

Andrzej Jucherski, Maria Nastawny, Andrzej Walczowski, Krzysztof Józwiakowski, Magdalena Gajewska

Badania przydatności alkalicznych materiałów filtracyjnych do usuwania fosforanów z biologicznie oczyszczonych ścieków bytowych

Fosfor jest pierwiastkiem mającym decydujący wpływ na produkcję pierwotną w ekosystemach wodnych i znacząco wpływa na stan troficzny wód powierzchniowych. Jednym ze źródeł związków fosforu w wodach powierzchniowych są ścieki bytowe powstające na obszarach wiejskich, gdzie powszechne zastosowanie znalazły przydomowe oczyszczalnie ścieków. Wartość ładunku fosforu zawartego w ściekach powstałych w 2012 r. na terenach o zabudowie rozproszonej oszacowano na 1,9 tys. tP/a [1]. W tym samym roku komunalne oczyszczalnie ścieków odprowadziły do środowiska 1,6 tys. ton związków fosforu [2]. Należy przy tym podkreślić, że na terenach wiejskich o zabudowie rozproszonej powszechnie stosuje się przydomowe oczyszczalnie ścieków, których odbiornikiem jest grunt. W tych warunkach związki fosforu są usuwane ze ścieków na drodze adsorpcji, zatrzymywania zawieszin w ośrodku porowatym lub wytrącania w postaci nierozpuszczalnych w wodzie form mineralnych, głównie apatytów. Gleba ma duże zdolności adsorpcyjne w stosunku do jonów fosforu, co stanowi skuteczną barierę ochronną przed ich migracją do wód podziemnych i powierzchniowych [3]. Ponieważ odbiornikami ścieków odprowadzanych z przydomowych oczyszczalni mogą być wody powierzchniowe, dlatego trzeba się liczyć z ich zagrożeniem eutrofizacją już przy obecności fosforanów w ilości $10 \text{ mgPO}_4^{3-}/\text{m}^3$ [4, 5].

Usuwanie związków fosforu ze ścieków w oczyszczalniach przydomowych można usprawnić przez zastosowanie procesu filtracji z wykorzystaniem materiałów o podwyższonej zdolności do zatrzymywania tych związków [6, 7]. Przeprowadzono liczne badania nad usuwaniem związków fosforu na takich materiałach naturalnych, jak apatyty [8], boksyty, dolomity, żwiry i lateryty [9], wapienie [10], margle i piaski [11, 12], skały wapienno-krzemionkowe (opoki) [13–16], torfy, łupki, gleby ilaste, zeolity i wollastonit, [17], a także na modyfikowanych materiałach naturalnych [14, 18] oraz przemysłowych produktach ubocznych [17].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych z użyciem trzech alkalicznych materiałów filtracyjnych, w celu określenia możliwości ich wykorzystania do usuwania ortofosforanów(V) z biologicznie oczyszczonych ścieków bytowych, z przeznaczeniem do zastosowania w trzecim stopniu oczyszczania ścieków w oczyszczalniach przydomowych.

Metody badań

Wartości wybranych parametrów fizycznych oraz skład pierwiastkowy użytych w badaniach materiałów (oznaczonych symbolami I, II i III) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka materiałów filtracyjnych
Table 1. Filtration material characteristics

| Parametr, jednostka | Materiał I | Materiał II | Materiał III |
|--|------------|-------------|--------------|
| parametry fizyczne | | | |
| Gęstość, kg/dm^3 | 2,30 | 1,80 | 2,12 |
| Gęstość nasypowa, kg/dm^3 | 0,87 | 1,04 | 0,78 |
| Porowatość, % | 37,3 | 21,0 | 33,9 |
| Nasiąkliwość, % | 20,5 | 12,9 | 19,4 |
| Wilgotność, % | 5,0 | 12,9 | 1,9 |
| Nierównomierność uziarnienia (d_{60}/d_{10}) | 2,57 | 3,12 | 2,35 |
| pH* | 8,35 | 12,7 | 9,38 |
| skład pierwiastkowy | | | |
| Krzem, % | 0,68 | 0,41 | 25,46 |
| Wapń, % | 21,13 | 49,61 | 15,47 |
| Glin, % | 0,46 | 0,10 | 2,96 |
| Żelazo, % | 8,78 | 0,10 | 1,58 |
| Magnez, % | 1,32 | 0,22 | 0,44 |
| Sód, % | 0,25 | 0,00 | 0,06 |
| Potas, % | 0,05 | 0,00 | 0,83 |
| Tytan, % | 1,68 | 0,01 | 0,22 |
| Siarka, % | 9,84 | 0,02 | 0,05 |
| Mangan, % | 0,54 | 0,04 | 0,01 |
| Wanad, % | 0,27 | 0,01 | 0,06 |
| Fosfor, % | 0,01 | 0,02 | 0,03 |

*po zmieszaniu tych samych objętości złoża i wody destylowanej

Dr hab. inż. A. Jucherski, mgr inż. M. Nastawny, inż. A. Walczowski: Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Górskie Centrum Badań i Wdrożeń w Tyliczu, ul. K. Pułaskiego 25a, 33-383 Tylicz

Dr hab. K. Józwiakowski: Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, ul. S. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
krzysztof.jozwiakowski@up.lublin.pl

Dr hab. M. Gajewska: Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Technologii Wody i Ścieków, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

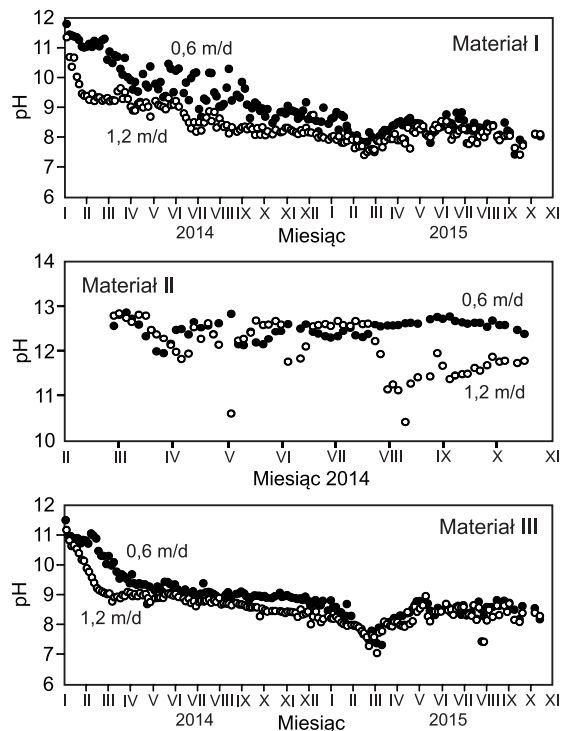
Materiał I miał skład zbliżony do fińskiego złoża filtracyjnego o nazwie handlowej TOP-16PR, materiał II to granulaty wapienne o składzie zbliżonym do produktu o nazwie firmowej Filtra P, natomiast materiał III to kalcynowany granulaty skały opoki o nazwie handlowej Polonite®. Wszystkie użyte w badaniach materiały mają silne właściwości alkalinizujące i z tego względu zatrzymywanie ortofosforanów(V) odbywa się głównie na drodze wytrącania nierozpuszczalnych w wodzie minerałów fosforowych, a także adsorpcji. Złoża te są wykorzystywane do wspomagania usuwania związków fosforu ze ścieków wstępnie oczyszczonych [7, 19].

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, w skład którego wchodziły trzy pary kolumn filtracyjnych o średnicy 0,2 m i wysokości 1,0 m, przy czym każda para kolumn była wypełniona materiałem (odpowiednio I, II i III) o objętości 20 dm³. Kolumny filtracyjne były zasilane ściekami od dołu za pomocą układu pompowego, przy czym średnia prędkość filtracji w przypadku pierwszej kolumny z danej pary wynosiła 0,6 m/d, a drugiej – 1,2 m/d. Do badań wykorzystano ścieki biologicznie oczyszczone w przydomowej oczyszczalni, w skład której wchodził osadnik i zraszane złożo biologiczne.

W ściekach dopływających i odpływających z kolumn filtracyjnych dwukrotnie w tygodniu oznaczano zawartość ortofosforanów(V), wykorzystując w tym celu testy do oznaczeń kolorymetrycznych oraz fotometr firmy Merck. W ściekach podawanych na złoża w poszczególnych kolumnach filtracyjnych utrzymywano zawartość ortofosforanów(V) w przedziale 5÷8 mgPO₄³⁻/dm³ dawkując roztwór dwuwodorooortofosforanu(V) potasu. W trakcie badań kontrolowano również wartości pH i temperatury ścieków pH-metrem firmy WTW. Badania skuteczności procesu filtracji z użyciem materiału II prowadzono przez 35 tygodni, natomiast w przypadku materiałów I i III przez 96 tygodni. W tym czasie wykonano analizy 173 próbek ścieków przed i po filtracji przez złoża I i III oraz 62 próbek ścieków po filtracji przez złożo II. Charakterystykę ścieków przed i po filtracji przez poszczególne materiały, wraz z analizą statystyczną wyników, przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki badań

Użyte do badań materiały wykazywały silne właściwości alkalinizujące, na skutek czego w kontakcie z oczyszczonymi ściekami w początkowym czasie prowadzenia badań dochodziło do zwiększenia wartości pH ścieków do około 12. W tych warunkach następowało wytrącanie nie tylko ortofosforanów(V), ale także węglanów, które pojawiły się w filtracie w postaci cząstek zawiesin mineralnych. Na rysunku 1 przedstawiono zmiany wartości pH ścieków po filtracji w czasie całego cyklu badań.



Rys. 1. Zmiana wartości pH ścieków po filtracji przez poszczególne materiały w zależności od prędkości filtracji
Fig. 1. Changes in sewage pH following filtration through different beds as a function of filtration rate

Tabela 2. Zmienność zawartości ortofosforanów(V) oraz wartości pH i temperatury ścieków w czasie badań
Table 2. Variability of orthophosphates(V) concentration, pH and temperature of sewage during experiments

| Parametr | Ścieki dopływające do kolumn filtracyjnych | Jakość ścieków oczyszczonych w kolumnach z materiałami I, II i III w zależności od prędkości filtracji | | | | | |
|--|--|--|----------|-------------|-----------|--------------|----------|
| | | materiał I | | materiał II | | materiał III | |
| | | 0,6 m/d | 1,2 m/d | 0,6 m/d | 1,2 m/d | 0,6 m/d | 1,2 m/d |
| ortofosforany(V), mgPO ₄ ³⁻ /dm ³ | | | | | | | |
| Zakres | 2,8÷9,9 | 0,0÷3,0 | 0,2÷7,3 | 0,0÷6,3 | 0,0÷6,0 | 0,0÷4,3 | 0,0÷6,1 |
| Średnia | 6,7 | 0,7 | 2,9 | 2,2 | 2,4 | 1,4 | 3,1 |
| Odchylenie standardowe | 1,5 | 0,6 | 2,0 | 1,7 | 1,7 | 1,2 | 1,7 |
| Współczynnik zmienności, % | 22,0 | 91,8 | 66,5 | 77,5 | 70,2 | 86,3 | 53,4 |
| pH | | | | | | | |
| Zakres | 6,7÷7,8 | 7,5÷12,5 | 7,4÷11,9 | 12,0÷12,9 | 10,4÷12,9 | 7,3÷11,8 | 7,1÷12,1 |
| temperatura, °C | | | | | | | |
| Zakres | 2,5÷19,4 | 2,4÷20,8 | 2,7÷21,0 | 7,7÷20,1 | 7,7÷20,2 | 2,3÷21,1 | 2,1÷21,2 |
| Średnia | 10,7 | 11,5 | 11,5 | 14,3 | 14,2 | 11,5 | 11,5 |
| Odchylenie standardowe | 4,3 | 4,7 | 4,7 | 3,5 | 3,5 | 4,7 | 4,7 |
| Współczynnik zmienności, % | 40,5 | 40,9 | 41,0 | 24,6 | 24,8 | 40,8 | 40,9 |

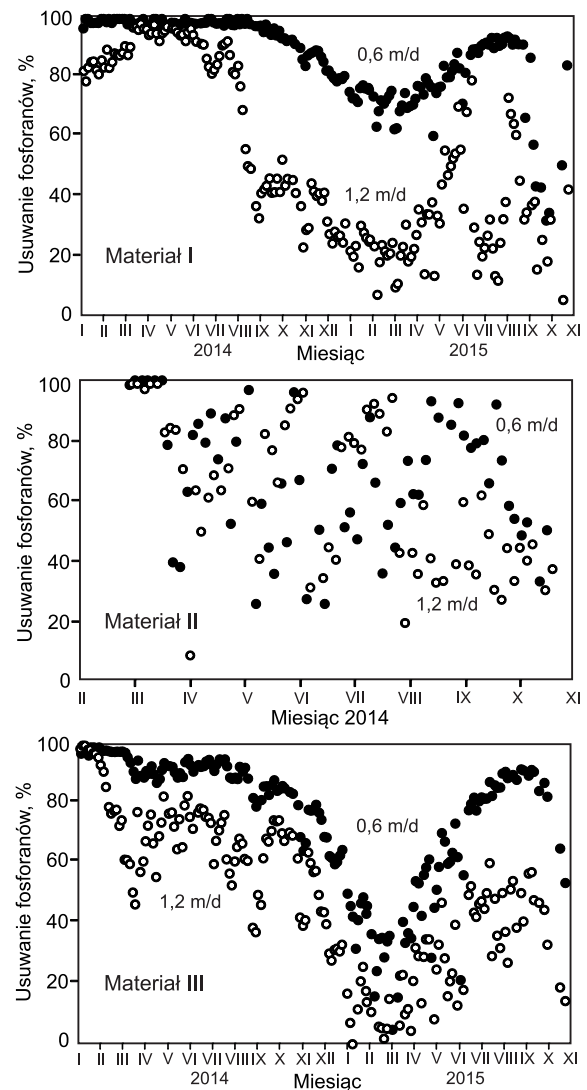
W początkowym czasie badań we wszystkich kolumnach stwierdzano występowanie zjawiska okresowego (zróżnicowanego) zmniejszania się przewodności hydraulicznej poszczególnych złożeń, skutkiem czego było kilkukrotne przepełnienie naczyń dawujących ścieki do tych kolumn, zwłaszcza złożeń z materiałem II. Przyczyną tego zjawiska było wypłukiwanie z wypełnienia złożeń rozdrobnionych cząstek materiału wraz ze związanymi z nimi związkami fosforu, co skutkowało nierównomierną zawartością fosforanów w ściekach odpływających z kolumn, a szczególnie wypełnionych materiałem II (granulat wapienny). W tym przypadku długotrwała alkalizacja ścieków była przyczyną wykrystalizowania grubej warstwy osadów na ściankach rur odpływowych, co spowodowało konieczność wyłączenia pary kolumn wypełnionych tym materiałem z eksploatacji już po 35 tygodniach od rozpoczęcia badań. Przeprowadzone doświadczenie wykazało, że zastosowanie silnie alkalizujących materiałów prowadzi do wytrącania węglanów oraz apatytów, co w warunkach lokalnych oczyszczalni ścieków może prowadzić do cementacji złożeń filtracyjnych.

Na rysunku 2 przedstawiono sprawność usuwania ortofosforanów(V) w czasie filtracji przez badane materiały, stwierdzając w przypadku materiału II tendencję do szybkiego zmniejszania skuteczności procesu w miarę narastania zjawiska strukturalnej dekompozycji i kolmatacji tego złoża. W dłuższym czasie badań materiałów I i III stwierdzono charakterystyczny wpływ zarówno temperatury ścieków, jak i prędkości filtracji na sprawność usuwania ortofosforanów(V). Szczególnie w miesiącach zimowych, gdy temperatura ścieków mieściła się w przedziale 4÷7°C, skuteczność usuwania ortofosforanów(V) zmniejszyła się w przypadku materiału I i prędkości filtracji 0,6 m/d do 70%, natomiast w przypadku materiału III – do około 15%, przy prawie 100% sprawności osiągniętej na początku badań. Przy prędkości filtracji 1,2 m/d spadek sprawności usuwania ortofosforanów(V) ze ścieków w warunkach zimowych miał charakter podobny w przypadku obu badanych złożeń filtracyjnych.

Stwierdzone w badaniach zmiany sprawności oczyszczania ścieków wykazały dodatnią korelację pomiędzy usuwaniem ortofosforanów(V) a wartością pH ścieków (rys. 3). Zmniejszenie wartości pH ścieków do 8÷9 spowodowało ograniczenie skuteczności usuwania ortofosforanów(V) na materiałach I i III do około 70%. Ostatecznie – przy pH=7,5 – skuteczność usuwania ortofosforanów(V) przez materiał I wynosiła około 65% przy prędkości filtracji 0,6 m/d oraz 25% przy prędkości filtracji 1,2 m/d. W przypadku materiału III wskaźniki te wyniosły odpowiednio 45% i 40%. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że w warunkach silnej alkalizacji ścieków wywołanej przez materiały wypełniające złoża filtracyjne, dominującym procesem usuwania ortofosforanów(V) było chemiczne strącanie związków fosforu na powierzchni ziaren złożeń filtracyjnych.

Dyskusja wyników

Jednym z podstawowych celów badań kolumnowych był wybór takiego reaktywnego materiału, który zastosowany w procesie filtracji ścieków umożliwi usunięcie związków fosforu w stopniu spełniającym kryteria jakości ścieków ustalone w przedmiotowych rozporządzeniach. Średnia skuteczność usuwania ortofosforanów(V) przez materiał I w całym czasie badań, przy prędkości filtracji



Rys. 2. Skuteczność usuwania ortofosforanów(V) ze ścieków podczas filtracji przez poszczególne materiały w zależności od prędkości filtracji

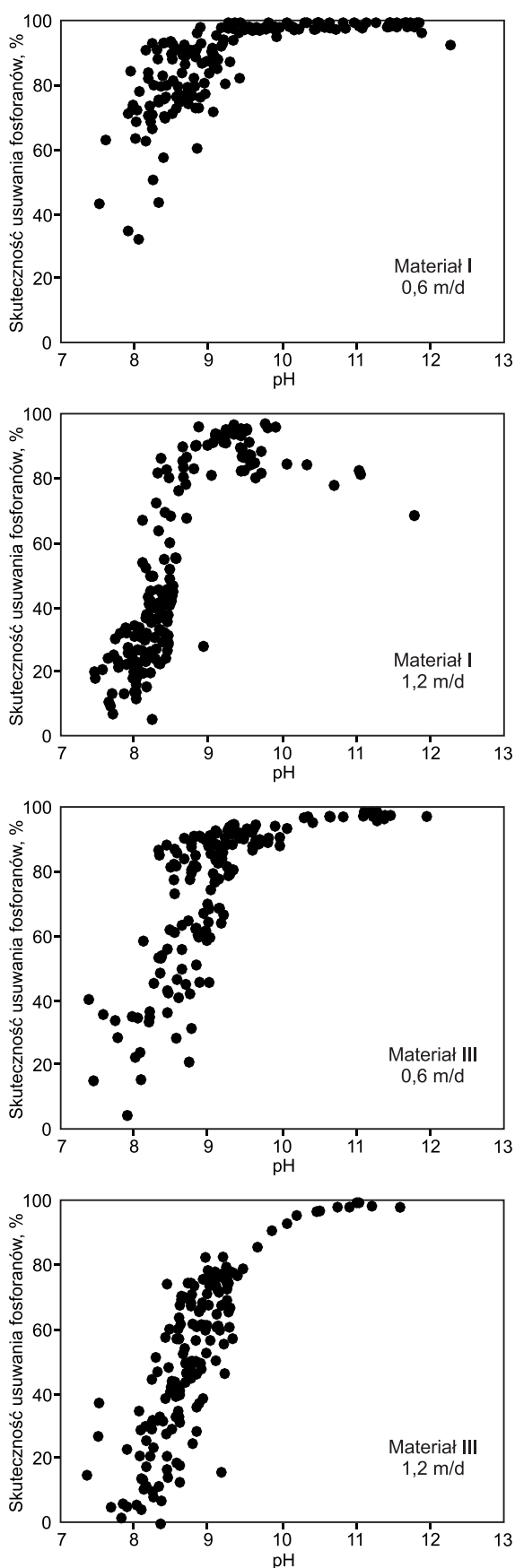
Fig. 2. Orthophosphates(V) removal efficacy from sewage by filtration through different beds as a function of filtration rate

wynoszącej 0,6 m/d i 1,2 m/d, osiągnęła odpowiednio 89,3% i 55,2%, a przez materiał III – 76,2% i 50,4%. W porównaniu z tymi wynikami, materiały filtracyjne badane w testach kolumnowych przez innych autorów miały następującą skuteczność:

– Polonite®: 96,7% na początku eksperymentu oraz 89% po 92 tygodniach badań, przy zmniejszeniu wartości pH ścieków oczyszczonych z 11,7 do 9,5 [20, 21],

– Filtra P: średnio 98,2%, przy zmniejszeniu wartości pH ścieków oczyszczonych z 12,9 do 11,6 [20, 21].

Na podstawie wyników badań zaprezentowanych w tej pracy można stwierdzić, że materiał II nie nadaje się do bezpośredniego zastosowania w procesie filtracji ze względu na wypłukiwanie reaktywnych składników złoża i wytrącanie związków fosforu powodujących nieodwracalną kolmatację instalacji badawczej. Z podobnym problemem kolmatacji złoża filtracyjnego spotkali się autorzy pracy [20], którzy badając materiał Filtra P stwierdzili zakolmatowanie filtru po 35 tygodniach trwania testów. Autorzy niniejszej pracy występowanie zjawiska nieodwracalnej kolmatacji materiału II stwierdzili po podobnym czasie i z tego względu wykluczyli go z dalszych badań. Podczas badań



Rys. 3. Korelacja skuteczności usuwania ortofosforanów(V) i wartości pH ścieków po filtracji przez materiały I i III w zależności od prędkości filtracji

Fig. 3. Correlation between orthophosphates(V) removal efficacy and sewage pH following filtration through materials I and III as a function of filtration rate

materiałów I i III stwierdzono charakterystyczną cykliczną zmienność skuteczności usuwania ortofosforanów(V) ze ścieków, z jej gwałtownym zmniejszeniem w miesiącach zimowych i wczesnowiosennych w pierwszym roku badań oraz z jej ponownym wzrostem w miesiącach letnich w drugim roku badań. Wynikało to prawdopodobnie z oddziaływania temperatury właściwej w tych porach roku na szybkość reakcji chemicznych, co skutkowało zmienną skutecznością usuwania ortofosforanów(V) ze ścieków.

W instalacjach ze złożami filtracyjnymi do usuwania fosforu ze ścieków, eksploatowanych w pełnej skali technicznej, istotne jest określenie czasu lub momentu, w którym należy wymienić materiał filtracyjny, co można ustalić na podstawie wartości pH ścieków oczyszczonych [20, 22]. W przypadku materiałów I i III silnie zasadowe środowisko złoża ($\text{pH} > 9$) skutkowało wysoką skutecznością ($> 80\%$) usuwania ortofosforanów(V), natomiast poniżej tej wartości pH sprawność procesu malała. Podobną tendencję zaobserwowali autorzy w innej pracy własnej [15], w której zastosowano filtry wypełnione skałą węglanowo-krzemionkową (opoką) o różnym uziarnieniu.

Badania wykazały, że aby utrzymać odpowiednio wysoką sprawność oczyszczania ścieków ze związków fosforu (powyżej rekomendowanej przez HELCOM w wysokości 70%) [23]) należy wymienić materiał filtracyjny, gdy wartość pH oczyszczonych ścieków będzie wynosiła $< 8,5$. W przypadku materiału Polonite® zaleca się wymianę materiału przy $\text{pH} < 9$ [24, 25], co zapewnia około 90% skuteczność usuwania związków fosforu ze ścieków. Potwierdzają to wyniki badań autorów niniejszej pracy, dotyczące podobnego materiału.

Częstość wymiany materiału filtracyjnego może być również określona na podstawie przewidywanego obciążenia hydraulicznego instalacji wyposażonej w reaktywne złoża filtracyjne. W celu utrzymania zawartości fosforu w ściekach poniżej $5,0 \text{ mg/dm}^3$ (zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2014 r. [26]), materiał I przy prędkości filtracji $1,2 \text{ m/d}$ powinno się wymienić po upływie około 300 d, a materiał III po około 350 d eksploatacji, przy czym przy prędkości filtracji $0,6 \text{ m/d}$ materiał I zachował swoje właściwości przez prawie 640 d. Możliwości materiału III w tych warunkach mogą być znacznie większe, lecz nie zostały określone, ponieważ jakość ścieków oczyszczonych przez cały czas prowadzenia badań była zawsze lepsza od przyjętej wartości granicznej. Obliczono, że aby przy prędkości filtracji $1,2 \text{ m/d}$ utrzymać zawartość fosforu w ściekach poniżej $5,0 \text{ mgP/dm}^3$, wymagane zapotrzebowanie na materiał I w odniesieniu do objętości oczyszczanych ścieków wynosiło $1,65 \text{ kg/m}^3$, a w przypadku materiału III – $1,20 \text{ kg/m}^3$. Przy prędkości filtracji równej $0,6 \text{ m/d}$ wartość ta w przypadku materiału I wynosiła $1,5 \text{ kg/m}^3$, natomiast w przypadku materiału III wartości tej nie określono z powodów opisanych wcześniej.

Przy bardziej restrykcyjnych wymaganiach, ograniczających zawartość fosforu w ściekach oczyszczonych do $1,0 \text{ mgP/dm}^3$ [25], obliczone zapotrzebowanie na materiały I i III przy prędkości filtracji $0,6 \text{ m/d}$ wynosiło odpowiednio $2,97 \text{ kg/m}^3$ i $2,99 \text{ kg/m}^3$. Stosując prędkość filtracji $1,2 \text{ m/d}$ należy się liczyć z koniecznością użycia ponad 2-krotnie większej ilości materiałów reaktywnych. Według autorów badań opisanych w pracach [21, 27], aby usunąć fosfor ze ścieków do wartości $1,0 \text{ mgP/dm}^3$, zapotrzebowanie na materiał Polonite® należy przyjąć w ilości $1,2 \text{ kg/m}^3$, natomiast w przypadku materiału Filtra P wartość ta wynosi $2,5 \text{ kg/m}^3$.

Wnioski

◆ Usuwanie ortofosforanów(V) ze ścieków biologicznie oczyszczonych w procesie filtracji przez materiały silnie alkaliczne odbywa się na drodze wytrącania nierozpuszczalnych apatytów oraz węglanu wapnia na powierzchni ziaren wypełnienia.

◆ Przy wyborze mineralnych składników złóż należy unikać materiałów o dużej zawartości wapnia (materiał II), gdyż skutkuje to silnym wzrostem pH ścieków i tworzeniem się produktów chemicznego strącania w postaci osadów blokujących przestrzenie międzyziarnowe, co prowadzi do cementacji i ostatecznej utraty cech funkcjonalnych złóż filtracyjnych.

◆ Skuteczność usuwania związków fosforu na złożach alkalicznych, uzyskana w przypadku materiałów I i III, była znacząco większa przy prędkości filtracji 0,6 m/d niż przy prędkości 1,2 m/d. Można przyjąć, że odpowiednie obciążenie hydrauliczne złóż filtracyjnych powinno zapewnić stabilną wysoką sprawność procesu usuwania fosforu w znacznie dłuższym czasie niż przyjęty w przeprowadzonych badaniach.

◆ Alkaliczne złoża filtracyjne mogą być stosowane do wspomagania procesów usuwania ze ścieków ortofosforanów(V), jako końcowy element technologicznego wyposażenia przydomowych oczyszczalni ścieków (trzeci stopień oczyszczania ścieków) pod warunkiem, że podczas kontaktu ścieków z takim złożem wartość pH ścieków oczyszczonych nie przekroczy 8,5.

LITERATURA

1. W. JAROSIŃSKI: Ocena możliwości i warunków osiągnięcia celów redukcyjnych HELCOM dla azotu i fosforu. II Bałtycki Okrągły Stół, 13 maja 2014r., IMGW, Warszawa 2014.
2. A. JAGUSIEWICZ, L. DYGAŚ-CIOŁKOWSKA: Przyczyny eutrofizacji Morza Bałtyckiego na podstawie danych Państwowego Monitoringu Środowiska. GIOŚ, Warszawa 2014.
3. Z. BROGOWSKI, W. KWASOWSKI: Sorpcja fosforanów przez część mineralną i organiczną gleby. *Roczniki Gleboznawcze* 2009, t. 60, nr 1, ss. 12–21.
4. V. SMIL: Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual review of energy and the environment* 2000, Vol. 25, No. 1, pp. 53–88.
5. A. N. SHARPLEY, T. DANIEL, T. SIMS, J. LEMUNYON, R. STEVENS, R. PARRY: Agricultural phosphorus and eutrophication, 2nd ed. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington 2003.
6. L. JOHANSSON WESTHOLM: Substrates for phosphorus removal – potential benefits for on-site wastewater treatment? *Water Research* 2006, Vol. 40, No. 1, pp. 23–36.
7. C. VOHLA, M. KÖIV, H. J. BAVOR, F. CHAZARENC, Ü. MANDER: Filter material for phosphorous removal from wastewater in treatment wetlands – a review. *Ecological Engineering* 2011, Vol. 37, No. 1, pp. 70–89.
8. P. MOLLE, A. LIÉNARD, A. GRASMICK, A. IWEMA, A. KABBABI: Apatite as an interesting seed to remove phosphorus from wastewater in constructed wetlands. *Water Science and Technology* 2005, Vol. 51, No. 9, pp. 193–203.
9. L. ZHANG, S. HONGB, J. HEB, F. GANB, Y. HOC: Adsorption characteristic studies of phosphorus onto laterite. *Desalination and Water Treatment* 2011, Vol. 25, No. 1–3, pp. 98–105.
10. A. KARCZMARCZYK, A. BUS: Testing of reactive materials for phosphorus removal from water and wastewater – comparative study. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation* 2014, Vol. 46, No. 1, pp. 57–67.
11. M. del BUBBA, C. A. ARIAS, H. BRIX: Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm. *Water Research* 2003, Vol. 37, No. 14, pp. 3390–3400.
12. D. XU, J. XU, J. WU, A. MUHAMMAD: Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems. *Chemosphere* 2006, Vol. 63, No. 2, pp. 344–352.
13. V. CUCARELLA, T. ZALESKI, R. MAZUREK: Phosphorus sorption capacity of different types of opoka. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation* 2007, Vol. 38, pp. 11–18.
14. Z. BROGOWSKI, G. RENMAN: Characterization of opoka as a basis for its use in wastewater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies* 2004, Vol. 13, No. 1, pp. 15–20.
15. K. JÓZWIAKOWSKI, M. GAJEWSKA, A. PYTKA, M. MARZEC, M. GIZIŃSKA-GÓRNA, A. JUCHERSKI, A. WALCZOWSKI, M. NASTAWNY, A. KAMIŃSKA, S. BARAN: Influence of the particle size of carbonate-siliceous rock on the efficiency of phosphorous removal from domestic wastewater. *Ecological Engineering* 2017, Vol. 98, pp. 290–296.
16. M. NASTAWNY, A. JUCHERSKI, A. WALCZOWSKI, K. JÓZWIAKOWSKI, A. PYTKA, M. GIZIŃSKA-GÓRNA, M. MARZEC, M. GAJEWSKA, A. MARCZUK, J. ZARAJCZYK: Wstępna ocena przydatności wybranych adsorbentów mineralnych do usuwania fosforu ze ścieków bytowych. *Przemysł Chemiczny* 2015, nr 10, ss. 1762–1766.
17. K. SAKADEVAN, H. J. BAVOR: Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research* 1998, Vol. 32, No. 2, pp. 393–399.
18. M. E. KVARNSTRÖM, C. A. L. MOREL, T. KROGSTAD: Plant-availability of phosphorus in filter substrates derived from small-scale wastewater treatment systems. *Ecological Engineering* 2004, Vol. 22, No. 1, pp. 1–15.
19. I. HERRMANN: Filter beds for on-site wastewater treatment. Towards more reliable estimations of phosphorus retention. Doctoral Thesis. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Sweden, Luleå 2014.
20. J. P. GUSTAFSSON, A. RENMAN, G. RENMAN, K. POLL: Phosphate removal by mineral-based sorbents used in filters for small-scale wastewater treatment. *Water Research* 2008, Vol. 42, No. 1, pp. 189–197.
21. A. RENMAN, G. RENMAN: Long-term phosphate removal by the calcium-silicate material Polonite in wastewater filtration systems. *Chemosphere* 2010, Vol. 79, pp. 659–664.
22. A. N. SHILTON, I. ELMETRI, A. DRIZO, S. PRATT, R. G. HAVERKAMP, S. C. BILBY: Phosphorus removal by an 'active' slag filter – a decade of full scale experience. *Water Research* 2006, Vol. 40, No. 1, pp. 113–118.
23. HELCOM Recommendation 28E/6. Adopted 15 November 2007. On-site wastewater treatment of single family homes, small businesses and settlements up to 300 Person Equivalents (P.E.).
24. Polonite Information (www.avloppscenter.se/shop/11994/art2/25924702-145faf-Polonite_info.pdf).
25. C. LARSSON: Fosforfallor i Trollhättans kommun. En undersökning av endskilda avloppsanläggningar med fosforafälla. Rapport 2015 (www.avloppscenter.se/shop/11994/art86/34969686-a45b51-undersokning-av-enskilda-avloppsanlagningar-med-fosforfalla-i-trollhattans-kommun.pdf).
26. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 18 listopada 2014r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. *Dziennik Ustaw RP* 2014, poz. 1800.
27. A. HEISTAD, A. M. PARUCH, L. VRÅLE, K. ÁDÁM, P. D. JENSSEN: A high performance compact filter system treating domestic wastewater. *Ecological Engineering* 2006, Vol. 28, No. 4, pp. 374–379.

Jucherski, A., Nastawny, M., Walczowski, A., Jozwiakowski, K., Gajewska, M. Suitability Studies of Alkaline Filtration Materials for Phosphates Removal from Biologically Treated Domestic Sewage. *Ochrona Srodowiska* 2017, Vol. 39, No. 1, pp. 33–38.

Abstract: Three different alkaline filtration materials were selected for orthophosphates(V) removal from biologically treated domestic sewage. As early as 35 weeks after starting filter operation one of the materials with typical granular limestone characteristics (calcium content of about 50%) was excluded from the test due to high bed clogging that inhibited its further exploitation. Tests of the two other materials with substantially

lower calcium content continued uninterrupted throughout the 96-week research period. An average efficacy of phosphates removal for both materials was 80–90% at filtration rate of 0.6m/d and 50–55% – at the rate of 1.2m/d. Phosphates removal from sewage with the alkaline filter beds resulted from chemical precipitation of apatite deposits on the surface of filter material grains. However, such filtration materials could be applied to removal of phosphates (e.g. in household sewage treatment systems) provided that the sewage pH in the filter effluent did not exceed 8.5.

Keywords: Domestic sewage, sewage treatment, filtration, alkaline bed, phosphorus removal, precipitation.