

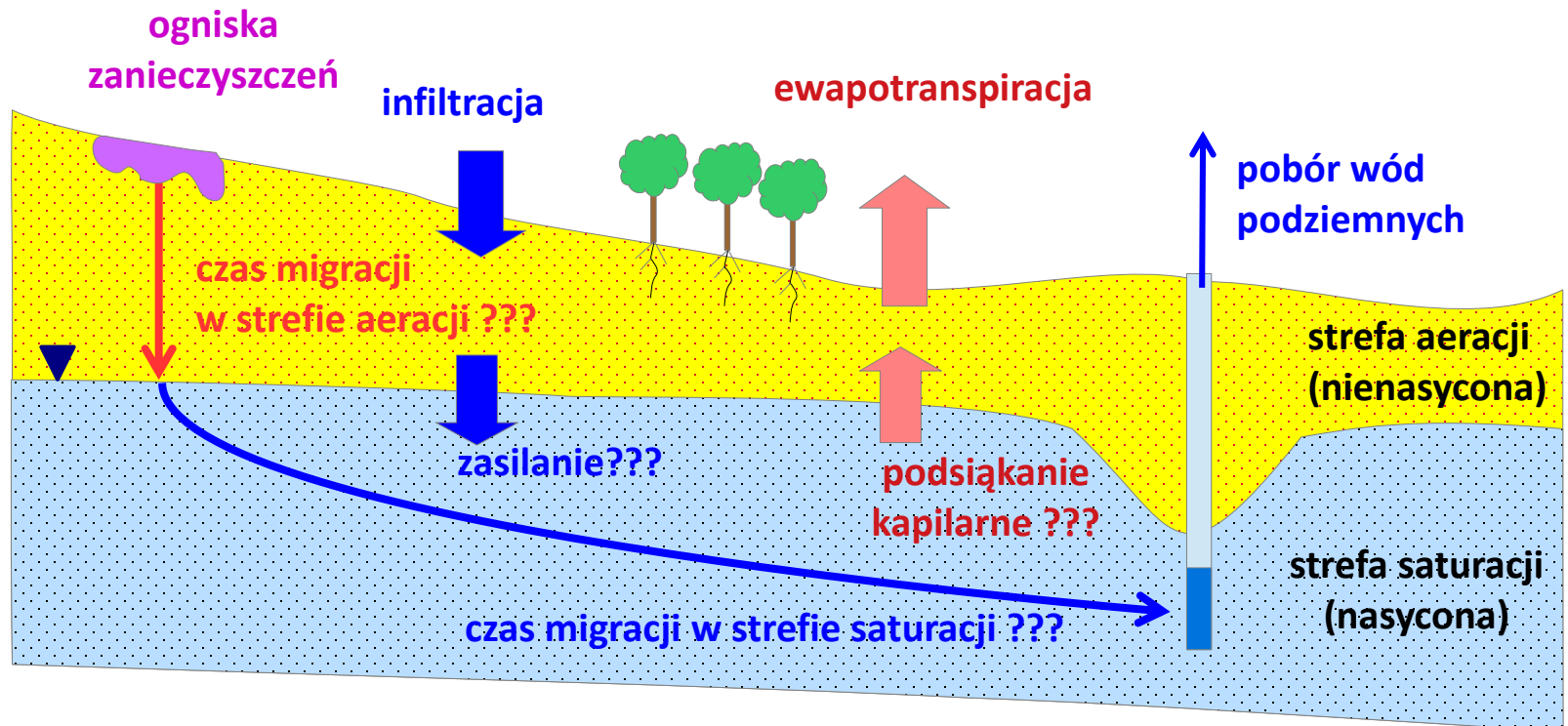


Zintegrowane modelowanie przepływu wody i transportu zanieczyszczeń w strefach aeracji i saturacji

Adam Szymkiewicz

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Ochrona ilości i jakości zasobów wód podziemnych

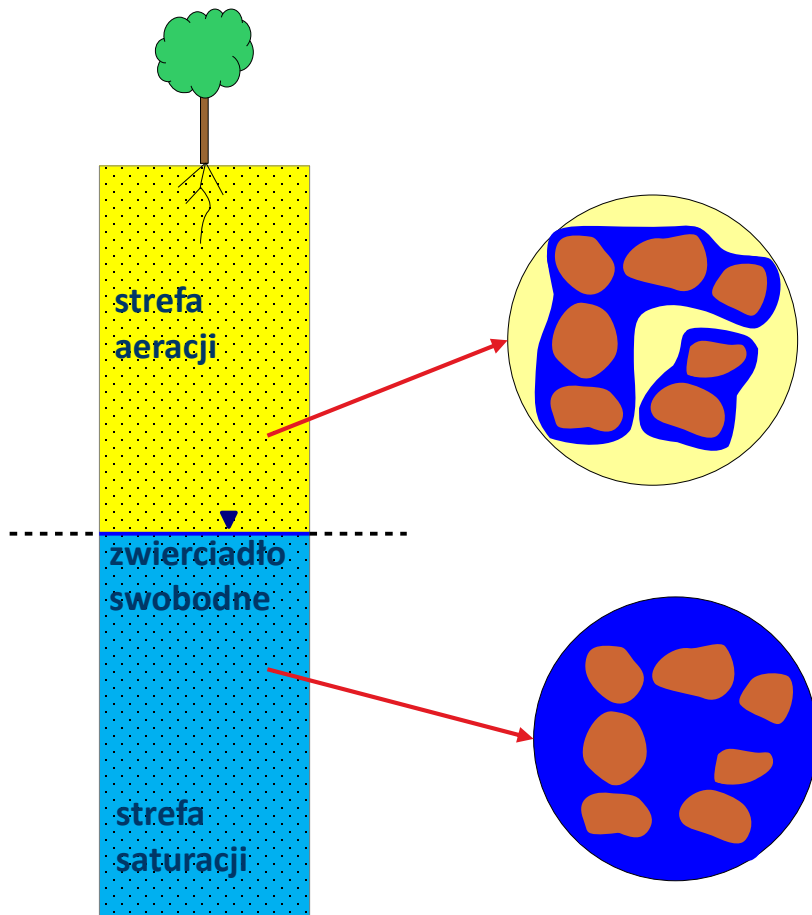




Plan prezentacji

- przepływ wody i transport zanieczyszczeń w strefach aeracji i saturacji: podobieństwa i różnice
- przegląd modeli zintegrowanych
- przykłady:
 - integracja programów HYDRUS-1D i MODFLOW (projekt NCN „Zasilanie infiltracyjne na obszarze sandrowym”)
 - integracja programów SWAT i MODFLOW (projekt NCBiR WaterPuck)
- współpraca: J. Šimůnek, S. Beegum, B. Letorme, R. Angulo-Jaramillo, B. Jaworska-Szulc, A. Gumuła-Kawęcka, D. Potrykus, W. Gorczewska-Langner, M. Pruszkowska-Caceres, D. Kalinowska, P. Wielgat, P. Zima, L. Dzierzbicka-Głowacka

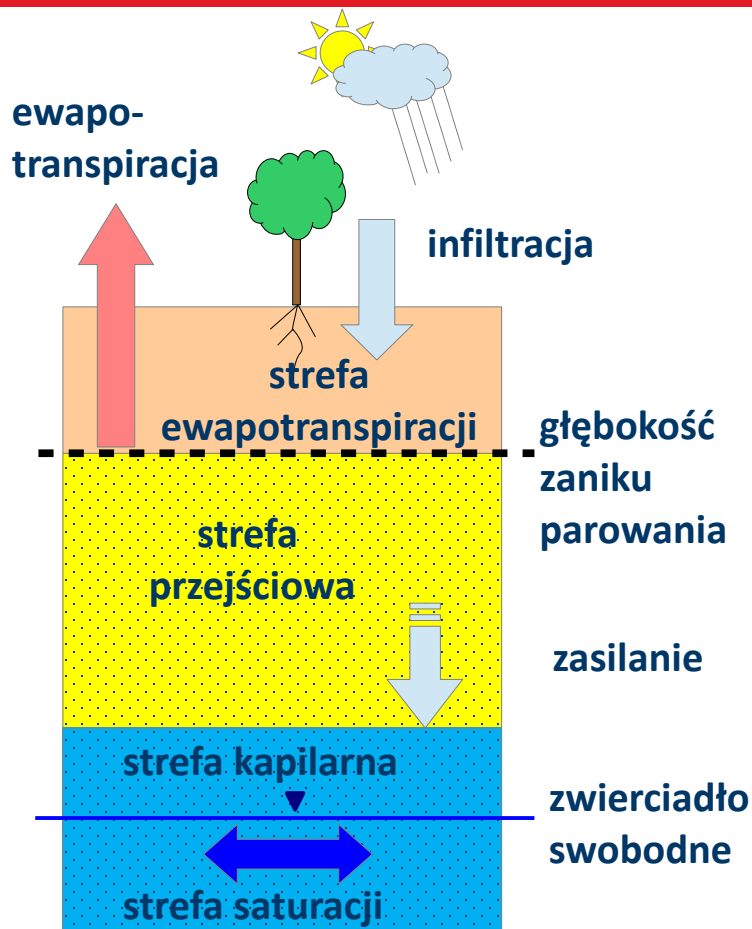
Woda i powietrze w ośrodku porowatym



- przepływ dwufazowy (woda+powietrze)
- wilgotność $\theta < \text{porowatość } n$
- stopień nasycenia $S_w < 1$
- ciśnienie wody $h < 0$ (ssanie na skutek sił kapilarnych i adsorbcyjnych)

- przepływ jednofazowy (woda)
- wilgotność $\theta = \text{porowatość } n$
- stopień nasycenia $S_w = 1$
- ciśnienie wody $h > 0$

Profil pionowy

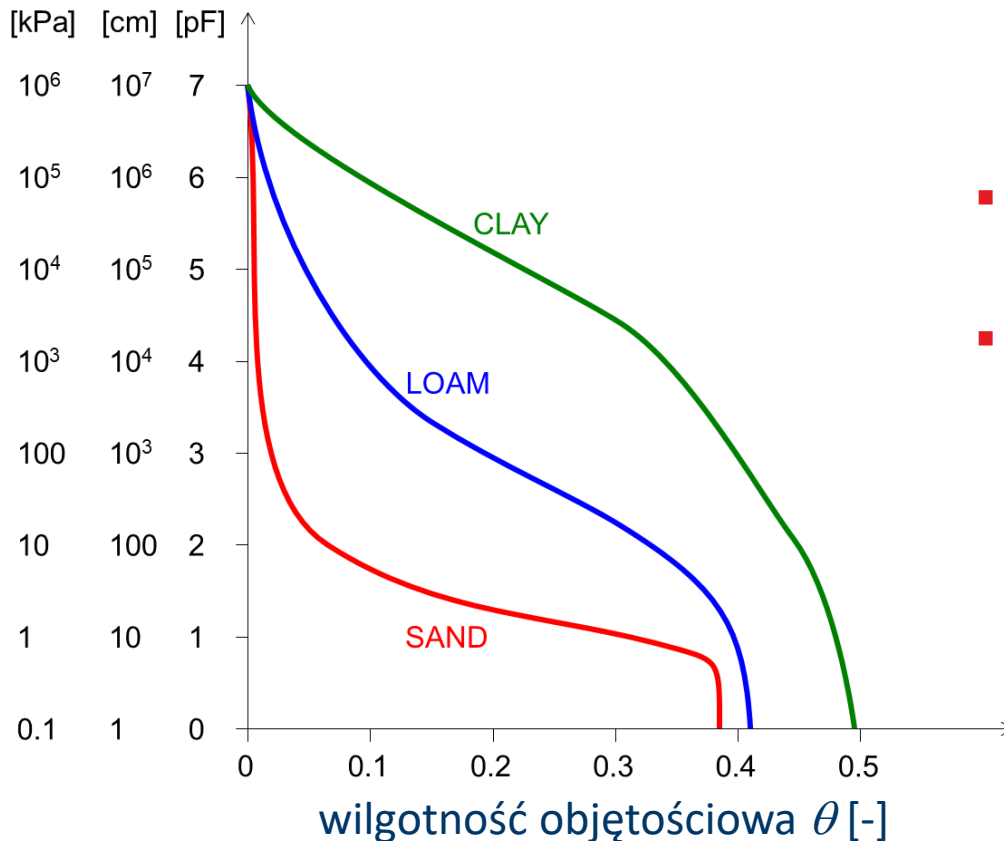


- strefa ewapotranspiracji
 - duża zmienność wilgotności
 - silny wpływ warunków atmosferycznych
- strefa przejściowa
 - przesączanie w dół
 - przepływ bardziej ustabilizowany
 - nie występuje w przypadku płytkiego zwierciadła
- strefa kapilarna
 - stan quasi nasycony
 - ciągłość ze strefą saturacji



Krzywa retencji gruntu / skały

ujemne ciśnienie wody (ssanie)



- zależność nieliniowa, trudna do wyznaczenia eksperymentalnie
- może być określona w sposób przybliżony na podstawie krzywej uziarnienia gruntu

Współczynnik filtracji i prawo Darcy



- prawo Darcy można rozszerzyć na przepływ w strefie aeracji
- w ośrodku nienasyconym współczynnik filtracji zależy od stopnia nasycenia

$$\mathbf{v}_w = -\mathbf{k}_s k_r(S_w) \nabla(h + z)$$

prędkość filtracji $\mathbf{v}_w$

współczynnik filtracji w warunkach pełnego nasycenia $\mathbf{k}_s$

współczynnik przewodności względnej (0 do 1, zależnie od stopnia nasycenia) $k_r(S_w)$

gradient wysokości hydraulicznej $\nabla(h + z)$

- w ośrodku nasyconym współczynnik filtracji jest wielkością stałą (w danym punkcie)

$$\mathbf{v}_w = -\mathbf{k}_s \nabla H$$

Równanie przepływu wody (równanie Richardsa)



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(\mathbf{k}_s k_r(S_w) \nabla(h + z))$$

- w strefie aeracji zmiany θ i k wynikają głównie ze zmian stopnia nasycenia porów wodą i mogą być znaczne

- równanie nieliniowe

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \approx n \frac{\partial S_w(h)}{\partial t} \quad \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \nabla(\mathbf{k}_s k_r(S_w) \nabla(h + z))$$

- w strefie saturacji zmiany θ i k wynikają ze ściśliwości ośrodka porowatego i są nieznaczne

- równanie liniowe

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx \frac{\partial n}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(\mathbf{k}_s \nabla(h + z))$$

S_s
współczynnik pojemności
sprężystej (jednostkowy)

Równanie transportu substancji rozpuszczonej



- ogólne równanie transportu adwekcyjno-dyspersyjnego:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \nabla(\theta D \nabla c) - \nabla(\mathbf{v}c)$$

c stężenie

D współczynnik dyspersji
hydrodynamicznej

- w strefie nasyconej $\theta = n$:

$$\frac{\partial(nc)}{\partial t} = \nabla(nD \nabla c) - \nabla(\mathbf{v}c)$$

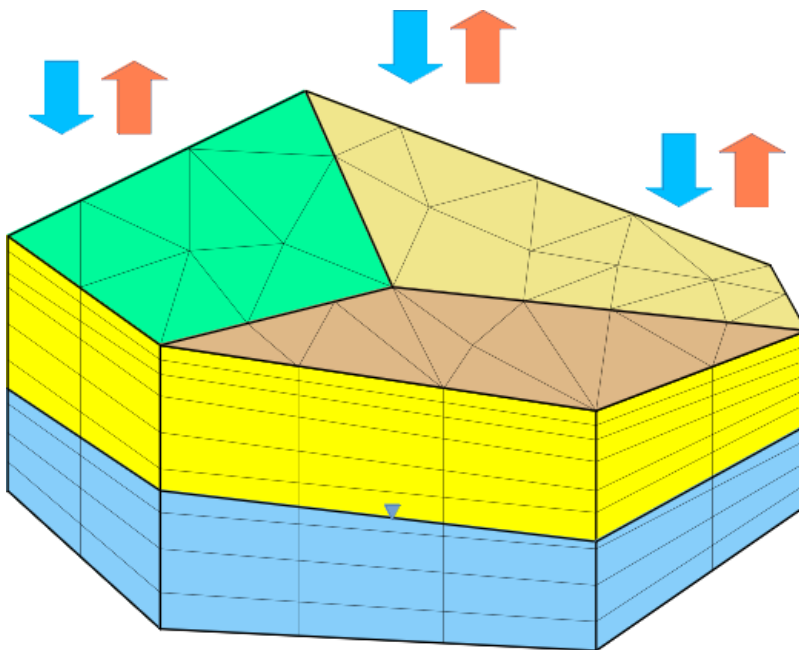
- w strefie nasyconej θ i n na część aktywną (mobilną) i nieaktywną



Podział modeli

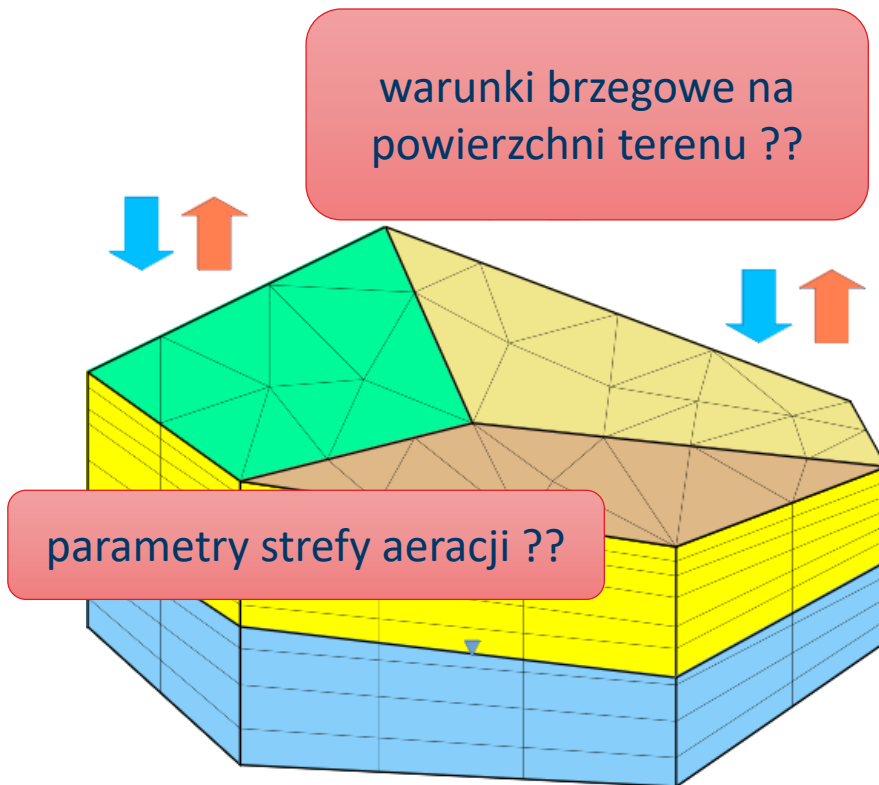
- model przepływu/transportu 3D zastosowany dla całego obszaru podziemnego (strefy aeracji i saturacji)
- model przepływu/transportu 3D w strefie saturacji sprzężony z modelami 1D, opisującymi pionowy przepływ i transport w strefie aeracji
- model przepływu/transportu 3D w strefie saturacji sprzężony z uproszczonymi modelami (agro)hydrologicznymi, opisującymi procesy w strefie aeracji

3D równanie Richardsa



- najbardziej ogólne i spójne podejście do modelowania
- nie ma potrzeby zadawania warunków brzegowych na zwierciadle oraz określania współczynnika odsączalności
- przepływ poziomy w strefie aeracji, zwierciadła zawieszone
- warunki brzegowe zadawane na powierzchni terenu muszą uwzględniać zmienną w czasie infiltrację, ewaporację i transpirację

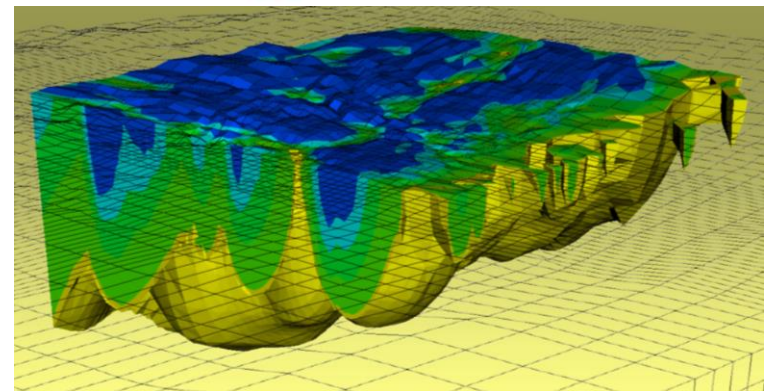
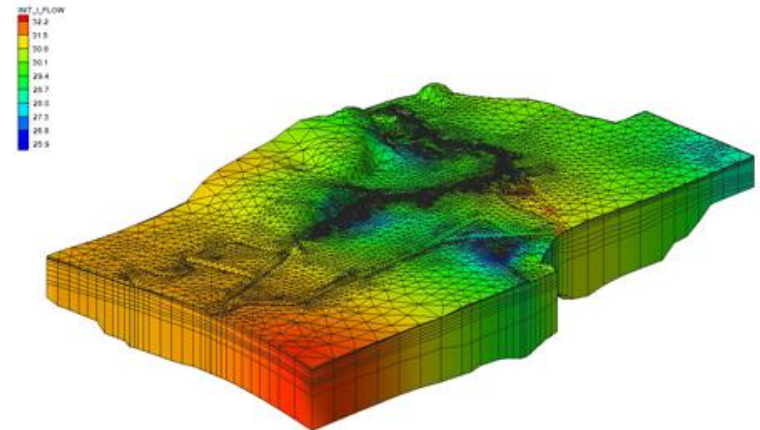
3D równanie Richardsa



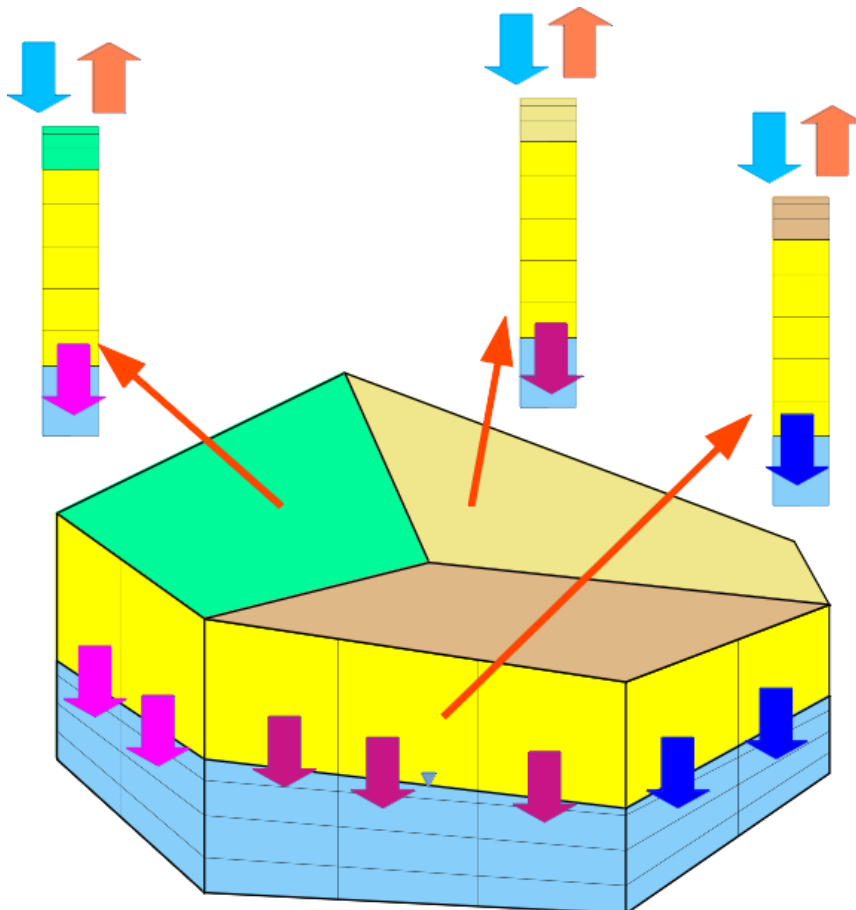
- wymaga dużej mocy obliczeniowej
- gęsta siatka numeryczna w pobliżu powierzchni terenu
- nieliniowość równania Richardsa + zmienność warunków brzegowych = problemy ze zbieżnością
- trudności w określeniu parametrów hydraulicznych strefy aeracji
- podejście stosowane głównie w skali lokalnej, np. w sąsiedztwie składowiska odpadów

3D równanie Richardsa

- przepływ powierzchniowy i podziemny:
 - CATHY: CATchment HYdrology (Bixio et al. 2002, Camporese et al. 2010)
 - HydroGeoSphere (Therrien et al. 2010)
 - OpenGeoSys (Kolditz et al. 2012)
- przepływ ze zmienną gęstością:
 - FEFLOW (Diersch 2013)
 - SUTRA (Voss & Provost 2010)
 - 3DFEMWATER + 3DLEWASTE (Lin et al. 1997)
 - OpenGeoSys (Kolditz et al. 2012)

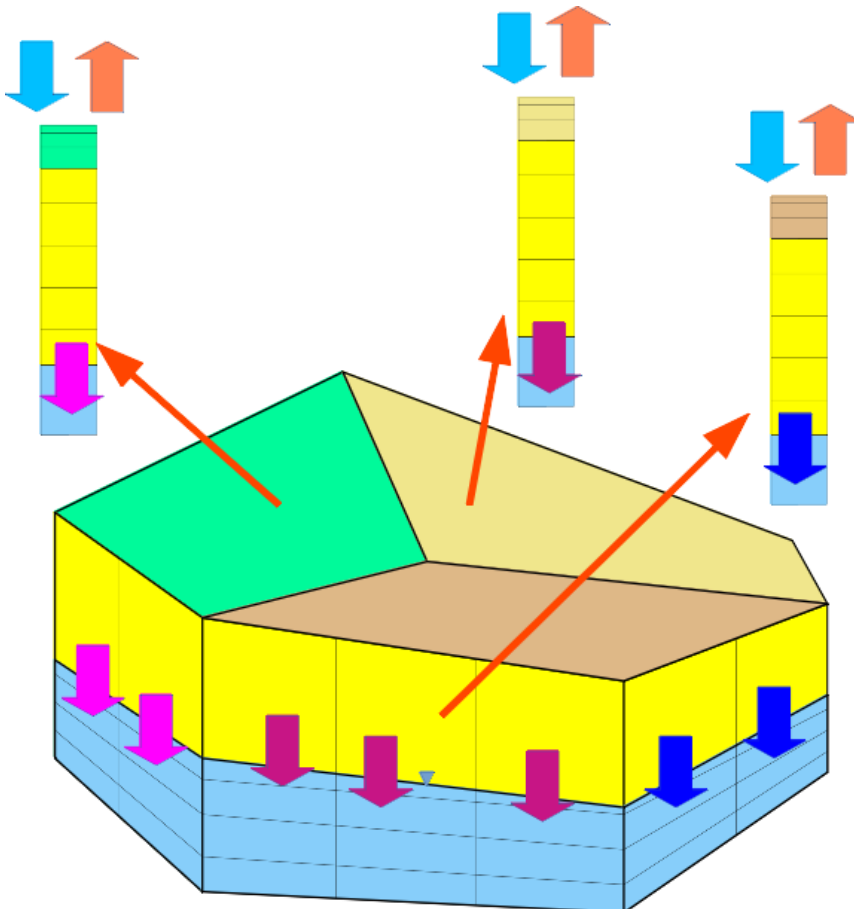


3D strefa saturacji + 1D Richards



- w strefie saturacji stosowane są klasyczne modele przepływu i transportu 3D, np. programy MODFLOW + MT3D
- zasilanie i dopływ zanieczyszczeń do zwierciadła otrzymuje się rozwiązując 1D równania w strefie aeracji w wybranych obszarach modelu
- reprezentatywne profile obliczeniowe określone na podstawie rodzaju gruntu, użytkowania terenu, miąższości strefy aeracji, itd.

3D strefa saturacji + 1D Richards



- stosunkowo dokładne odwzorowanie procesów w strefie aeracji w poszczególnych profilach, w tym podsiąkania kapilarnego
- możliwość wykorzystania zaawansowanych programów 1D dla strefy aeracji
 - HYDRUS-1D (Simunek et al. 1998)
 - SWAP (Kroes et al. 2009)
- znaczące zmniejszenie czasu obliczeń w porównaniu z pełnym modelem 3D
- możliwa paralelizacja obliczeń



HYDRUS Package for MODFLOW

- pierwotna wersja dla MODFLOW-2000 (Seo et al. 2007), obecnie dostosowany do MODFLOW-2005 (Beeghum et al. 2018)
- współpraca zespołów z University of California - Riverside, Belgian Center for Nuclear Research (SCK•CEN) i Politechniki Gdańskiej
- częściowo rozwijany w ramach projektu NCN 2015/17/B/ST10/03233 “Zasilanie infiltracyjne na obszarze sandrowym”



Przykład obliczeniowy

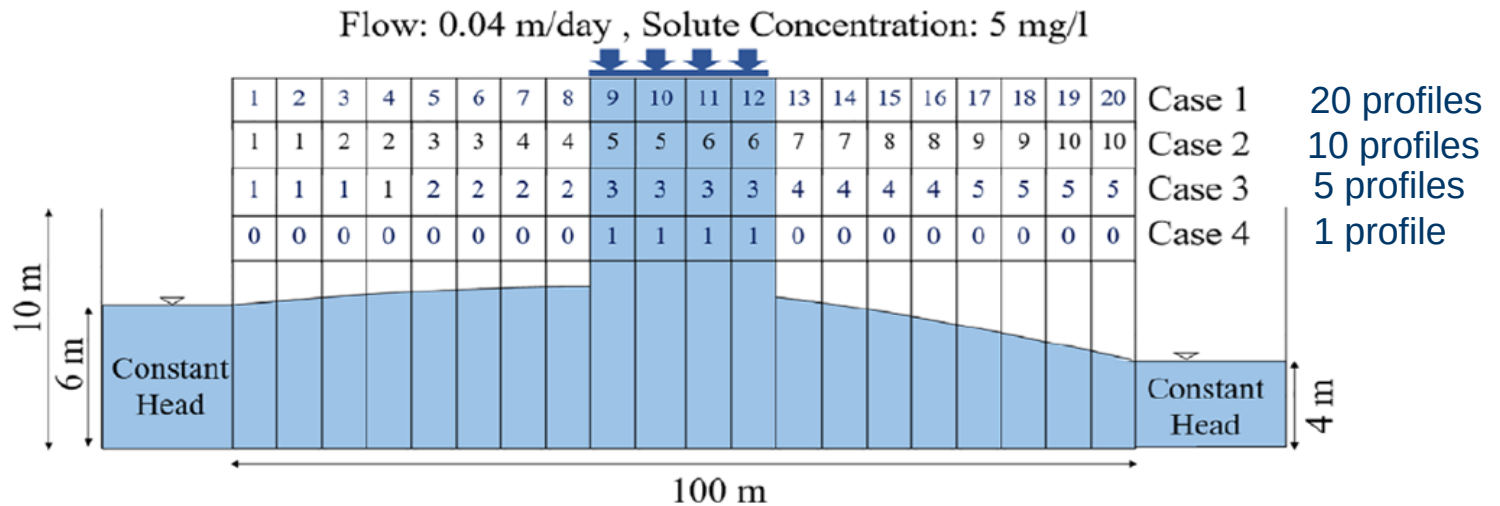
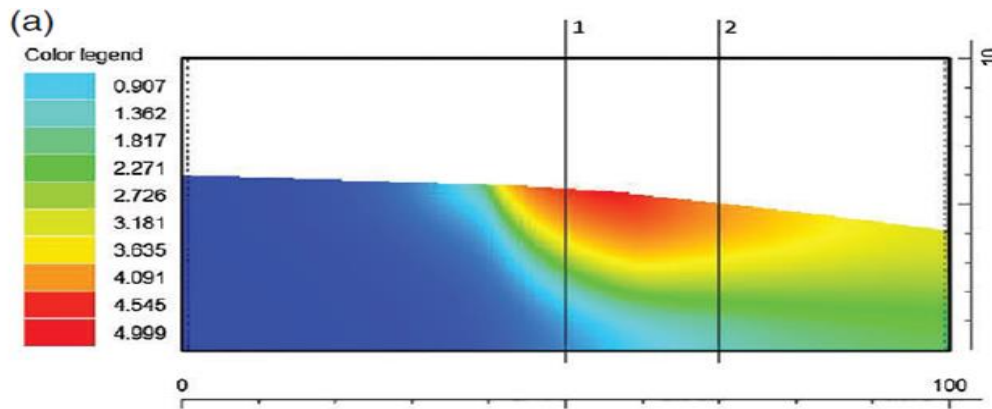


Figure 9. A schematic showing the flow and transport domain. Cases 1, 2, 3, and 4 indicate evaluated scenarios with different numbers of considered HPM profiles.

Przykład obliczeniowy

HYDRUS-1D + MODFLOW+MT3D



HYDRUS 2D (strefa aeracji i saturacji)

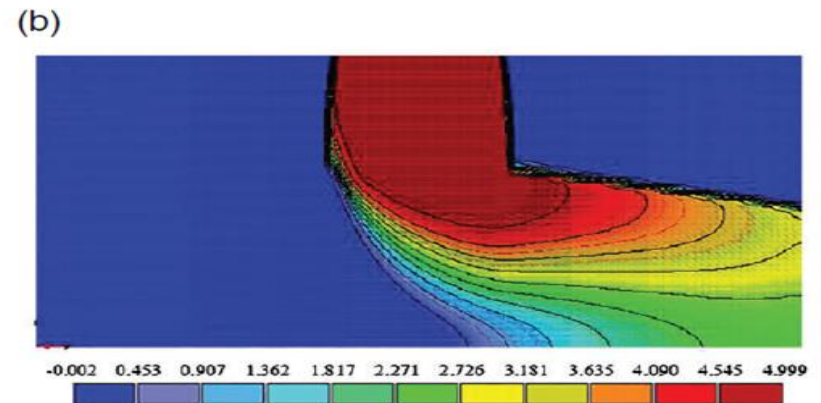
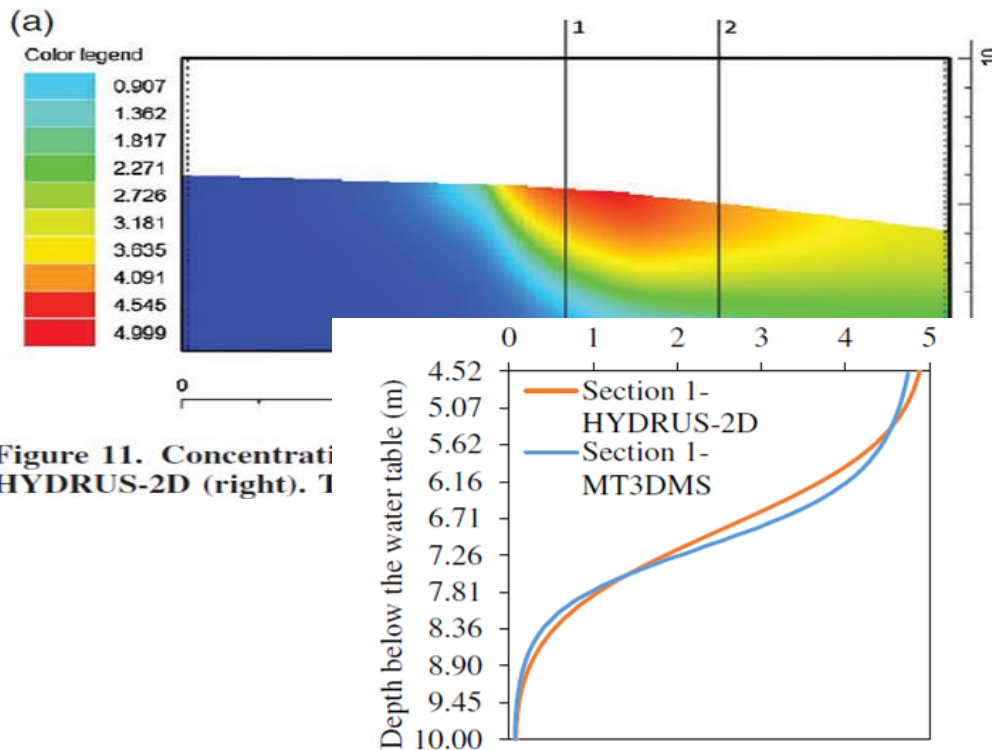


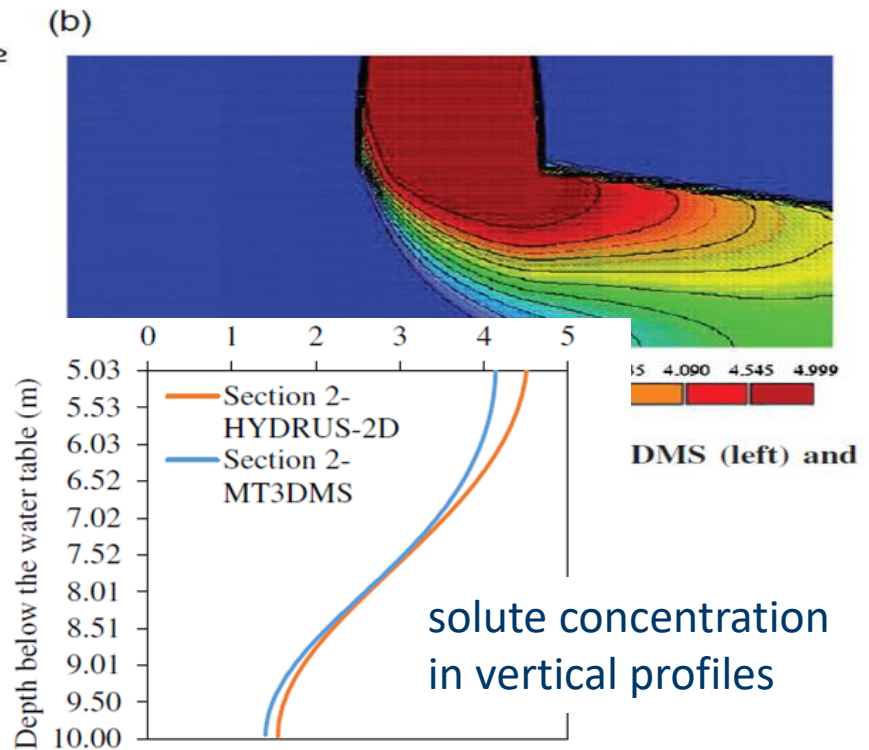
Figure 11. Concentration profiles in the transport domain at the end of the simulation obtained using MT3DMS (left) and HYDRUS-2D (right). Two vertical profiles (1 and 2) in the left figure are used in Figure 12.

Przykład obliczeniowy

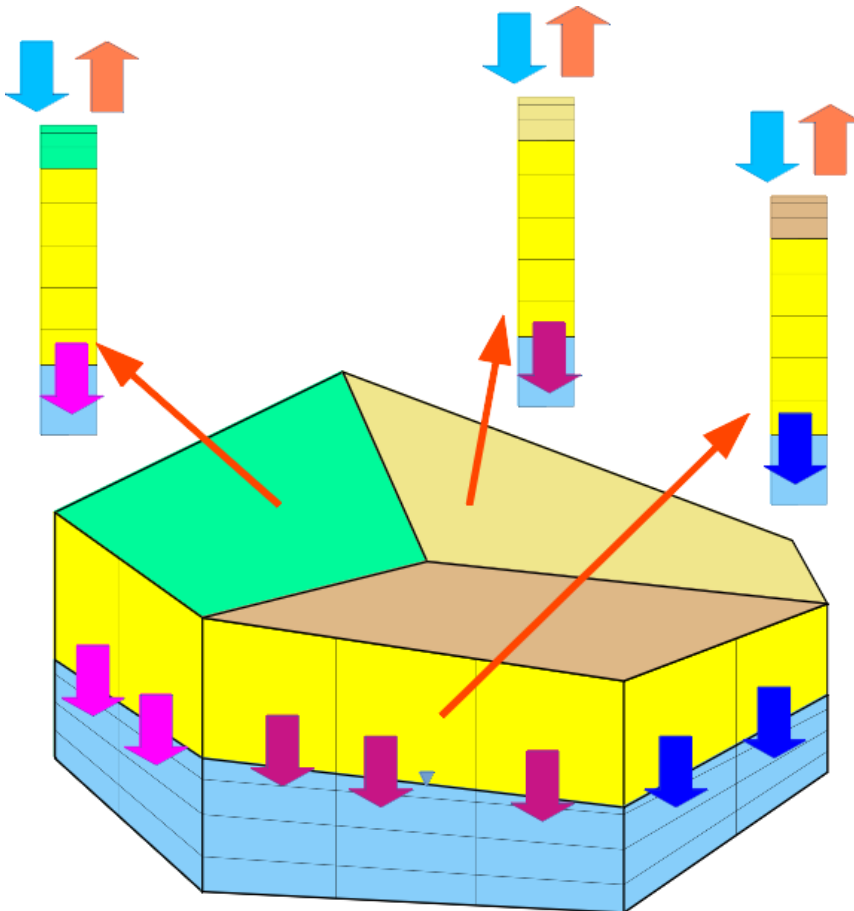
HYDRUS-1D + MODFLOW+MT3D



HYDRUS 2D (strefa aeracji i saturacji)

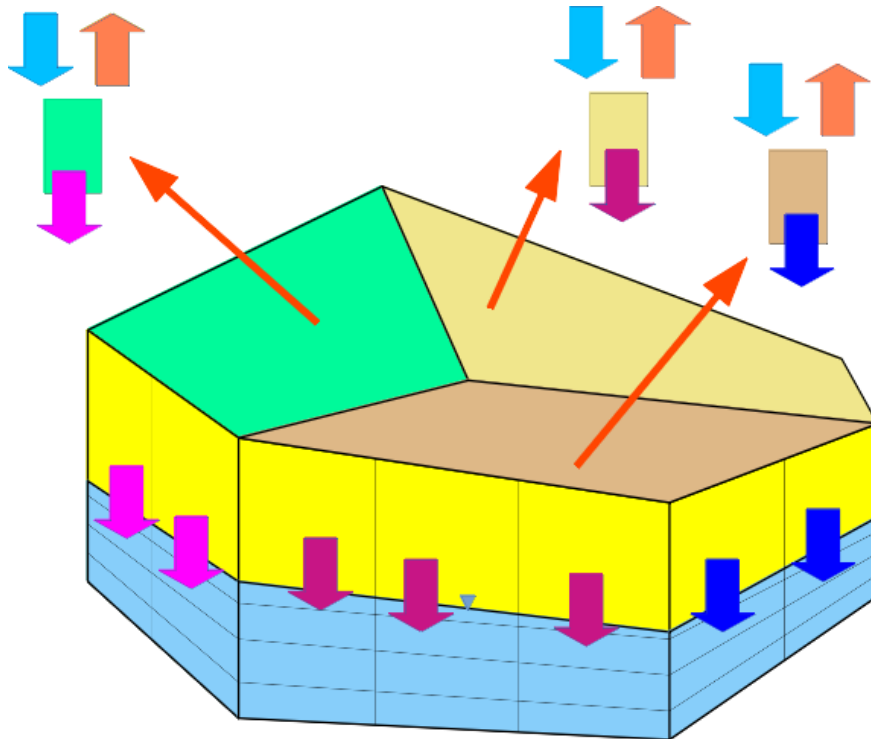


Ograniczenia



- czas obliczeń wielokrotnie dłuższy niż w przypadku typowego modelu ograniczonego do strefy saturacji
- konieczność zapewnienia zgodności położenia zwierciadła wody w modelu 3D i 1D
- problemy z rozwiązaniem numerycznym równań Richardsa 1D (nieliniowość, zmienność warunków brzegowych na powierzchni i na dole profilu)
- współczynnik odsączalności w strefie saturacji nie jest powiązany z warunkami w strefie aeracji

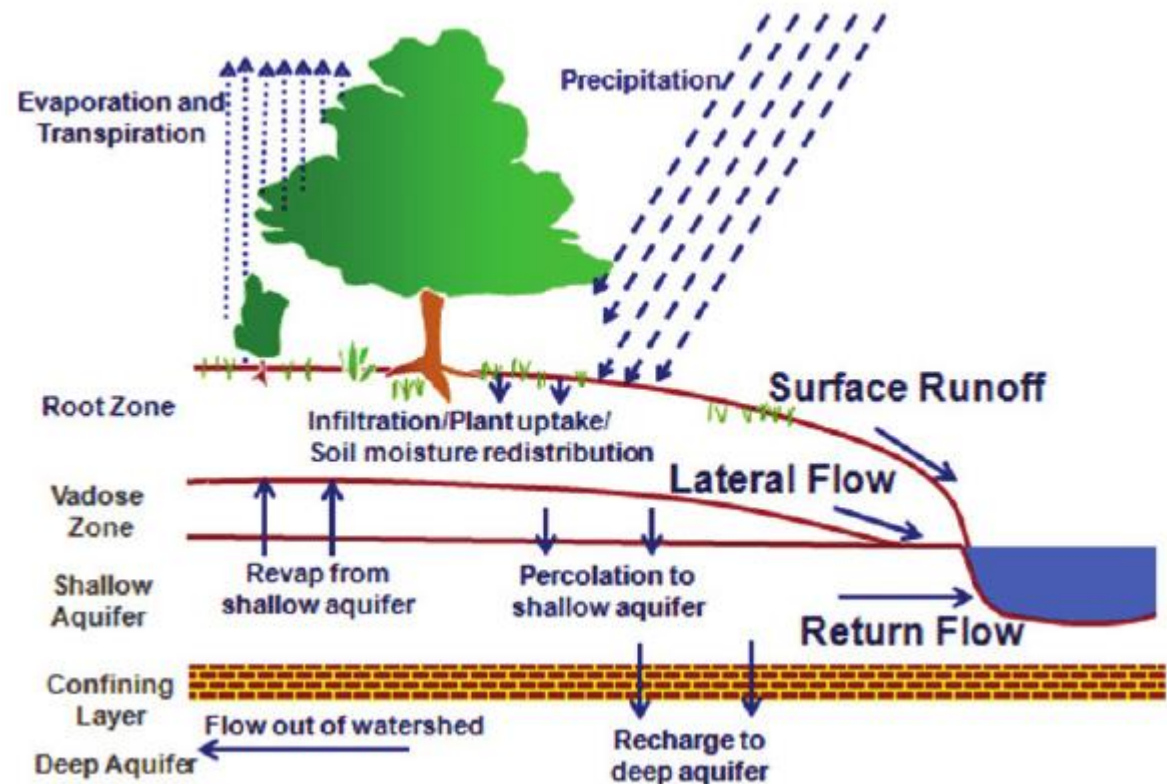
3D strefa saturacji + modele uproszczone



- w modelach uproszczonych zamiast równania Richardsa rozwiązywane są prostsze równania różniczkowe lub algebraiczne, co pozwala znacznie skrócić czas obliczeń
- niektóre modele zawierają bardzo szczegółowy opis oddziaływań gleba-roślina-atmosfera, co ma istotne znaczenie dla migracji biogenów i pestycydów
- przykłady programów:
 - HELP (EPA, Schroeder et al. 1994)
 - WETSPASS (Batelaan & De Smedt 2001)
 - SWAT (Neitsch et al. 2011)
 - MODFLOW UZF (Niswonger et al. 2006)

SWAT (Soil Water Assessment Tool)

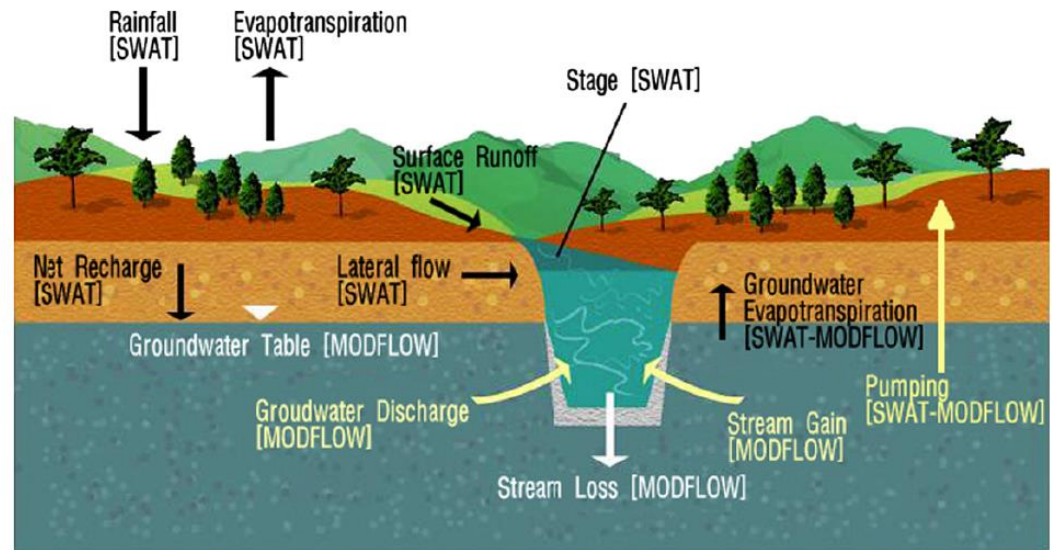
- kompleksowe modelowanie obiegu wody, biogenów i pestycydów, wzrostu roślin oraz erozji i akumulacji osadów w skali zlewni
- obliczenia z krokiem dobowym
- własny, uproszczony model przepływu podziemnego



Amatya et al. 2013

Integracja SWAT i MODFLOW

- zewnętrzna wymiana danych (Pulido-Velazquez et al. 2015)
 - programy uruchamiane oddzielnie
 - wartości zasilania i ładunki zanieczyszczeń obliczone programem SWAT zapisywane są do plików wejściowych programów MODFLOW i MT3D/RT3D
- połączony program SWAT/MODFLOW/RT3D (Kim et al. 2008, Bailey et al. 2016)
 - wewnętrzna wymiana danych
 - MODFLOW wykorzystuje informacje o położeniu zwierciadła wody ze SWAT





Projekt WaterPuck

- Zintegrowany serwis informacyjno-predykcyjny WaterPuck. Modelowanie wpływu gospodarstw rolnych i struktur użytkowania terenu zlewni na jakość wód lądowych i morskich. Projekt finansowany przez NCBiR w ramach programu Biostrateg III.
- Konsorcjum 5 instytucji, lider: Instytut Oceanologii PAN (L.Dzierzbicka-Głowacka)
- Udział PG to m.in. wykorzystanie programów SWAT i MODFLOW w celu oszacowania dopływu wody i zanieczyszczeń (biogeny, pestycydy) do Zatoki Puckiej od strony lądowej

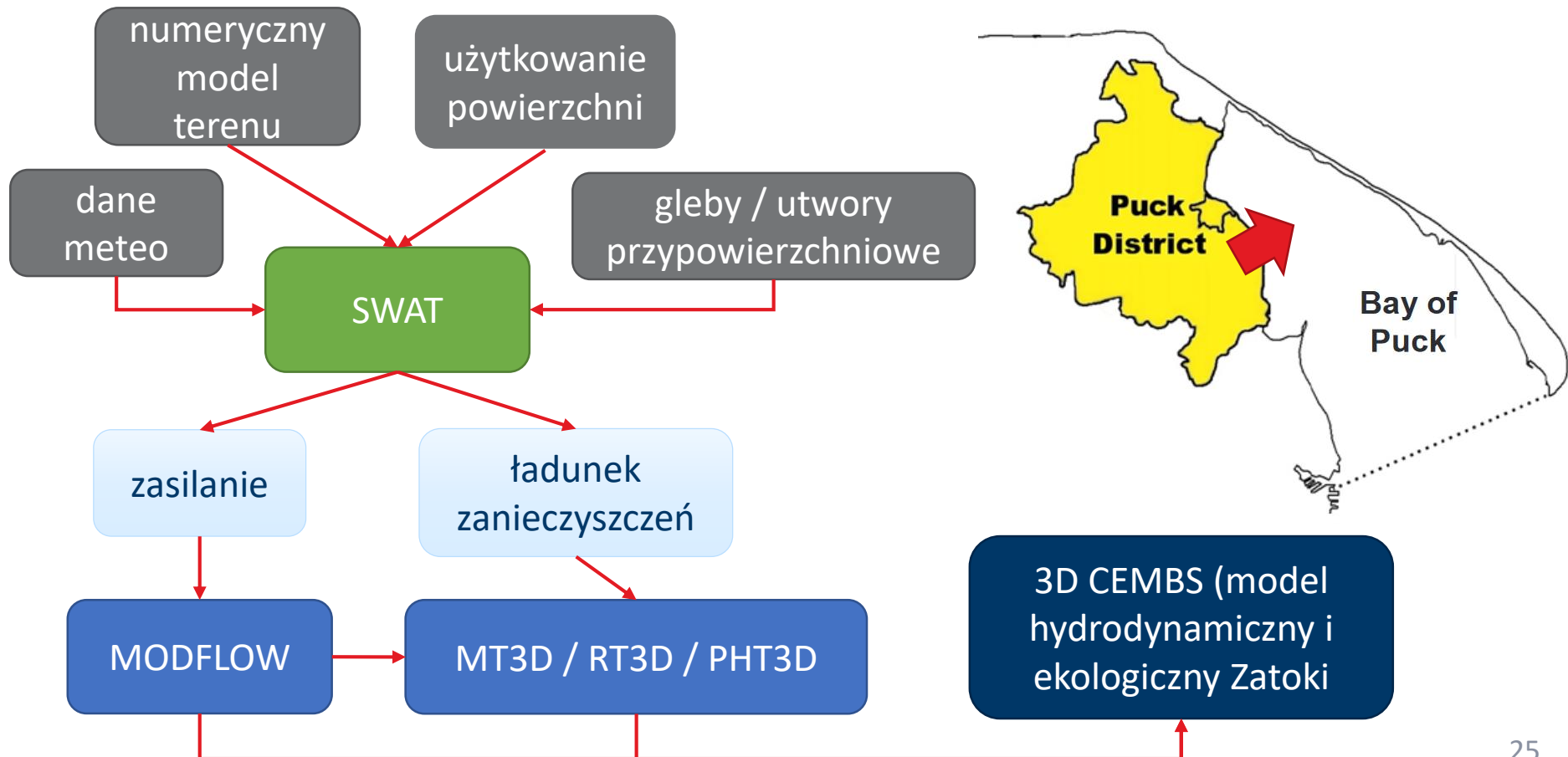


Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju





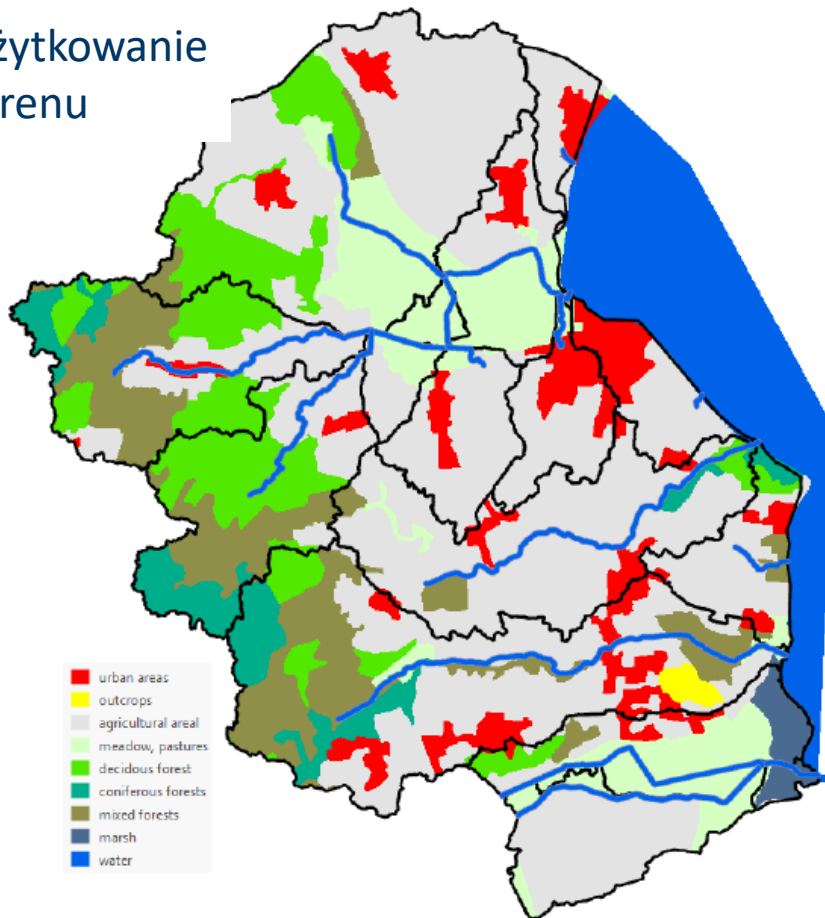
Projekt WaterPuck



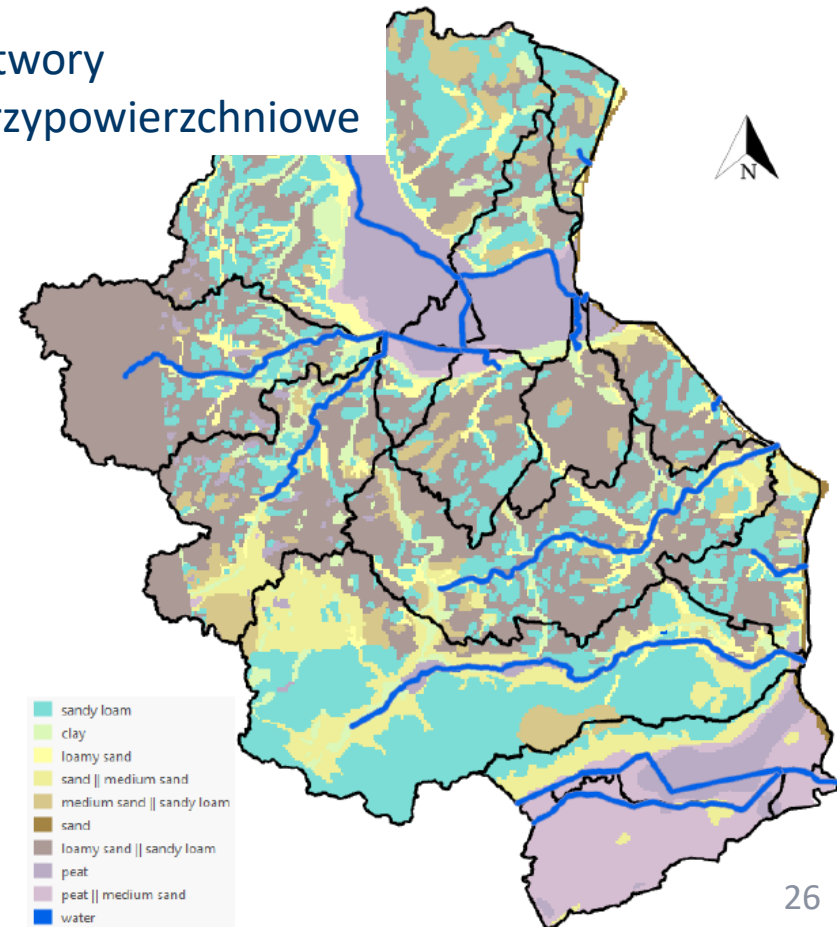


Projekt WaterPuck

Użytkowanie
terenu



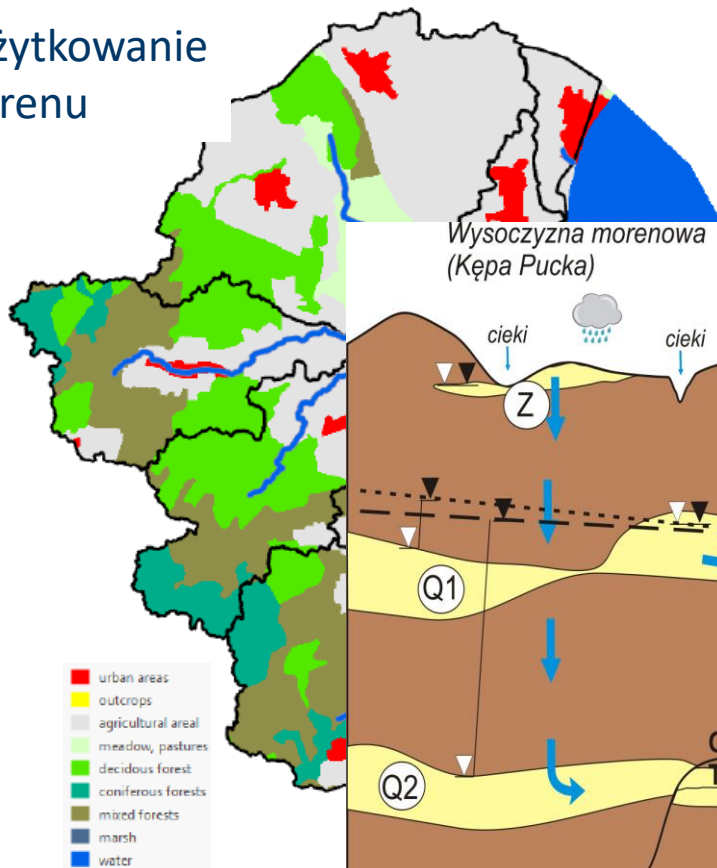
Utwory
przypowierzchniowe



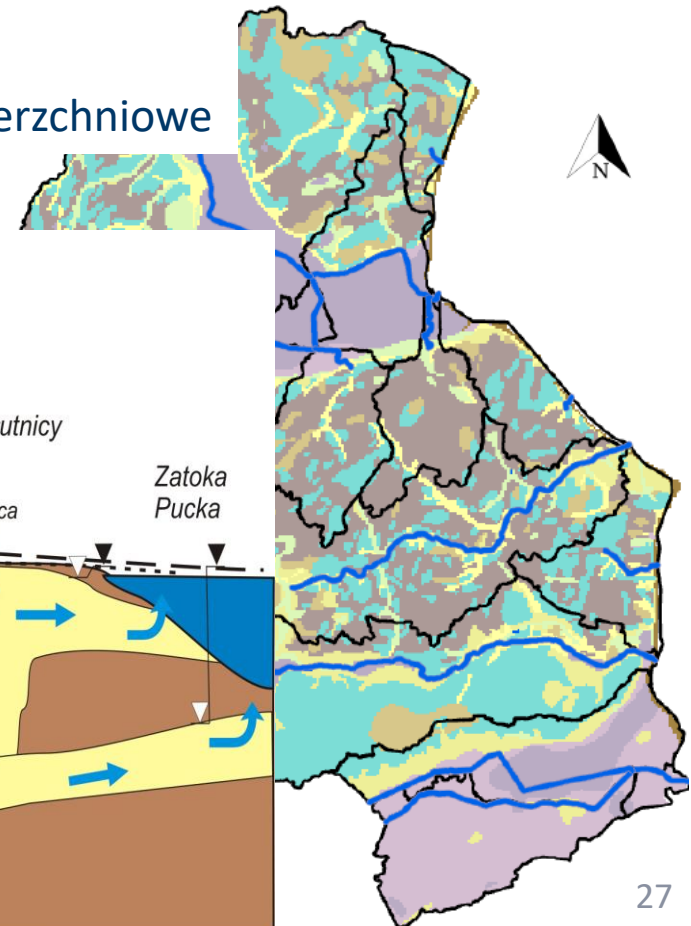


Projekt WaterPuck

Użytkowanie
terenu

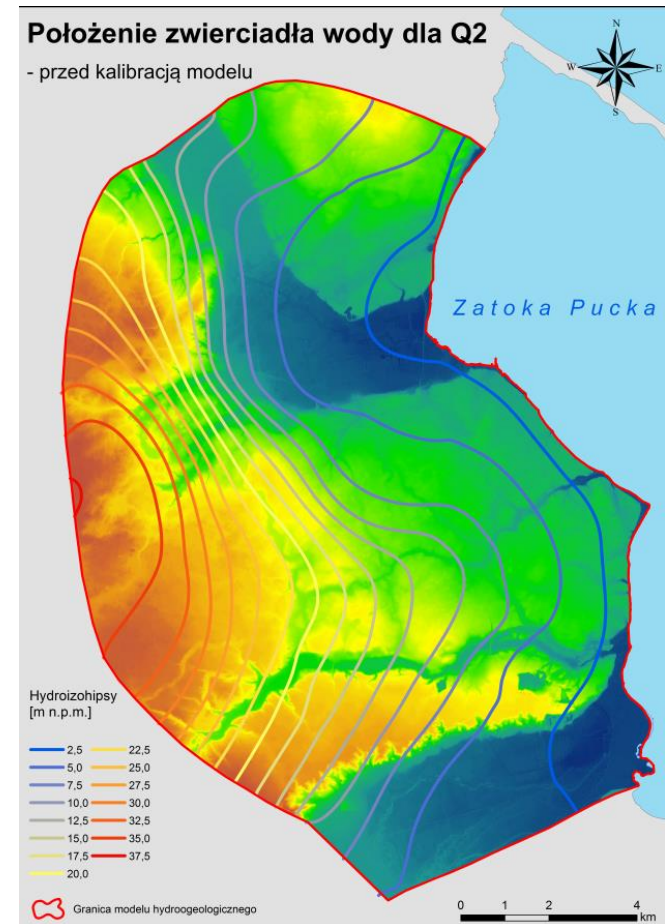
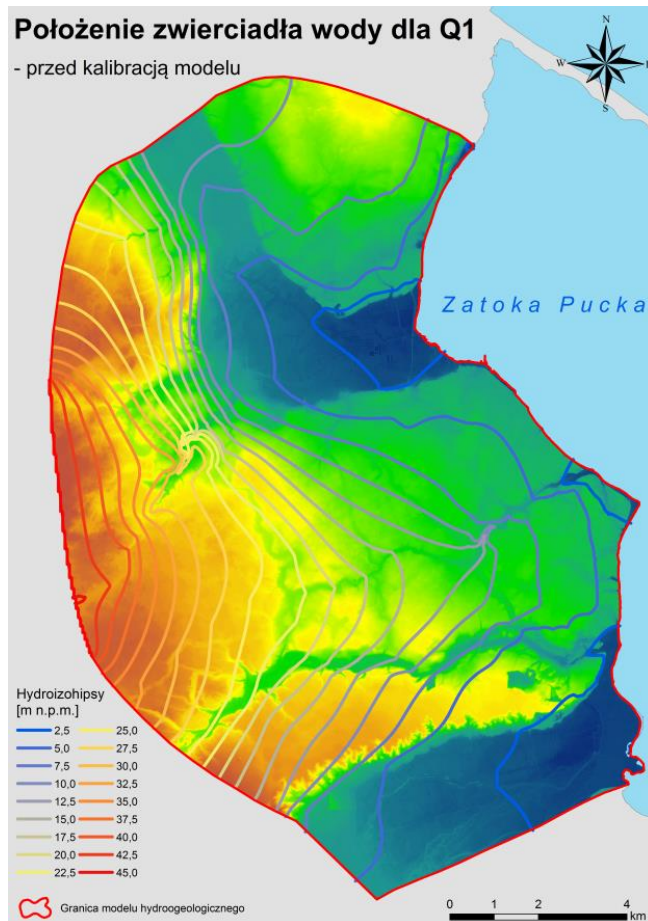


Utwory
przypowierzchniowe





Projekt WaterPuck





Ograniczenia

- bardzo duża liczba parametrów
 - skomplikowana kalibracja
 - wartości domyślne często nieprawidłowe
 - interpretacji fizyczna ??
- wymaga współpracy specjalistów z różnych dziedzin
- uproszczony opis zjawisk w „przejściowej” części strefy aeracji (czas przepływu)
- trudności w powiązaniu poziomu wody w ciekach w programach SWAT i MODFLOW



Wnioski

- kompleksowa ocena zagrożeń dla ilości i jakości zasobów wód podziemnych wymaga integracji modeli opisujących procesy zachodzące w strefach aeracji i saturacji
- dostępne są modele zintegrowane o różnym stopniu złożoności
- wybór modelu stanowi kompromis uwzględniający:
 - wymaganą dokładność opisu zjawisk w strefie aeracji
 - możliwość pozyskania danych do kalibracji i walidacji modelu
 - moc obliczeniową i czas obliczeń



Perspektywy

- zwiększone wykorzystanie modeli 3D (wzrost mocy obliczeniowej komputerów)
- zwiększone wykorzystanie GIS i teledetekcji
- powiązanie z innymi elementami cyklu hydrologicznego
 - spływ powierzchniowy
 - przepływ w ciekach i zbiornikach wodnych
- powiązanie z obiegiem innych substancji (węgiel, biogeny, energia)



**GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY**



**HISTORY IS WISDOM
FUTURE IS CHALLENGE**