochów tylko raz nieznacznie przekroczyła 20%. Profil Sinołęka zbudowany jest głównie z piasku luźnego i charakteryzuje się największą zawartością najgrubszych frakcji – piasku grubego i bardzo grubego, których udział w środkowej części profilu wynosi ponad 50%. Profil Grochów również zbudowany jest przede wszystkim z piasku luźnego. Jednak środkowa część profilu cechuje się



Rys. 4.1. Profile wilgotnościowe gleb

większą zawartością pyłu (10%), co zadecydowało o przynależności utworu do grupy piasku słabogliniastego. Większy udział frakcji drobniejszych w tej części profilu przyczynia się do zwiększenia wilgotności. O małym uwilgotnieniu profili Sinołęka i Grochów decyduje również ich położenie. Oba zlokalizowane są na wysoczyznach i w zlewni są to jedne z wyżej wyniesionych obszarów. Rozpatrując skalę lokalną profile położone są na niewielkich wzniesieniach. Ponadto do głębokości 120 cm nie zaobserwowano w nich zwierciadła wody podziemnej.

Profil Świniary również zlokalizowany jest na wzniesieniu i nie zaobserwowano w nim zwierciadła wody podziemnej. Jest najwyżej położony ze wszystkich, na wysokości 165,3 m n.p.m. Jednak jego uwilgotnienie jest zdecydowanie większe niż profili Sinołęka i Grochów. Waha się ono w przedziale od ok. 5% do ponad 30%, a jednorazowo w warstwie przypowierzchniowej osiągnęło wartość 45%. Większe uwilgotnienie jest wynikiem uziarnienia. Występuje tu więcej frakcji drobniejszych – pyłu i iłu. W przypowierzchniowej warstwie profil Świniary zbudowany jest z gliny piaszczystej, a poniżej – z piasku gliniastego.

Pozostałe profile charakteryzują się dużą wilgotnością osiągającą ponad 40% w profilu Popielów i ok. 50% w profilu Łączka i Bednarze. Ich uziarnienie jest zróżnicowane. Profil Łączka zbudowany jest w górnej części z piasku słabogliniastego, a na głębokości poniżej 50 cm z gliny piaszczysto-ilastej. Profile Popielów i Bednarze zbudowane są z piasków, z przewagą piasku luźnego. Na duże uwilgotnienie tych profili wpływa ich lokalizacja. Położone są na obszarach płaskich, w dolinach rzecznych. Obserwowano w nich wahania wody podziemnej. Są one zatem dodatkowo zasilane wodą spływającą z obszarów wyżej położonych. Zmiany położenia zwierciadła wody podziemnej w tych trzech profilach w kolejnych terminach pomiarowych przedstawiono na chronoizopletach w rozdz. 6.2.

Rysunek 4.2 przedstawia zakres zmian wilgotności objętościowej na różnych głębokościach profili glebowych. Większym zakresem zmian charakteryzują się profile o większym uwilgotnieniu – Łączka, Świniary, Popielów i Bednarze. Na każdym wykresie przedstawiono wartości współczynników zmienności uwilgotnienia gleby  $CV_{i,j}$  na różnych głębokościach. Współczynnik zmienności jest względną miarą rozproszenia i został obliczony wg równania 3.7 przedstawionego w rozdz. 3.3.1. Wartości współczynnika zmienności wskazują na największą zmienność uwilgotnienia w warstwach przypowierzchniowych. Z wyjątkiem profilu Bednarze największe wartości współczynników obliczono dla głębokości 5 cm. Fakt ten można przypisać czynnikom meteorologicznym – szybkiej reakcji gleby na opad atmosferyczny oraz bezpośrednim wpływom procesu ewapotranspiracji.

Na rys. 4.3 przedstawiono średnie profile wilgotnościowe  $\bar{\theta}_{i,j}$ , obliczone dla każdego profilu jako średnia ze wszystkich terminów pomiarowych dla każdej głę-



Rys. 4.2. Zakres zmienności wilgotności objętościowej na różnych głębokościach profili glebowych wraz ze współczynnikami zmienności  $CV_{i,j}$ 

bokości. Ponadto dla każdego profilu obliczono średnią wilgotność objętościową  $\theta_i$ wg równania 3.4 przedstawionego w rozdz. 3.3.1. Najmniejszą wilgotnością wyróżniają się profile Sinołęka i Grochów. Charakteryzują się wartościami wilgotności  $\overline{\theta_i}$ , odpowiednio 7,1 i 9,9%. Profil Świniary wykazuje większe uwilgotnienie, które wynosi średnio 20,5%. Zbliżonymi wartościami cechują się profile Popielów i Łączka, odpowiednio 26,9 i 27,0%. Największe uwilgotnienie zaobserwowano w profilu Bednarze – 30,8%. Profil Bednarze wyróżnia się również największą amplitudą wilgotności objętościowej w profilu średnim, równą 15,1%. Dużą amplitudą charakteryzuje się również profil Popielów – 13,2%. W pozostałych profilach jest ona mniejsza: Łączka i Grochów, odpowiednio 10,3 i 10,1%, Sinołęka i Świniary, odpowiednio 3,3 i 5,6%. Rysunek 4.3 przedstawia ponadto średni profil uwilgotnienia  $\overline{\theta_j}$ , obliczony jedynie do głębokości 70 cm na podstawie wszystkich sześciu profili. Ma on prosty przebieg, zbliżony do profilu Świniary. Wartości wilgotności objętościowej w profilu średnim oscylują wokół 20%, a różnica w profilu sięga zaledwie 2,7%.



Rys. 4.3. Średnie uwilgotnienie profili glebowych  $\bar{\theta}_{i,i}$  oraz profil średni  $\bar{\theta}_i$ 

Uzyskane wyniki wskazują na znaczne różnice w wilgotności analizowanych profili glebowych. Zróżnicowanie zaobserwowano również w układzie pionowym w obrębie poszczególnych profili, o czym decyduje przede wszystkim ich uziarnienie. Największą zmiennością charakteryzują się warstwy przypowierzchniowe, na głębokościach 5 cm i 10 cm.

#### 4.2. Zapas wody w profilach glebowych

Uzyskane z pomiarów wartości wilgotności objętościowej gleby zostały przeliczone na zapas wody w warstwach profili: 0-10, 0-20, 0-30, 0-50 oraz 0-70 cm wg równań 3.10-3.14, przedstawionych w rozdz. 3.3.1. Średnie wartości oraz zakres zmian zapasów wody w profilach glebowych w poszczególnych warstwach w okresie badań terenowych przedstawia rys. 4.4. W tabl. 4.1. zestawiono średnie, minimalne i maksymalne wartości zapasu wody w warstwach profili 0-50 cm oraz 0-70 cm. Należy zauważyć, że dla głębszych warstw nie zawsze podano wyniki pomiarów ze wszystkich osiemnastu terminów ze względu na wahania zwierciadła wody podziemnej i brak możliwości wykonania pomiaru.

Obliczone zapasy wody wynikają bezpośrednio z pomierzonej wilgotności objętościowej. Najmniej wody było zgromadzone w każdej warstwie w profilach Sinołęka i Grochów. Przykładowo średnia wielkość zapasów w warstwie 0-10 cm wynosiła w tych profilach odpowiednio 8 mm i 4 mm, a w warstwie 0-50 cm – 38 mm i 48 mm. Większymi zapasami wody charakteryzował się profil Świniary,



Rys. 4.4. Zakres zmienności oraz średnie wartości zapasów wody w warstwach profili glebowych: (a) 0-10 cm, (b) 0-20 cm, (c) 0-30 cm, (d) 0-50 cm, (e) 0-70 cm

w którym w warstwie 0-10 cm retencjonowane było średnio 23 mm, a w warstwie 0-50 cm – 100 mm. Zapasy wody w profilach Łączka i Popielów są nieco większe niż w profilu Świniary. W warstwie 0-10 cm średnio zgromadzone w nich było odpowiednio 31 mm i 24 mm wody, a w warstwie 0-50 cm – 131 mm i 138 mm. Najwięcej wody retencjonowane było w profilu Bednarze. Wielkość zapasów w warstwie 0-10 cm wynosiła średnio 38 mm, a w warstwie 0-50 cm – 153 mm. Jedynie w warstwie 0-70 cm większe zapasy obliczono dla profilu Popielów. Należy jednak zauważyć, że średnie wartości dla profilu Bednarze w warstwie 0-70 cm obliczono z mniejszej liczby pomiarów.

Analiza danych zebranych podczas badań terenowych wykazała zróżnicowanie wilgotności objętościowej oraz zapasów wody profili glebowych, co można przypisać odmiennemu położeniu topograficznemu i zróżnicowanemu uziarnieniu gleby. Na obserwowane różnice wpływa również obecność zwierciadła wody podziemnej w trzech profilach. Analizę zmienności czasowej wilgotności objętościowej oraz zapasów wodnych w profilach glebowych omówiono oddzielnie w rozdz. 6.2.

Tablica 4.1

D	Zapas wody w warstwie 0-50 cm [mm]				
Profil	średni	maksymalny	minimalny		
Sinołęka	38	53	20		
Łączka	131	176	88		
Świniary	100	148	54		
Grochów	48	64	33		
Popielów	138	178	100		
Bednarze	153	203	92		
Drofil	Zapas wody w warstwie 0-70 cm [mm]				
FIOIII	średni	maksymalny	minimalny		
Sinołęka	52	69	30		
Łączka	159	189	136		
Świniary	142	198	75		
Grochów	72	98	44		
Popielów	186	224	148		
Bednarze	158	204	133		
	Profil Sinołęka Łączka Świniary Grochów Popielów Bednarze Profil Sinołęka Łączka Świniary Grochów Popielów Bednarze	Zapas wo   Średni   Sinołęka 38   Łączka 131   Świniary 100   Grochów 48   Popielów 138   Bednarze 153   Yenofil Zapas wo   Średni 52   Łączka 159   Świniary 142   Grochów 72   Popielów 186   Bednarze 158	Zapas www.stwie 0-54   średni maksymalny   Sinołęka 38 53   Łączka 131 176   Świniary 100 148   Grochów 48 64   Popielów 138 178   Bednarze 153 203   Zapas www.stwie 0-70   Średni maksymalny   Sinołęka 52 69   Łączka 159 189   Świniary 142 198   Grochów 72 98   Popielów 158 204		

#### Wartości średnie, minimalne i maksymalne zapasów wody w warstwach profili pomiarowych: (a) 0-50 cm, (b) 0-70 cm

## 4.3. Obszarowe uwilgotnienie gleby według koncepcji stabilności czasowej

Badania stabilności czasowej uwilgotnienia gleby przeprowadzono zgodnie z metodą opracowaną przez Vachauda i in. (1985). Poprzedziła je dodatkowa ocena zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia profili, dokonana na podstawie odchylenia standardowego odniesionego do średniej obszarowej wilgotności objętościowej w każdym terminie pomiarowym, co przedstawia rys. 4.5. Analizę prowadzono dla trzech warstw gleby: 0-10, 0-30, 0-50 cm. Odchylenie standardowe jako miara rozproszenia wartości wokół wartości średniej, obrazuje wielkość zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia w danym terminie. Im jego wartość jest większa, tym większe jest zróżnicowanie. Największe odchylenie standardowe wilgotności objętościowej obliczono dla warstwy 0-10 cm. Przyjmuje ono wartości w zakresie od 9,8% do 18,3%. W warstwie 0-30 cm waha się od 8,1% do 14,4%, a w warstwie 0-50 cm od 6,9% do 13,3%. Można zauważyć, że warstwy płytsze charakteryzują się większym zróżnicowaniem uwilgotnienia. Taką samą zależność wykazano w ana-



Rys. 4.5. Zależność odchylenia standardowego i średniej obszarowej wilgotności objętościowej w czterech warstwach gleby

lizie współczynników zmienności uwilgotnienia gleby na różnych głębokościach, przedstawionej w rozdz. 4.1. Średnie obszarowe uwilgotnienie waha się w przedziałach: 15,1-29,4% w warstwie 0-10 cm, 15,4-26,8% w warstwie 0-30 cm oraz 14,6-25,5 w warstwie 0-50 cm. W tabl. 4.2 zestawiono wartości minimalne i maksymalne współczynnika zmienności, obliczone dla czterech warstw gleby. Największe zróżnicowanie, sięgające 82% średniej wartości, zauważalne jest w warstwie 0-10 cm. W warstwach obejmujących głębsze części profilu zaobserwowano mniejszą zmienność.

Tablica 4.2

Warstwa [am]	Współczynnik zmienności [-]				
warstwa [cm]	minimalny	maksymalny			
0-10	0,54	0,82			
0-30	0,47	0,63			
0-50	0,44	0,56			

Zakres wartości współczynnika zmienności wilgotności objętościowej w czterech warstwach gleby

Uzyskane wyniki wskazują na duże zróżnicowanie przestrzenne uwilgotnienia gleby. Powstają zatem pytania, czy zgodnie z założeniem koncepcji stabilności czasowej poszczególne profile, mimo wyraźnego zróżnicowania, wykazują zbliżoną dynamikę czasową uwilgotnienia oraz czy można wskazać profil, który najlepiej odzwierciedla czasową zmienność uwilgotnienia zlewni.

Rysunek 4.6 przedstawia średnie wartości wilgotności względnej uporządkowane w kolejności rosnącej oraz wartości odchylenia standardowego dla profili pomiarowych w czterech warstwach gruntu. W tabl. 4.3 przedstawiono średnią wilgot-



Rys. 4.6. Ranking średniej wilgotności względnej w sześciu profilach pomiarowych wraz z odchyleniem standardowym w warstwach: (a) 0-10 cm, (b) 0-30 cm, (c) 0-50 cm

ność względną sześciu profili glebowych w warstwie 0-50 cm. Zmiennością czasową wilgotności objętościowej najbardziej zbliżoną do średniej obszarowej wyróżnia się profil Świniary. Wartości średniej wilgotności względnej dla tego profilu wynoszą: 0,07, 0,01 oraz -0,02, odpowiednio dla trzech kolejnych warstw. Można uznać, że reprezentuje on średnie uwilgotnienie obszarowe w warstwach 0-30 cm oraz 0-50 cm i minimalnie je zawyża w warstwie 0-10 cm. Analiza średniej wilgotności względnej dla poszczególnych warstw wskazuje, że tylko profil Świniary utrzymuje swoje miejsce w rankingu. Profile zajmują tę samą kolejność w warstwach 0-10 cm i 0-30 cm. W warstwie 0-50 cm profile zajmuja inne miejsca w rankingu. Jednak wg obliczeń dla każdej warstwy profile Sinołęka i Grochów reprezentują bardziej suche warunki od średniej obszarowej, a profile Łączka, Popielów i Bednarze warunki wilgotniejsze. Zmiana miejsc w rankingu może wynikać z niejednorodności uziarnienia, obserwowanej również w wymiarze pionowym w profilach. Przykładowo w warstwach 0-10 i 0-30 cm najsuchsze warunki reprezentuje profil Grochów, a w warstwie 0-50 cm - profil Sinołęka. Oba charakteryzują się odwrotną sekwencją utworów. W profilu Sinołęka piasek słabogliniasty buduje jego górną część do głębokości 30 cm, a następnie przechodzi w piasek luźny. Przyczynia się to do mniejszego uwilgotnienia w warstwach głębszych. Z kolei w profilu Grochów w przypowierzchniowej warstwie występuje piasek luźny, który na głębokości 40 cm przechodzi w piasek słabogliniasty. Skutkuje to jego mniejszym uwilgotnieniem w warstwach płytszych.

Nr	Profil	Średnia wilgotność względna w warstwie 0-50 cm [-]
1.	Sinołęka	-0,62
2.	Łączka	0,30
3.	Świniary	-0,02
4.	Grochów	-0,52
5.	Popielów	0,38
6.	Bednarze	0,50

Średnia wilgotność względna sześciu profili glebowych w warstwie 0-50 cm

Największą stabilnością czasową charakteryzują się profile, dla których obliczono najmniejsze wartości odchylenia standardowego. W warstwach 0-10 oraz 0-30 cm jest to profil Grochów, a w warstwie 0-50 cm – profil Łączka. Najmniejszą stabilnością czasową w każdej warstwie wyróżnia się profil Świniary. Analizując stabilność czasową w trzech warstwach profili należy zauważyć, że najmniejszą stabilnością charakteryzuje się uwilgotnienie w warstwie 0-10 cm. W warstwach 0-30 i 0-50 cm wartości odchylenia standardowego są mniejsze dla każdego profilu. Najmniejsze wartości odchylenia w zakresie od 0,09 do 0,19 obliczono dla warstwy 0-50 cm. Można zatem uznać, że uwilgotnienie ocenione dla tej warstwy wykazuje największą stabilność czasową.

Przeprowadzona analiza wykazała, że mimo przestrzennego zróżnicowania warunków wilgotnościowych badanych profili glebowych, można przyjąć hipotezę o niezmienności w czasie przestrzennej struktury uwilgotnienia obszaru, który reprezentują. Najwyższą stabilnością czasową, czyli największą zgodnością z dynamiką uwilgotnienia obszarowego, wyróżnia się średnia wilgotność obliczona dla warstwy 0-50 cm. Wyniki wykorzystano przy opracowaniu modelu struktury przestrzennej warunków wilgotnościowych w zlewni Liwca z uwzględnieniem czynników stabilnych w czasie, które decydują o możliwościach gromadzenia wody w strefie aeracji.

#### 4.4. Zróżnicowanie przestrzenne uwilgotnienia gleby

Pierwszym etapem oceny zasobów wodnych strefy aeracji w zlewni była analiza potencjalnego zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia gleby na podstawie wskaźników, zaproponowanych w rozdz. 3.3.3.

Mapę klasycznego wskaźnika *TWI* przedstawia rys. 4.7. Wartość wskaźnika waha się od 7,04 do 21,02, przy wartościach średniej i medianie, odpowiednio 10,29

i 9,86. Większe wartości wskaźnika, przekraczające 13, wskazujące na większe potencjalne uwilgotnienie gleby, występują w dwóch typach obszarów. W pierwszym przypadku układają się liniowo w dolinach rzecznych, tworząc obraz odpowiadający sieci rzecznej. W drugim przypadku tworzą powierzchnie, występujące przede wszystkim w południowej części zlewni. Są to tereny płaskie. Najmniejsze wartości wskaźnika można zaobserwować w środkowo-wschodniej części zlewni, na zachód oraz na wschód od doliny Liwca, na Wysoczyźnie Kałuszyńskiej i Wysoczyźnie Siedleckiej. Charakteryzują się one największym nachyleniem stoków w zlewni, przekraczającym 4°.

Rysunek 4.8 przedstawia histogram rozkładu liczebności występowania wartości *TWI*. Liczebność przedstawiono na dwóch osiach wykresu jako liczebność skumulowaną określoną w procentach oraz wyrażoną wartościami bezwzględnymi. Histogram rozkładu jest prawoskośny z maksimum w zakresie wartości 9,41-9,80. Prawie 80% powierzchni zlewni charakteryzuje się wartością *TWI* mniejszą niż 11,41, a zaledwie ok. 1% – wartością większą niż 16,21. Asymetrię histogramu można przypisać właściwościom ukształtowania powierzchni zlewni Liwca. Większa część zlewni charakteryzuje się małym nachyleniem. Jednak występują też obszary w obrębie wysoczyzn, gdzie nachylenie jest większe niż 8°.



Rys. 4.7. Topograficzny wskaźnik TWI w wersji klasycznej w zlewni Liwca







Rys. 4.9. Topograficzny wskaźnik wilgotności TWI w zależności od średniej wysokości

Zbadano również zależność między wartościami klasycznego wskaźnika *TWI* a wysokością bezwzględną wyrażoną w m n.p.m. W tym celu obliczono średnią wysokość obszarów, które charakteryzują się wartością wskaźnika *TWI* w określonym zakresie. Wykres zależności przedstawia rys. 4.9. Wartość współczynnika determinacji wynosi 0,86, a współczynnik kierunkowy równania regresji ma wartość ujemną. Wskazuje to na wysoką ujemną korelację wartości *TWI* z wartościami wysokości bezwzględnej.

Wskaźnik *TWI*<sub>mod1</sub>, którego zróżnicowanie przestrzenne w zlewni Liwca przedstawiono na rys. 4.10, razem z topografią uwzględnia również różnorodność uziarnienia. Wartość wskaźnika waha się od 7,08 do 80,31. Wartość średnia i mediana wynoszą odpowiednio 25,91 i 26,98. W obrazie rozkładu przestrzennego wskaźnika odzwierciedla się zróżnicowanie utworów budujących strefę aeracji do głębokości 50 cm. Największe wartości, przekraczające wartość 50, występują w południowo-wschodniej części zlewni. Jest to obszar występowania utworów o większej zawartości frakcji drobnych, które decydują o zdolnościach retencyjnych, przede wszystkim pyłów i torfów. Ponadto obszar ten charakteryzuje się wysoką tendencją do utrzymywania wody, ze względu na płaską powierzchnię. Najmniejsze wartości wskaźnika można zaobserwować w obszarach występowania utworów o małej zawartości frakcji drobnych. Obszary takie, zbudowane w przewadze z piasku luźnego, znajdują się m.in. w północno-zachodniej oraz południowo-zachodniej części zlewni.

Podobnie jak w przypadku poprzedniego wskaźnika, zróżnicowanie jego wartości zobrazowano w postaci histogramu (rys. 4.11). Histogram jest asymetryczny, prawoskośny. Około 80% powierzchni zlewni zajmują obszary, w których  $TWI_{mod1}$ przyjmuje wartość mniejszą niż 35. Zauważalne są trzy zakresy wartości wskaźnika  $TWI_{mod1}$ , wyróżniające się największą liczebnością. Charakter rozkładu wynika z danych wejściowych dotyczących uziarnienia, zastosowanych w obliczeniu wskaźnika  $TWI_{mod1}$ .



Rys. 4.10. Zmodyfikowany wskaźnik TWImod1 w zlewni Liwca



Rys. 4.11. Histogram rozkładu liczebności komórek rastra o określonej wartości wskaźnika *TWI*<sub>mod1</sub> w zlewni Liwca

Rysunek 4.12 przedstawia mapę wskaźnika  $TWI_{mod2}$ , który uwzględnia zróżnicowanie przestrzenne topografii oraz roślinności. Wartość wskaźnika waha się od 3,27 do 10,53, przy wartościach średniej i medianie, odpowiednio 5,08 i 4,87. Zakresy wartości  $TWI_{mod2}$  są zdecydowanie mniejsze niż wartości TWI w wersji klasycznej. Jednak zróżnicowanie przestrzenne obu wskaźników jest zbliżone. Zastosowana modyfikacja z wykorzystaniem wskaźnika *LAI* implikuje stosunkowo większe wartości  $TWI_{mod2}$  na obszarach z gęstszą roślinnością. Charakteryzują się one większymi wartościami wskaźnika *LAI* i w zlewni Liwca reprezentowane są przez obszary leśne. Z kolei obszary z roślinnością łąkową mają najczęściej nieznacznie większe wartości *LAI* niż pola uprawne. Podstawą modyfikacji wskaźnika *TWI* poprzez uwzględnienie zróżnicowania roślinności przez Temimiego i in. (2010) było założenie, że gęstsza roślinność zmniejsza nasłonecznienie i ogranicza parowanie, co razem skutkuje większą wilgotnością gleby.

Histogram rozkładu wartości wskaźnika  $TWI_{mod2}$ , przedstawiony na rys. 4.13, ma maksimum w zakresie wartości od 4,61 do 4,80. Około 80% powierzchni zlewni charakteryzuje się wartością wskaźnika mniejszą od 5,6. Jedynie ok. 5% ma wartość większą niż 7. Występuje wyraźna asymetria histogramu, podobnie jak w przypadku klasycznej wersji wskaźnika.

Rysunek 4.14 przedstawia mapę wskaźnika  $TWI_{mod3}$ , który stanowi połączenie dwóch poprzednich modyfikacji. Uwzględnia zróżnicowanie przestrzenne trzech czynników: topografii, uziarnienia i roślinności. Wartość wskaźnika waha się od 3,32 do 40,54, przy wartościach średniej i medianie odpowiednio 12,79 i 13,26. Zróżni-



Rys. 4.12. Zmodyfikowany wskaźnik TWImod2 w zlewni Liwca



Rys. 4.13. Histogram rozkładu liczebności komórek rastra o określonej wartości wskaźnika *TWI*<sub>mod2</sub> w zlewni Liwca

cowanie przestrzenne wskaźnika  $TWI_{mod3}$  wskazuje na większe uwilgotnienie gleby w dolinach rzecznych oraz w obszarach płaskich, które zbudowane są z utworów o większych zdolnościach retencyjnych. Tendencję do mniejszego uwilgotnienia



Rys. 4.14. Zmodyfikowany wskaźnik TWImod3 w zlewni Liwca



Rys. 4.15. Histogram rozkładu liczebności komórek rastra o określonej wartości wskaźnika *TWI*<sub>mod3</sub> w zlewni Liwca

mają obszary o większych spadkach oraz zbudowane z piasku luźnego. Zróżnicowanie przestrzenne roślinności jest wyraźnie mniej zarysowane.

Rysunek 4.15 przedstawia histogram rozkładu liczebności występowania war-

tości wskaźnika  $TWI_{mod3}$ . Kształt histogramu jest zbliżony do histogramu rozkładu  $TWI_{mod1}$ . Jego charakter również wynika z zastosowanych przy obliczaniu współczynników WWU, obrazujących różnice w uziarnieniu gleby. Prawie 90% powierzchni zlewni zajmują obszary, w których  $TWI_{mod3}$  przyjmuje wartość mniejszą niż 17. Wartość większą niż 30 ma ok. 1% powierzchni zlewni.

Charakterystyki liczbowe czterech wskaźników *TWI* zestawiono w tabl. 4.4. Najmniejszym zakresem wartości charakteryzuje się wskaźnik *TWI*<sub>mod2</sub>, a największym *TWI*<sub>mod1</sub>. Dużym zróżnicowaniem wartości, wyrażonym współczynnikiem zmienności, wyróżniają się współczynniki *TWI*<sub>mod1</sub> oraz *TWI*<sub>mod3</sub>. Mapy wskaźników TWI oraz *TWI*<sub>mod2</sub> charakteryzują się dużo mniejszą zmiennością. W tabl. 4.5 przedstawiono współczynniki korelacji Pearsona, obliczone dla par wskaźników. Największą korelacją wyróżniają się pary *TWI*<sub>mod1</sub> i *TWI*<sub>mod3</sub> oraz *TWI* i *TWI*<sub>mod2</sub>. Obliczone dla nich wartości współczynnika korelacji wynoszą odpowiednio 0,99 i 0,98.

Mapy wskaźników *TWI* ukazują potencjalne zróżnicowanie uwilgotnienia gleby w zlewni Liwca, uwzględniając różne czynniki kształtujące rzeczywistą wilgotność strefy aeracji. Mają one charakter statyczny i zgodnie z założeniami koncepcji stabilności czasowej reprezentują przestrzenny rozkład uwilgotnienia. Zmiany czasowe wynikają przede wszystkim ze zmian czynników meteorologicznych oraz

Tablica 4.4

Wskaźnik	Wartość wskaźnika w zlewni po profil w Łochowie							
	minimum	maksimum	średnia	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności [%]			
TWI	7,04	21,02	10,29	1,77	17,17			
TWI <sub>mod1</sub>	I <sub>mod1</sub> 7,08 8	80,31	25,91	11,84	45,70			
TWI <sub>mod2</sub>	3,27	10,53	5,08	0,90	17,68			
TWI <sub>mod3</sub>	I <sub>mod3</sub> 3,32		12,79	5,90	46,09			

#### Charakterystyczne wartości wskaźników TWI w zlewni Liwca po profil w Łochowie

Tablica 4.5

Zależność między wartościami czterech wskaźników wyrażona współczynnikiem korelacji liniowej Pearsona (*p*<sub>kr</sub> < 0,001)

	TWI	TWI <sub>mod1</sub>	TWI <sub>mod2</sub>	TWI <sub>mod3</sub>
TWI	1,00	0,61	0,98	0,61
TWI <sub>mod1</sub>	0,61	1,00	0,60	0,99
TWI <sub>mod2</sub>	0,98	0,60	1,00	0,61
TWI <sub>mod3</sub>	0,61	0,99	0,61	1,00

dynamiki roślinności w okresie wegetacyjnym. Chwilowy stan retencji strefy aeracji kształtowany jest przez relacje między dostawą wody w postaci opadu atmosferycznego a jej rozchodem, głównie w wyniku ewapotranspiracji. W zależności od tych relacji wartości opracowanych wskaźników powinny zwiększać się bądź zmniejszać proporcjonalnie w każdym punkcie zlewni. Nie można jednak wykluczyć występowania lokalnych deszczy nawalnych oraz różnic w opadzie w poszczególnych obszarach cząstkowych zlewni, które mogą implikować czasowe odstępstwa od założonego modelu struktury przestrzennej uwilgotnienia gleby.

#### 4.5. Zasoby wodne strefy aeracji w zlewni

Zasoby wodne strefy aeracji w zlewni w terminach badań terenowych oceniono na podstawie danych empirycznych oraz zróżnicowania przestrzennego opracowanych wskaźników *TWI*. Wartości wskaźników *TWI* w komórkach rastra, w obrębie których zlokalizowane są badane profile glebowe, porównano z wartościami wilgotności objętościowej w tych profilach. Analizę prowadzono dla warstwy 0-50 cm, której uziarnienie uwzględniono przy opracowywaniu wskaźników. Uwilgotnienie w tej warstwie wykazuje największą stabilność czasową. Badanie zależności między wartością wskaźników *TWI* a wilgotnością w profilach poprzedziła analiza jakości danych przestrzennych. Oceniono, czy dana komórka rastra reprezentuje rzeczywiste cechy profili. W tabl. 4.6 zestawiono wybrane charakterystyki profili glebowych, ocenione na podstawie własnych badań oraz odczytane z analizowanych map rastrowych.

Wartości wysokości zmierzone w terenie oraz z NMT są zbliżone. Maksymalna różnica zaobserwowana w przypadku profilu Grochów wynosi 7,1 m. Według obu źródeł danych zachowana jest ta sama kolejność profili, od najwyżej do najniżej położonego. Informacje odczytane z mapy glebowo-rolniczej przeważnie odzwierciedlają wyniki szczegółowej analizy granulometrycznej. Największe rozbieżności są zauważalne w przypadku profilu Grochów. Zgodnie z mapą w miejscu profilu występuje piasek luźny. Badania laboratoryjne wykazały natomiast w warstwie 0-40 cm piasek słabogliniasty, jednak o stosunkowo małej zawartości drobnych frakcji. Wszystkie profile są zlokalizowane na obszarach z roślinnością trawiastą. Wartości wskaźnika LAI dla poszczególnych profili są zbliżone i wahają się w graniach 0,9-1,7. Najmniejszą wartość odczytano z mapy dla profilu Grochów i rzeczywiście reprezentuje on najuboższą roślinność. Należy zauważyć, że przedstawione porównanie cech profili glebowych dotyczy informacji zebranych w punktach oraz odczytanych z map o różnej dokładności. Uwzględniając różnice skal, oceniono, że zastosowane dane przestrzenne dobrze odzwierciedlają sytuację rzeczywistą.

Tablica 4.6

Profil		Wysokość [m n.p.m.]		Podgrupa granulometryczna w warstwie 0-50 cm		Wskaźnik	Użytkowanie terenu
Nr	pomiarowy	NMT	GPS	mapa glebowo- -rolnicza	badania laboratoryjne	LAI	wokół profilu
1.	Sinołęka	157	163,3	pl	0-20 cm ps 20-50 cm pl	1,7	nieużytek
2.	Łączka	137	144,1	ps	0-50 cm ps	1,6	łąka
3.	Świniary	172	165,3	pgl	5-15 cm pgmp 15-30 pgm 30-50 pgl	1,5	łąka
4.	Grochów	138	146,4	pl	5-40 ps 40-50 psp	0,9	nieużytek
5.	Popielów	120	113,5	ps	0-20 cm pl 20-40 cm ps 40-50 cm pgm	1,1	łąka
6.	Bednarze	101	107,0	ps	0-25 ps 25-50 pl	1,5	łąka

## Wybrane charakterystyki profili glebowych ocenione na podstawie danych przestrzennych i badań terenowych

Objaśnienia: pl – piasek luźny, ps – piasek słabogliniasty, pgl – piasek gliniasty lekki, pgm – piasek gliniasty mocny, pgmp – piasek gliniasty mocny pylasty

Wartości średniego uwilgotnienia profili glebowych w warstwie 0-50 cm, obliczone za pomocą równania 3.17 z rozdz. 3.3.2, oraz odpowiadające im wartości czterech wskaźników potencjalnego uwilgotnienia gleby przedstawiono w tabl. 4.7. Wykresy zależności obu wartości przedstawia rys. 4.16. Najsłabszą zależność wykazuje rzeczywiste uwilgotnienie gleby z wartościami klasycznego wskaźnika topograficznego. Najwyższą korelacją z badaniami terenowymi wyróżniają się wskaźniki *TWI*<sub>mod1</sub> i *TWI*<sub>mod3</sub>. Obliczone dla tych par współczynniki determinacji wynoszą 0,98. Zbieżne korelacje tych wskaźników można przypisać małemu zróżnicowaniu wartości LAI w badanych profilach. Jednak w zlewni Liwca występują również formy roślinności reprezentowane przez większe wartości wskaźnika *LAI*, do których należą między innymi lasy liściaste.

W dalszej analizie zasobów wodnych w zlewni zastosowano wskaźnik  $TWI_{mod3}$ , uwzględniający zróżnicowanie przestrzenne topografii, uziarnienia i roślinności. Zróżnicowanie przestrzenne wskaźnika  $TWI_{mod3}$  przyjęto jako model struktury przestrzennej warunków wilgotnościowych w zlewni Liwca. W celu oceny uwilgotnienia zlewni w warstwie 0-50 cm na podstawie wartości wskaźnika zastosowano dwie metody, opisane szerzej w rozdz. 3.3.3. Następnie obliczono średnie uwilgotnienie

# Średnie uwilgotnienie gleby w profilach pomiarowych w warstwie 0-50 cm oraz odpowiadające im wartości wskaźników potencjalnego uwilgotnienia gleby. Wartości średnie wilgotności objętościowej wyznaczono na podstawie 18 terminów pomiarowych

Nr	Profil	Wilgotność objętościowa w warstwie	Wartość wskaźnika			
	pomiarowy	0-50 cm [%]	TWI	$TWI_{\mathrm{mod1}}$	TWI <sub>mod2</sub>	TWI <sub>mod3</sub>
1.	Sinołęka	7,7	8,27	8,27	4,19	4,19
2.	Łączka	26,2	12,33	24,66	6,20	12,40
3.	Świniary	20,0	7,45	22,35	3,71	11,13
4.	Grochów	9,6	10,10	10,10	4,62	4,62
5.	Popielów	27,6	14,30	28,60	7,06	14,12
6.	Bednarze	30,6	16,60	33,20	8,30	16,60



Rys. 4.16. Zależność między średnią wilgotnością objętościową gleby w warstwie 0-50 cm a wskaźnikami potencjalnego uwilgotnienia gleby: (a) *TWI*, (b) *TWI*<sub>mod1</sub>, (c) *TWI*<sub>mod2</sub>, (d) *TWI*<sub>mod3</sub>

zlewni i przeliczono na zapas wody. Pierwsza metoda polegała na przyporządkowaniu profilom glebowym zakresów wartości wskaźnika  $TWI_{mod3}$ , które mogą reprezentować zbliżone warunki wilgotnościowe. Średnie uwilgotnienie dla zlewni obliczono jako średnią ważoną na podstawie wag określonych dla profili. Metodę nazwano metodą grupowania ze względu na grupowanie wartości wskaźnika. Druga metoda – metoda skalowania – polegała na przeskalowaniu wartości wskaźnika  $TWI_{mod3}$  do wartości wilgotności objętościowej.

Zakresy  $TWI_{mod3}$  w metodzie grupowania zostały ustalone na podstawie wartości wskaźnika w profilach pomiarowych. Przyjęto, że średnio najsuchszy profil Sinołęka jest reprezentatywny pod względem uwilgotnienia dla obszarów z wartością  $TWI_{mod3}$  w zakresie od 3,32 (dolna granica wartości wskaźnika) do 4,40. Wartość 4,40 ustalono w połowie pomiędzy wartościami  $TWI_{mod3}$  w profilu Sinołęka (4,19) i w kolejnym pod względem uwilgotnienia profilu Grochów (4,62). Analogicznie ustalono wartości graniczne dla pozostałych profili. Następnie zliczono liczbę komórek rastra, które znajdują się w danej grupie wartości. Dla każdego profilu ustalono wagę określającą powierzchnię w zlewni, którą reprezentuje dany profil. Średnie uwilgotnienie w zlewni obliczono jako średnią ważoną z sześciu profili glebowych i przeliczono na zapas wody. W tabl. 4.8 zestawiono zakresy wartości  $TWI_{mod3}$ , liczbę komórek rastra w danym zakresie oraz ustalone wagi dla poszczególnych profili glebowych.

Mapę średniego zapasu wody w strefie aeracji w warstwie 0-50 cm z terminów badań terenowych przedstawia rys. 4.17. Legenda mapy zawiera sześć klas wielkości zapasów wody, których zakresy ustalono analogicznie, jak przedziały wartości  $TWI_{mod3}$ . Największą powierzchnię w zlewni Liwca zajmuje klasa obejmująca wartości powyżej 146 mm wody w warstwie 0-50 cm. Brak jednak informacji o górnej granicy zapasów wody w tej klasie wartości. Należą do niej między innymi obszary na południowym wschodzie zlewni, gdzie powierzchnia charakteryzuje się małym nachyleniem, a miejscami występują torfy. Zapas wody w warstwie 0-50 cm, zbudowanej z torfów, może być nawet kilkakrotnie większy niż dolna granica ostatniej klasy. Metoda grupowania nie pozwala w tym przypadku na określenie całego zakresu możliwych wartości zapasu wody. Ma charakter dyskretny i umożliwia wskazanie obszarów, które charakteryzują się wartością zapasów w ustalonym przedziale.

Metoda skalowania, w przeciwieństwie do metody grupowania, umożliwia ustalenie wartości zapasów wody w pełnym zakresie wartości. Wartości wskaźnika  $TWI_{mod3}$  zostały przeskalowane zgodnie z równaniem 3.33, opisanym w rozdz. 3.3.3. Założono, że wartości  $\theta_{min}$  i  $\theta_{max}$ , występujące w równaniu 3.33, są stałe i równe odpowiednio średniej wilgotności objętościowej profilu najsuchszego oraz profilu najwilgotniejszego. Zgodnie z tabl. 4.8 przyjęto, że  $\theta_{min}$  wynosi 7,7%, natomiast

#### Tablica 4.8

# Klasy wartości wskaźnika $TWI_{mod3}$ określone dla sześciu profili glebowych wraz z liczbą komórek rastra w danej klasie i udziałem powierzchni, jaką zajmują

Nr	Profil pomiarowy	TWI <sub>mod3</sub>	Zakres wartości TWI <sub>mod3</sub>	Liczba komórek rastra w danym zakresie	Waga
1.	Sinołęka	4,19	3,32 - 4,40	8002	0,074
4.	Grochów	4,62	4,41 - 7,87	13846	0,128
3.	Świniary	11,13	7,88 - 11,76	23888	0,222
2.	Łączka	12,40	11,77 – 13,26	8259	0,077
5.	Popielów	14,12	13,27 – 15,36	21402	0,198
6.	Bednarze	16,60	15,37 - 40,54	32459	0,301

Tablica 4.9

## Zasoby wodne strefy aeracji w warstwie 0-50 cm w zlewni Liwca po profil wodowskazowy w Łochowie w terminach pomiarowych

Termin	Zapas wody w warstwie 0-50 cm w zlewni Liwca po profil wodowskazowy w Łochowie [mm]			
pomiarowy	wg metody grupowania	wg metody skalowania		
13.09.2009	98	92		
10.10.2009	95	94		
18.04.2010	122	125		
02.05.2010	128	132		
05.06.2010	142	142		
25.07.2010	80	87		
29.08.2010	103	110		
26.09.2010	125	131		
24.10.2010	136	137		
10.04.2011	142	151		
22.05.2011	117	122		
26.06.2011	86	83		
24.07.2011	130	136		
28.08.2011	122	128		
02.10.2011	90	98		
23.10.2011	92	109		
Średnia	113	117		

 $\theta_{max}$  – 30,6%. Rysunek 4.18 przedstawia mapę średniego zapasu wody w warstwie 0-50 cm z terminów badań terenowych, opracowaną metodą skalowania. Mapa ta, w przeciwieństwie do mapy wykonanej metodą grupowania, ukazuje zróżnicowanie



Rys. 4.17. Średni zapas wody w zlewni Liwca w warstwie 0-50 cm z 18 terminów pomiarowych wg metody grupowania wraz z zaznaczonymi profilami pomiarowymi, które reprezentują sześć klas wielkości zapasów wody

warunków wilgotnościowych również w obszarach o większych tendencjach do gromadzenia wody. Występują one przede wszystkim w południowo-wschodniej części zlewni. W okresie badań terenowych zapas wody warstwy 0-50 cm przekraczał w tej części zlewni średnio 160 mm, a miejscami wynosił ponad 280 mm. Duże zapasy wody powyżej 240 mm są charakterystyczne dla dolin rzecznych. W dużej części zlewni wielkość zapasów wody wynosiła od 120 do 160 mm. Najniższy stan retencji strefy aeracji w warstwie 0-50 cm o wartości poniżej 80 mm zidentyfikowano miejscami w północno-zachodniej oraz południowo-zachodniej części zlewni. Są to obszary o niewielkich możliwościach retencyjnych, zatem szczególnie zagrożone suszą glebową.

W tabl. 4.9 przedstawiono średni zapas wody w zlewni Liwca po profil wodowskazowy w Łochowie, obliczony dwoma metodami dla kolejnych terminów pomiarów. Obliczeń nie wykonano dla dwóch terminów: 06.09.2009 i 08.11.2009. Zwierciadło wody podziemnej w profilach Łączka i Bednarze znajdowało się wówczas płycej niż na głębokości 50 cm i nie wykonano pomiarów na wszystkich głębokościach. Średni zapas wody w zlewni w warstwie 0-50 cm w szesnastu terminach



Rys. 4.18. Średni zapas wody w zlewni Liwca w warstwie 0-50 cm z 18 terminów pomiarowych wg metody skalowania



obliczonego metodą grupowania oraz metodą skalowania

pomiarowych wahał się od 80 do 142 mm wg metody grupowania i od 83 do 151 mm wg metody skalowania. Wartości obliczone w kolejnych terminach dwoma metodami są zbliżone, co przedstawiono na rys. 4.19. Zależność między danymi wyrażona współczynnikiem determinacji o wartości 0,93 jest wysoka i istotna statystycznie. Uzyskane wartości zasobów wodnych strefy aeracji w zlewni zostały wykorzystane w interpretacji oraz analizie jakości wyników modelu HBV w rozdz. 5.

# 5. REKONSTRUKCJA SZEREGÓW CZASOWYCH ZASOBÓW WODNYCH STREFY AERACJI 5.1. Wyniki kalibracji i weryfikacji modelu HBV

Jak wspomniano w rozdz. 3.3.4, do kalibracji modelu HBV wybrano wartości przepływu Liwca w profilu wodowskazowym Łochów z okresu 2007-2011 w układzie lat hydrologicznych. Automatyczna metoda optymalizacyjna Monte Carlo pozwoliła zidentyfikować zestawy parametrów, dla których współczynnik efektywności modelu  $R_{eff}$  osiągnął wartość 0,86. Ustalono 52 takie zestawy. Rysunki 5.1 i 5.2 przedstawiają zakresy zmian poszczególnych parametrów w tych zestawach. Skala pionowa wykresów obejmuje wartości parametrów w granicach przyjętych przed kalibracją.

Parametry *CFR* i *DELAY* zmieniają się w całym zakresie przyjętym na początku kalibracji. W przypadku pozostałych zakresy ich zmian zostały zawężone. Przykładowo wartości parametru *TT* w uzyskanych zestawach wahają się od -1,03 do 0,535°C, przy wejściowym zakresie od -1,5 do 2,5°C. Najbardziej zawężone zostały zakresy parametrów: *FC*, *K*2 i *MAXBAS*. W przypadku dwóch ostatnich, ich wartość była zbliżona we wszystkich zestawach.

Obliczenia, z zestawami różniącymi się między sobą wartościami poszczególnych parametrów, dały zbliżone wartości wskaźników oceny efektywności modelu. Powstaje jednak pytanie, jak różnią się wartości przepływu uzyskane z symulacji z zastosowaniem różnych zestawów parametrów. Rysunek 5.3 przedstawia 52 hydrogramy przepływu symulowanego w okresie kalibracji, obliczone każdorazowo z użyciem innego zestawu parametrów. Przepływy symulowane wykazują zbliżoną dynamikę. Zauważalne są jedynie niewielkie różnice między poszczególnymi hydrogramami.

Z 52 zestawów uzyskanych podczas kalibracji metodą Monte Carlo do dalszej analizy wytypowano trzy, dla których oprócz współczynnika determinacji również pozostałe wskaźniki poprawności modelu były wysokie. Następnie poddano je ka-



Rys. 5.1. Zakresy wartości parametrów modułów pokrywy śnieżnej i uwilgotnienia strefy aeracji w 52 zestawach, dla których współczynnik  $R_{eff} = 0.86$ 

libracji ręcznej, w celu wizualnego dopasowania hydrogramów przepływu obserwowanego i symulowanego oraz poprawy wartości wskaźników. Wizualna ocena hydrogramów pozwala uchwycić przeszacowanie lub niedoszacowanie wartości obliczonych, wyrażone wskaźnikiem *M*. Jest on szczególnie wrażliwy na zmiany parametrów związanych z modułem uwilgotnienia strefy aeracji. Korekty tych parametrów umożliwiają lepsze dopasowanie objętości odpływu. Uzyskane trzy zestawy parametrów, wraz z obliczonymi dla nich wartościami wskaźników, zestawiono w tabl. 5.1. Wartości parametrów w poszczególnych zestawach różnią się znacznie w przypadku parametrów *FC* i *DELAY*. Natomiast wartości parametrów *SFCF*, *MAXBAS* i *PART* są zbliżone w trzech zestawach. W przypadku wszystkich trzech zestawów parametrów współczynnik efektywności modelu  $R_{eff}$ wynosi 0,86, współczynnik determinacji  $R^2 - 0,86$ , współczynnik efektywności modelu z logarytmem  $R_{eff log} - 0,77$ , a średnia roczna różnica między odpływem obserwowanym i symulowanym M - 0 mm.

Tablica 5.1

Parametr	Zestaw 1	Zestaw 2	Zestaw 3
TT	-0,170	0,274	0,250
CFMAX	2,069	2,800	2,520
SFCF	1,000	1,000	1,000
CFR	0,014	0,003	0,092
CWH	0,057	0,023	0,000
FC	144,000	134,000	116,000
LP	0,785	0,714	0,638
BETA	5,660	5,288	4,467
ALPHA	0,155	0,195	0,294
<i>K</i> 1	0,084	0,068	0,054
К2	0,002	0,003	0,002
MAXBAS	6,200	6,000	6,000
PART	0,600	0,618	0,620
DELAY	24,000	12,000	50,000
R <sub>eff</sub>	0,86	0,86	0,86
$R_{efflog}$	0,77	0,77	0,77
$R^2$	0,86	0,86	0,86
М	0	0	0

Wartości parametrów oraz wskaźników efektywności modelu uzyskane podczas kalibracji dla trzech wytypowanych zestawów

Oznaczenia symboli:  $R_{eff}$  – współczynnik efektywności modelu,  $R_{eff log}$  – współczynnik efektywności modelu z logarytmem,  $R^2$  – współczynnik determinacji, M – roczna różnica między odpływem obserwowanym i symulowanym







Rys. 5.3. Przepływy symulowane w okresie kalibracji wg 52 zestawów parametrów

Rysunki 5.4, 5.5 i 5.6 przedstawiają przepływ obserwowany i symulowany wg trzech zestawów parametrów w kolejnych latach okresu kalibracji. Na wykresach dodatkowo przedstawiono wartości współczynników determinacji, obliczone oddzielnie dla każdego roku. Największą wartość,  $R^2 = 0,91$ , uzyskano dla 2011 r. Jednocześnie wyróżniał się on najwyższym średnim rocznym przepływem (SQ = 18,6 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>). Natomiast najmniejszą wartość  $R^2 = 0,71$  uzyskano dla 2008 r., który charakteryzował się najniższym średnim rocznym przepływem (SQ = 8,0 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>). Może to wskazywać na mniejszą dokładność modelu w odtwarzaniu przepływów niskich.

Rysunek 5.7 przedstawia zależność dobowych wartości przepływu obserwowanego i symulowanego w okresie kalibracji wg trzech zestawów parametrów. Obliczono równanie postaci y = ax oraz współczynniki determinacji. Współczynniki determinacji dla każdej pary wynoszą  $R^2 = 0,83$ . Współczynniki kierunkowe równań wynoszą a = 0,90 dla zależności między przepływem obserwowanym i symulowanym wg zestawu 1 i 3 oraz a = 0,91 dla pary przepływ obserwowany i symulowany wg zestawu 2. Wskazują one na niedoszacowanie przez model wartości przepływów, co wcześniej było sygnalizowane przez Somorowską i Piętkę (2012). Zakładając błąd systematyczny w uzyskanych wartościach, można stwierdzić, że przepływ symulowany stanowi ok. 0,9 przepływu obserwowanego. Jednak poszcze-



Rys. 5.4. Przepływ obserwowany  $Q_{obs}$  i symulowany  $Q_{sim}$  Liwca w profilu Łochów wg parametrów zestawu 1 w kolejnych latach okresu kalibracji: (a) 2007, (b) 2008, (c) 2009, (d) 2010, (e) 2011



Rys. 5.5. Przepływ obserwowany  $Q_{obs}$  i symulowany  $Q_{sim}$  Liwca w profilu Łochów wg parametrów zestawu 2 w kolejnych latach okresu kalibracji: (a) 2007, (b) 2008, (c) 2009, (d) 2010, (e) 2011



Rys. 5.6. Przepływ obserwowany  $Q_{obs}$  i symulowany  $Q_{sim}$  Liwca w profilu Łochów wg parametrów zestawu 3 w kolejnych latach okresu kalibracji: (a) 2007, (b) 2008, (c) 2009, (d) 2010, (e) 2011



Rys. 5.7. Zależność między przepływem obserwowanym i symulowanym wg trzech zestawów parametrów: (a) zestaw 1, (b) zestaw 2, (c) zestaw 3

gólne punkty, reprezentujące przepływ do ok. 30-40 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, rozproszone są stosunkowo równomiernie wokół prostej y = x. Zauważalne jest niedoszacowanie wartości w zakresie przepływów najwyższych.

Roczne sumy odpływu obserwowanego i symulowanego wg trzech zestawów danych przedstawia rys. 5.8. Wartości dla kolejnych lat okresu kalibracji są zbliżone. Można zauważyć, że przy mniejszych sumach rocznych w latach 2007-2009, przepływ symulowany był wyższy. Jednak różnice są niewielkie i wynoszą, przykładowo dla symulacji wg zestawu 1 w kolejnych trzech latach, odpowiednio 3 mm, 14 mm i 11 mm. W latach 2010 i 2011, kiedy odpływ był wyższy, sytuacja jest odwrotna. Przepływ symulowany jest niższy w stosunku do obserwowanego, odpowiednio o 5 mm i 26 mm.





Przeprowadzona analiza przepływów w okresie kalibracji może wskazywać na mniejsze dopasowanie wartości obserwowanych i symulowanych w zakresie przepływów wysokich. Należy zauważyć, że w 2011 r. zaobserwowano bardzo wysokie przepływy osiągające ponad 100 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Przepływy o podobnej wielkości były notowane jeszcze tylko w pięciu latach okresu 1980-2011, zastosowanego w symulacji.

Zgodność hydrogramów przepływów obserwowanego i symulowanego oceniona na podstawie przyjętych wskaźników efektywności modelu świadczy o prawidłowym przeprowadzeniu kalibracji. Następnie model poddano weryfikacji przez przeprowadzenie symulacji kontrolnych dla okresu 2001-2005, z zastosowaniem trzech zestawów parametrów. Okres weryfikacji, podobnie jak kalibracji, charakteryzował się zróżnicowanymi przepływami, co opisano w rozdz. 3.3.4. W tabl. 5.2 zestawiono wskaźniki efektywności modelu uzyskane podczas weryfikacji dla trzech zestawów parametrów. Wykresy przepływu obserwowanego i symulowanego w okresie weryfikacji dla trzech zestawów parametrów przedstawiono na rys. 5.9, 5.10 i 5.11. W tabl. 5.2 zestawiono wartości wskaźników efektywności modelu dla trzech zestawów, uzyskane podczas weryfikacji modelu. Dla zestawu 1 uzyskano współczynnik efektywności modelu równy 0,77 i współczynnik determinacji równy 0,84. Dla zestawu 2 wartości te wyniosły odpowiednio 0,75 i 0,85, a dla zestawu 3 – 0,77 i 0,86.

Analiza porównawcza hydrogramów przepływów w okresach kalibracji i weryfikacji wskazuje na dużą zgodność dobowych wartości przepływów obserwowanych i symulowanych. Wyniki pozwalają przyjąć, że dokładność odtwarzania przepływów przez model jest wystarczająco dobra. Tym samym uprawniają do zastosowania skalibrowanego modelu w symulacji przepływu w wieloleciu 1980-2011.

Tablica 5.2

Wskaźnik efektywności modelu	Zestaw 1	Zestaw 2	Zestaw 3
R <sub>eff</sub>	0,77	0,75	0,77
R <sub>eff</sub> log	0,65	0,66	0,65
$R^2$	0,84	0,85	0,86
M	-26	-26	-28

# Wartości wskaźników efektywności modelu uzyskane podczas weryfikacji modelu dla trzech wytypowanych zestawów

Oznaczenia symboli:  $R_{eff}$  – współczynnik efektywności modelu,  $R_{eff log}$  – współczynnik efektywności modelu z logarytmem,  $R^2$  – współczynnik determinacji, M – roczna różnica między odpływem obserwowanym i symulowanym







Rys. 5.10. Przepływ obserwowany  $Q_{obs}$  i symulowany  $Q_{sim}$  Liwca w profilu Łochów w kolejnych latach okresu weryfikacji wg parametrów zestawu 2





# 5.2. Symulacja zasobów wodnych strefy aeracji

Symulacji zasobów wodnych strefy aeracji w okresie 1980-2011 dokonano z trzema zestawami parametrów modelu. Otrzymano szeregi czasowe dobowych zasobów wodnych w milimetrach, odniesione do wartości maksymalnej, określonej parametrem *FC*. Wartości tego parametru różniły się w trzech zestawach i wynosiły odpowiednio 144, 134 i 116 mm. W celu porównania uzyskanych szeregów czasowych zostały one wyrażone wartościami względnymi. Zastosowano skalowanie wartości w zakresie  $\langle 0, 1 \rangle$  wg wzoru 3.31, przedstawionego w rozdz. 3.3.3. Zależność między danymi przedstawiono na rys. 5.12. Punkty na wykresach, reprezentujące wartości dobowe, układają się wzdłuż prostych y = x. Obliczone współczynniki determinacji dla par danych wg zestawów 1 i 2 oraz 2 i 3 wynoszą  $R^2 = 0,99$ . Dla pary danych wg zestawów 1 i 3  $R^2 = 0,98$ . Mimo różnic w wartościach bezwzględnych pomiędzy trzema szeregami czasowymi, zależnych od przyjętego parametru *FC*, wykazują one bardzo wysoką istotną korelację. Wyniki uzyskane z modelu wyrażane wartościami względnymi wg trzech zestawów są zbliżone, co świadczy o stabilności działania modelu.

Szeregi czasowe zasobów wodnych strefy aeracji, odtworzone modelem HBV, porównano z danymi pozyskanymi z bazy GLDAS. Dane GLDAS, określające wielkość zasobów w warstwie 0-50 cm, przeskalowano do wartości względnych, podobnie jak dane z modelu HBV. Dokonano oceny zależności danych dobowych oraz miesięcznych w wieloleciu 1980-2011, co przedstawiono odpowiednio na rys. 5.13 i 5.14. Współczynniki determinacji, uzyskane dla wartości dobowych, wynoszą  $R^2 = 0,58$  w przypadku związku danych GLDAS z danymi HBV wg zestawu 1 i 2 oraz  $R^2 = 0,57$  wg zestawu 3. Badane korelacje są istotne statystycznie. Analizując rozproszenie punktów na wykresach, można przypuszczać, że dane z modelu HBV słabiej odzwierciedlają duże wartości zasobów wodnych. Zbliżony problem, niedoszacowania wartości przepływu przez model w zakresie wartości maksymalnych, przedstawiono w rozdz. 5.1. Model oblicza zapas wody do wartości maksymalnej równej wartości parametru *FC*. Nie ma możliwości przekroczenia stanu retencji



Rys. 5.12. Zależność dobowych zasobów wodnych w wieloleciu 1980-2011 wyrażonych wartością względną uzyskanych z modelu HBV wg trzech zestawów parametrów: (a) 1 i 2, (b) 1 i 3, (c) 2 i 3

określonej tym parametrem, utożsamianego z polową pojemnością wodną. Można przypuszczać, że wartości w szeregach czasowych bliskie ustalonego parametru *FC*, określają osiągnięcie przez glebę stanu polowej pojemności wodnej bądź retencji wyższej, łącznie ze stanem pełnej saturacji. Dla wartości miesięcznych, ze względu na uśrednienie danych, problem ten jest mniej widoczny. Dane miesięczne GLDAS z danymi HBV wg zestawu 1 i 3 wykazują zależność określoną współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,59$ . Dla pary danych GLDAS i HBV wg zestawu 2 obliczono  $R^2 = 0,60$ . Uzyskane współczynniki determinacji są większe niż w przypadku danych dobowych.

Na przedstawionych wykresach rozproszenia danych dobowych i miesięcznych zauważalne są punkty bądź grupy punktów, które wyraźnie odstają od pozostałych wartości. Mogą one w znacznym stopniu wpływać na dopasowanie zesta-



Rys. 5.13. Zależność między zapasem wody w warstwie 0-50 cm uzyskanym z bazy GLDAS a zapasem wody z modelu HBV wg trzech zestawów parametrów: (a) zestaw 1, (b) zestaw 2, (c) zestaw 3 (dane dobowe wyrażone wartością względną)



Rys. 5.14. Zależność między zapasem wody w warstwie 0-50 cm uzyskanym z bazy GLDAS a zapasem wody z modelu HBV wg trzech zestawów parametrów: (a) zestaw 1, (b) zestaw 2, (c) zestaw 3 (dane miesięczne wyrażone wartością względną)

wów danych i uzyskiwane współczynniki determinacji. W celu zidentyfikowania okresów, w których dopasowanie danych było najsłabsze, obliczono współczynniki determinacji dla wartości dobowych osobno dla kolejnych lat wielolecia 1980-2011. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.15. Zależności uzyskane dla trzech par danych w kolejnych latach są zbliżone. Wysokie współczynniki determinacji, przekraczające wartość  $R^2 = 0,80$ , obliczono w dziesięciu przypadkach. W czterech przypadkach, w latach: 1992, 1996, 1997 i 2000, wartość współczynnika nie przekroczy-



Rys. 5.15. Współczynniki determinacji  $R^2$  określające stopień zależności między dobowymi wartościami zapasu wody w kolejnych latach wielolecia 1980-2011 wg danych GLDAS (0-50 cm) oraz z modelu HBV wg trzech zestawów: (a) zestaw 1, (b) zestaw 2, (c) zestaw 3

ła  $R^2 = 0,60$ . Istotny brak zależności między danymi wykryto w 1997 r. Eliminując z ciągu danych dobowych wartości z czterech lat, dla których wykazano najmniejsze dopasowanie, uzyskałoby się współczynnik determinacji  $R^2 = 0,65$  dla zależności między danymi GLDAS i z modelu wg zestawu 1 i 2 oraz  $R^2 = 0,64$  dla zależności między danymi GLDAS i z modelu wg zestawu 3.

Tablica 5.3

Współczynniki korelacji Pearsona obliczone dla par zestawów danych zapasu wody w strefie aeracji z szesnastu terminów badań terenowych (współczynniki są istotne na poziomie p = 0.05)

Zestaw danych	Badania terenowe (grupowanie)	Badania terenowe (skalowanie)	HBV zestaw1	HBV zestaw 2	HBV zestaw 3	GLDAS
Badania terenowe (grupowanie)	1,00	0,97	0,73	0,72	0,70	0,89
Badania terenowe (skalowanie)	0,97	1,00	0,73	0,72	0,69	0,90
HBV zestaw 1	0,73	0,73	1,00	1,00	0,99	0,62
HBV zestaw 2	0,72	0,72	1,00	1,00	0,99	0,60
HBV zestaw 3	0,70	0,69	0,99	0,99	1,00	0,57
GLDAS 0-50 cm	0,89	0,90	0,62	0,60	0,57	1,00

Wyniki modelu HBV oraz dane z bazy GLDAS porównano z danymi określonymi na podstawie badań terenowych. Średni zapas wody w warstwie 0-50 cm w zlewni w szesnastu terminach określono na podstawie danych empirycznych dwoma metodami, co zostało przedstawione w rozdz. 4.5. Z długich szeregów czasowych danych HBV i GLDAS wyodrębniono wartości w szesnastu terminach pomiarowych. Liczbowe zależności między danymi wyrażono współczynnikiem korelacji Pearsona i przedstawiono w tabl. 5.3. Wszystkie obliczone współczynniki są istotne statystycznie. Dla danych określonych na podstawie badań terenowych metodami skalowania i grupowania oraz danych z modelu HBV wg trzech zestawów współczynnik korelacji przyjmuje wartość w zakresie od 0,69 do 0,73. Największe wartości charakteryzują zależność danych z badań terenowych oraz z modelu HBV wg zestawu 1. Współczynniki korelacji, obliczone w przypadku zależności między danymi GLDAS a dwoma zestawami danych z badań terenowych, wynoszą 0,89 i 0,90.

### 5.3. Interpretacja wyników modelowania

Dobowe zasoby wodne strefy aeracji w latach 1980-2011, uzyskane w wyniku obliczeń modelu HBV, charakteryzują względny chwilowy stan retencji odniesiony