

STUDY ON THE OPPORTUNITIES OF USING PHYTOREMEDIATION TO TREAT LEACHATE FROM MUNICIPAL LANDFILLS

STUDIU ASUPRA OPORTUNITĂȚILOR DE TRATARE A LEVIGATULUI PROVENIT DE LA DEPOZITELE DE DEȘEURI MUNICIPALE PRIN FITOREMEDIERE

Melania-Nicoleta BOROȘ*, Dan-Vlad JAȘCĂU, Valer MICLE

Technical University of Cluj-Napoca, Faculty of Materials and Environmental Engineering, Department Environmental Engineering and Sustainable Development Entrepreneurship, 103-105 Muncii Ave, Cluj-Napoca, Romania

Abstract: The leachate that is generated by the municipal waste landfills is known worldwide as a polluting factor. Inexistent or poor leachate management leads to changes in ecological balance in the surrounding areas of landfills. The problem of surface water, groundwater or soil pollution because of the leakage of leachate requires treatment solutions and an efficient management of leachate. One of the methods is the landfill leachate treatment using phytoremediation. This study analyzes the applications of phytoremediation in treating the leachate generated by domestic municipal landfill.

Keywords: leachate treatment, pollution, phytoremediation, waste dumps.

Rezumat: Levigatul generat din depozitele de deșeuri menajere municipale este un factor poluant recunoscut pe plan mondial. Gestiunea precară sau inexistentă a levigatului conduce la modificarea echilibrului ecologic din zonele limitrofe depozitelor de deșeuri. Problematika poluării apelor de suprafață, subterane sau a solurilor prin intermediul scurgerilor de levigat presupune oferirea de soluții de tratare și gestionare eficientă a levigatului. Una dintre metodele de tratare a levigatului este fitoremedierea. Prezentul studiu analizează aplicațiile fitoremedierii în tratarea levigatului generat de depozitele de deșeuri menajere municipale.

Cuvinte cheie: tratarea levigatului, poluare, fitoremediere, depozite de deșeuri.

1. Introduction

One of the biggest challenges at global scale is related to the management of municipal wastes. The increase of population leads to a high level of products, materials or goods consumption which reach at their end of life as waste. In general, products with a low life cycle are predominant in the composition of municipal landfills. Although most countries support the idea of a clean and healthy environment for citizens, in many situations, economy, industry and agriculture are a priority, although all these activities depend on and are influenced by the environmental quality [1].

The most important pollution problems induced by landfill refer to the generation of hazardous gas and liquid leachate. Special focus on leachate generated from municipal landfills is mainly due to the toxic impact on the environment and human health in situations where it is not properly managed. In 2012, at European Union

1. Introducere

Una dintre cele mai mari provocări pe plan mondial este legată de gestiunea deșeurilor municipale. Creșterea populației la nivel global conduce incontestabil la un nivel ridicat al consumului de produse, materiale sau bunuri, care la sfârșitul ciclului de viață ajung deșeuri. În general, produsele cu un ciclu de viață scăzut predomină în compoziția depozitelor de deșeuri municipale. Cu toate că majoritatea țărilor susțin ideea unui mediu curat și sănătos pentru cetățeni, economia, industria sau agricultura devin prioritare, deși toate aceste activități depind și sunt influențate de calitatea mediului [1].

Cele mai importante probleme de poluare induse prin intermediul depozitelor de deșeuri fac referire la generarea gazelor cu potențial exploziv și a levigatului lichid. Atenția deosebită asupra levigatului generat din depozitele de deșeuri municipale este datorată în principal impactului toxic asupra factorilor de mediu și a sănătății umane în situații în care

level (EU 28), there were generated 487 kg / inhabitant / year of which 160 kg / inhabitant / year is disposed to landfill [2]. According to these data, a percentage of 32.8% of municipal waste produce leachate and landfill gas for a long period of time, even decades. Currently, there are various techniques and methods of treating leachate originating from municipal landfills, with different levels of efficiency.

Phytoremediation is defined as a technology that uses green plants to treat contaminants, to make them less harmful to the environment or to clean up contaminated sites. This method can be applied to sites contaminated with organic substances, nutrients, heavy metals. Phytoremediation has gained popularity because of its reduced costs, aesthetic advantages and long-term applicability [3].

2. Leachate characteristics

Leachate is defined by EEA (European Environment Agency) as a "Liquid that has seeped through solid waste in a landfill and has extracted soluble dissolved or suspended materials in the process" [4]. Ward et al (2002) defines leachate as a complex mixture of organic and inorganic substances [5].

Leachate composition depends on the site on which was generated, the percentage of types of deposited waste, climatic conditions from the landfill site and many other external factors [6]. Heavy metals contained in the leachate possess the same principle of varying concentrations from a generation source to another. For example, Ward et al. conducted a survey at six municipal landfills, obtaining significantly different concentrations for heavy metals [5].

3. Phytoremediation - leachate system

Phytoremediation uses plants to clean or control different types of contaminants like heavy metals, pesticides or oil (Figure 1). Plants are also very useful in preventing the spread of pollutants in the surroundings with the wind, rain and also in groundwater. Phytoremediation is known to be a passive, solar-driven and aesthetically pleasing technology [7]. The advantages that make phytoremediation a technology with great potential are: it is simple, clean, cost-effective, green and with perspectives of using the by-products further [8]; [9].

acesta nu este gestionat corespunzător. În 2012, la nivelului Uniunii Europene, (EU 28) se generează 487 kg/loc/an, din care 160 kg/loc/an ajung să fie depozitate [2]. Conform acestor date, un procent de 32,8% din deșeurile municipale produc leviș și gaz de depozit o perioadă de timp îndelungată, începând de la zeci de ani. Există diferite tehnici și metode de tratare a levișului provenit de la depozitele de deșeuri municipale, cu eficiențe variate.

Fitoremedierea este definită ca fiind tehnologia ce utilizează plante verzi pentru a elimina conținutul de contaminanți, de a-i face inofensivi pentru mediu sau pentru a curăța siturile contaminate. Această metodă poate fi aplicată la siturile contaminate cu substanțe organice, nutrienți sau metale grele. Fitoremedierea și-a câștigat popularitatea prin costurile reduse, avantajele estetice și aplicabilitatea pe termen lung [3].

2. Caracteristicile levișului

Levișul este definit de către EEA (Agenția Europeană de Mediu), ca fiind un "lichid care s-a infiltrat printre deșeurilor solide din depozitele de deșeuri și a extras materialele solubile dizolvate sau suspendate în timpul procesului" [4]. Ward et al. (2002) definește levișul ca un amestec complex de substanțe organice și anorganice [5].

Compoziția levișului este dependentă de situl din care a fost generat, procentul tipurilor de deșeuri depozitate, condițiile climatice din zona de amplasament a depozitului și alți numeroși factori externi [6]. Metalele grele din compoziția levișului respectă același principiu al concentrației variate de la o sursă de generare la alta. De exemplu, Ward et al. au realizat un studiu asupra a șase depozite de deșeuri municipale, obținând concentrații semnificativ diferite în cazul metalelor grele [5].

3. Sistemul fitoremediere – leviș

Fitoremedierea folosește plantele pentru a trata sau a stabili diferite tipuri de contaminanți, cum ar fi metalele grele, pesticidele sau uleiurile (Figura 1). Plantele sunt, de asemenea, foarte utile în prevenirea răspândirii poluanților în împrejurimi prin vânt, ploaie și în apele subterane. Fitoremedierea este cunoscută ca fiind o tehnologie pasivă, acționată solar și plăcută din punct de vedere estetic [7]. Avantajele care fac fitoremedierea o tehnologie cu mare potențial sunt: este simplă, curată, eficientă din punct de vedere al costurilor, verde și cu perspective de utilizare ulterioară a subproduselor [8]; [9].

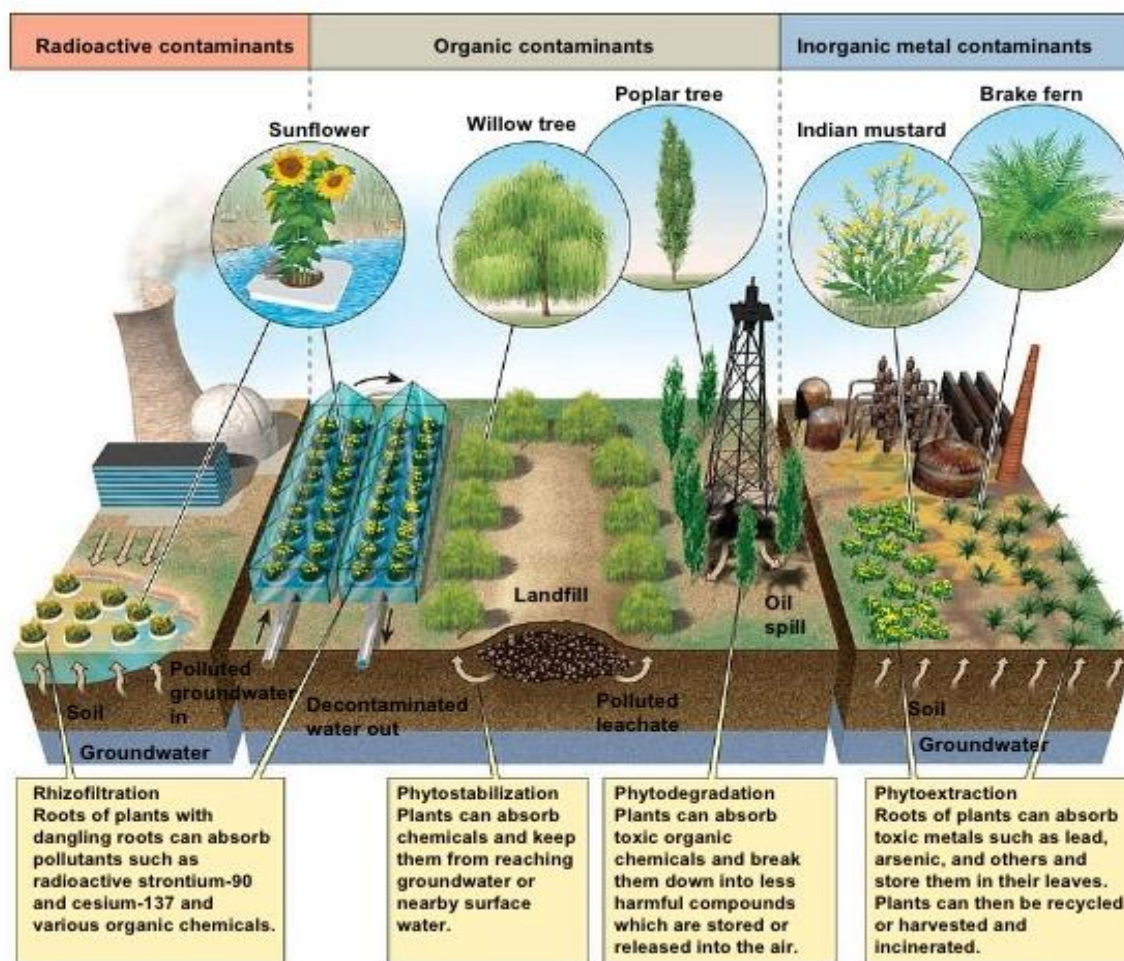


Figure 1. Phytoremediation system [10]

In the process of phytoremediation, rhizosphere microorganisms can be associated to the plants. Plants and microorganisms can remove, transform or contain the contaminants that can be found in soils, sediments, surface and groundwater, atmosphere. The pollutants that can be treated using phytoremediation are: heavy metals, pesticides, landfill leachates, chlorinated solvents, radionuclides, explosives, petroleum hydrocarbons [11]; [12].

The enzymatic activity of the plants is responsible for the accumulation or translocation of organic and inorganic pollutants in the plant tissue. They are transformed in less bioavailable products. The main disadvantage of phytoremediation is that it needs a long period of time for the treatment because it depends on the biological cycles of plants and their growth. Another disadvantage is that it is only relevant in the root area and it is influenced by the bioavailability of contaminants and the soil properties [13].

În procesul de fitoremediere, microorganismele rizosferei pot fi asociate plantelor. Plantele și microorganismele pot elimina, transforma sau reține contaminanții care se găsesc în soluri, sedimente, ape de suprafață și subterane, atmosferă. Poluanții care pot fi tratați cu ajutorul fitoremedierii sunt: metalele grele, pesticidele, levigatul din depozitele de deșeuri, solvenții clorurați, radionuclizii, explozivii, hidrocarburile petroliere [11]; [12].

Activitatea enzimatică a plantelor este responsabilă pentru acumularea sau transferul poluanților organici și anorganici în țesutul plantelor. Aceștia sunt transformați în produși mai puțin biodisponibili. Principalul dezavantaj al fitoremedierii este că are nevoie de o perioadă lungă de timp de tratare deoarece depinde de ciclurile biologice ale plantelor și creșterea lor. Un alt dezavantaj este faptul că este relevantă numai în zona rădăcinii și este influențată de biodisponibilitatea contaminanților și a proprietăților solului [13].

The reason why phytoremediation can be an alternative for the landfill remediation is that it stabilizes the soil while it is involved in the treatment of leachate. If it is needed also a hydrological control of the rainfall that infiltrates, then the landfill covers – phytocapping can be included in the landfill phytoremediation system. The harsh and sterile soil in the landfill area represents a limitative factor for the vegetation [14]. Physical and chemical remediation of soils is not required and the improvement of soil microbiology and reduction of erosion are signs that the remediation is working [15].

To use the system of phytoremediation and landfill leachate properly, it is of major importance to know the responses of plants and their tolerant mechanisms to leachate stress. Landfill leachate affects the metabolism of plants at high concentrations. A possibility to use it in the process is to control its concentration until it becomes tolerant by using spray and trickle irrigation of partially treated or not treated leachate. The success is to find the method and the vegetation system that can work together to tolerate the landfill leachate stress [16].

Phytoremediation uses the soil-plant system to remove, deteriorate and inactivate toxic elements that can be found in the leachate. The remediation involves a mixture of aboveground (foliar uptake of different compounds and evaporation) and belowground activities (water uptake, root uptake of compounds and nutrients, rhizoremediation, sorption, fixation, degradation, soil structuring) (Figure 2) [6].

Plants that can be used in the leachate treatment need to have the following characteristics: high transpiration rate, good resistance, capacity to adapt to a wide spectrum of contaminants that are present in leachate. One of the plants that have these attributes is *Phragmites australis*. It is also important for the implementation in different projects because it is very simple to breed, plant and cultivate it [17].

Species of the *Populus* family (Figure 3) are used in many projects that deal with the use of leachate as irrigation and fertilization source [18].

Other projects use willows for the treatment and they are also great as energy source. Some of the studies showed that leachate can have a phytotoxic effect on willows [19].

Motivul pentru care fitoremedierea poate fi o alternativă pentru depoluarea depozitului de deșeuri este faptul că stabilizează solul în timp ce aceasta este implicată în tratamentul levigatului. Dacă este necesar, se realizează un control hidrologic al precipitațiilor care se infiltrează, apoi se poate include tehnologia phytocapping – copertarea depozitului de deșeuri cu vegetație care să facă parte din sistemul depozit de deșeuri - fitoremediere. Solul steril din zona depozitului de deșeuri reprezintă un factor limitativ pentru vegetație [14]. Remedierea fizică și chimică a solurilor nu este necesară, iar îmbunătățirea microbiologiei solului și reducerea eroziunii sunt semne că remedierea este în desfășurare [15].

Pentru a utiliza sistemul de fitoremediere și levigat în mod corespunzător, este de o importanță majoră să se cunoască răspunsurile plantelor și mecanismele de toleranță la stresul provocat de levigat. Levigatul din depozitele de deșeuri afectează metabolismul plantelor la concentrații ridicate. O posibilitate de a-l folosi în procesul fitoremedierii este de a controla concentrația până când aceasta devine tolerantă cu ajutorul irigației prin spray și picurare cu levigat tratat parțial sau netratat. Succesul este de a găsi metoda și sistemul de vegetație care pot funcționa împreună pentru a tolera stresul cauzat de levigatul din depozitele de deșeuri [16].

Fitoremedierea utilizează sistemul sol - plantă pentru a elimina, deteriora și inactiva elementele toxice care se găsesc în levigat. Remedierea implică un amestec de activități ale părților aeriene (absorbția foliară a diferiților compuși și evaporare) și subterane (absorbție de apă, absorbție prin rădăcină a compușilor și substanțelor nutritive, rizoremediere, sorbție, fixare, degradare, structurare a solului) (Figura 2) [6].

Plantele care pot fi utilizate în tratamentul levigatului trebuie să aibă următoarele caracteristici: o rată mare a transpirației, rezistență bună și capacitate de a se adapta la un spectru larg al contaminanților care sunt prezenți în levigat. Una dintre plantele care au aceste proprietăți este *Phragmites australis*. De asemenea, este importantă pentru punerea în aplicare în diferite proiecte, pentru că reproducerea este simplă, precum și cultivarea sa și echipamentele necesare [17].

Speciile din familia *Populus* (Figura 3) sunt utilizate în multe proiecte care se ocupă cu utilizarea levigatului ca sursă de irigare și fertilizare [18]. Alte proiecte folosesc sălciile pentru tratarea levigatului și acestea sunt importante ca sursă de energie. Unele studii au arătat că levigatul poate avea un efect fitotoxic asupra sălciilor [19].

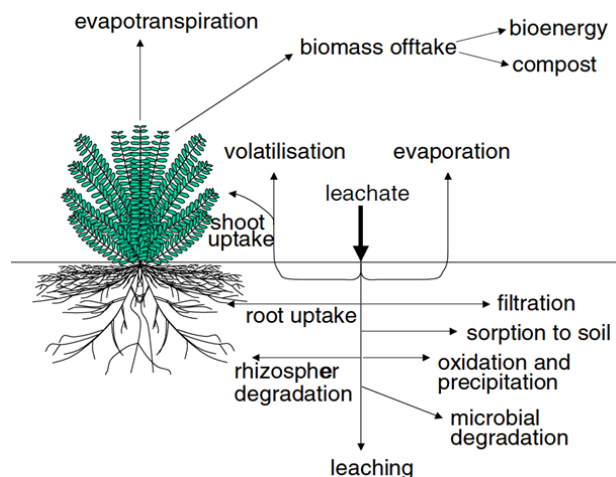


Figure 2. Scheme of remediation processes in the soil – plant bioreactor of landfill leachate [6].

Because of its problems in salinity and toxicity, not all the plants can be used in the leachate treatment. Leachate might be a great source of $\text{NH}_x\text{-N}$, but it also contains toxic organics and heavy metals. Even though, *Acacia confusa*, *Leucaena leucocephala* and *Eucalyptus torelliana* were irrigated with diluted leachate and responded well in their development [20].

Din cauza problemelor sale de salinitate și toxicitate, nu toate plantele pot fi utilizate în tratamentul levigatului. Levigatul ar putea fi o mare sursă de $\text{NH}_x\text{-N}$, dar conține, de asemenea, substanțe organice toxice și metale grele. Cu toate acestea, *Acacia confusa*, *Leucaena leucocephala* și *Eucalyptus torelliana* au fost irigate cu levigat diluat și au răspuns bine în dezvoltarea lor [20].

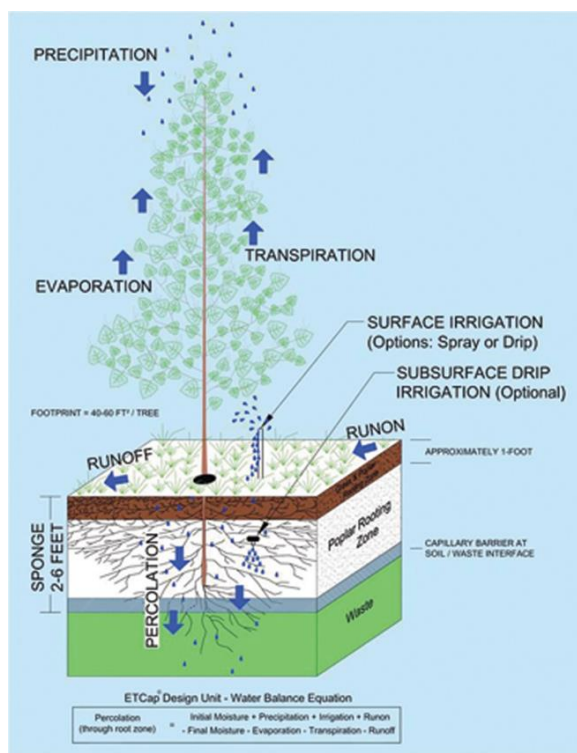


Figure 3. Phytoremediation as a technology of remediation of landfill leachate [21].

The effects that the chemical composition of landfill leachate has on plants are: damage of leaves, premature aging of leaves, low biomass production. A lot of factors influence the growth of plants in the field situations and the identification

Efectele pe care compoziția chimică a levigatului din depozitele de deșuri le au asupra plantelor sunt: deteriorarea frunzelor, îmbătrânirea prematură a frunzelor, producția scăzută de biomasă. O mulțime de factori influențează creșterea plantelor

of the indicators of plant stress in the case a leachate irrigation system is very useful for choosing the proper plants [22].

Landfill leachate can be reused as a fertilizer in the case of energy crops. Leachate can be added in the growth of energy crops because its composition that is characterized by high concentrations of micro and macronutrients like: Ca, Mg, K, N, B, Zn. In Europe, there are studies that implemented the application of leachate as irrigation to the energy crops. It resulted that if it is managed properly, the irrigation of plants with leachate contributes directly to the increase of biomass production [23].

There are a number of factors that assure a successful implementation of different projects and can limit the realization of them. Some of these factors are: plants species, soil texture, method of irrigation, quantity and quality of water, climate and interaction between factors [24].

There is a global concern on water resources and it is known that agriculture is one of the biggest consumers of water. If the demand of water becomes higher, agriculture seems to be part of a competition for water with other sectors. This is why it is very interesting to analyze the alternative water sources like wastewaters from landfills and water coming from composting process. The nutrients that can be found in the leachate can increase the growth of plants and reduce the water stress. The main problems are that the impact on soil quality and to the health of humans is not known totally [25].

The advantages of using phytoremediation systems with the leachate treatment are: control of erosion, pollution reduction, carbon sequestration, landscape improvement, public acceptance. The motives of using plants in such way are: fast growth, fast establishment, facile rooting, water utilization and high rates of photosynthesis [12].

4. Examples of applying phytoremediation to treat leachate

A project in the location Biloxi, Mississippi, US, applies phytoremediation as an innovative technique that uses landfill leachate as a resource instead of the traditional disposal and has a great environmental impact (Figure 4). The plant that is utilized is *Chrysopogon zizanioides* and the implementation of the plants showed a lot of advantages like: protects the groundwater from contamination, reduces infiltration and soil erosion

în situațiile din câmp și identificarea indicatorilor de stres a plantelor în cazul unui sistem de irigare cu levigat este foarte utilă pentru alegerea plantelor potrivite [22].

Levigatul poate fi reutilizat ca îngrășământ în cazul culturilor energetice. Poate fi adăugat în creșterea culturilor energetice din cauza compoziției sale care se caracterizează prin concentrații mari de micro și macroelemente precum: Ca, Mg, K, N, B, Zn. În Europa, există studii care au implementat aplicarea levigatului în irigarea culturile energetice. A rezultat că în cazul gestionării corecte, irigarea plantelor cu levigat contribuie direct la creșterea producției de biomasă [23].

Există o serie de factori care asigură o implementare de succes a diferitelor proiecte și pot limita realizarea lor. Unii dintre acești factori sunt: speciile de plante, textura solului, metoda de irigare, cantitatea și calitatea apei, clima și interacțiunea acestor factori [24].

Există o preocupare la nivel mondial asupra resurselor de apă și se știe că agricultura este unul dintre cei mai mari consumatori de apă. În cazul în care cererea de apă devine mai mare, agricultura pare să fie parte a unei competiții pentru apă cu alte sectoare. Acesta este motivul pentru care este foarte interesant să se analizeze surse alternative de apă, cum ar fi apele reziduale de la depozitele de deșeuri și apele provenite din procesul de compostare. Nutrienții care se găsesc în levigat pot spori creșterea plantelor și pot reduce stresul provocat de apă. Principalele probleme sunt că impactul asupra calității solului și efectul asupra sănătății oamenilor nu este cunoscut în totalitate [25].

Avantajele folosirii tehnologiilor de fitoremediere în tratamentul levigatului sunt: controlul eroziunii, reducerea poluării, sechestrarea carbonului, îmbunătățirea peisajului, acceptarea de către public a acestor tehnici. Motivația utilizării plantelor în acest mod sunt: creștere rapidă, înființare rapidă a culturilor, înrădăcinare ușoară, utilizare de apă și rate ridicate de fotosinteză [12].

4. Exemple de aplicare a fitoremedierii pentru tratarea levigatului

Un proiect amplasat în Biloxi, Mississippi, SUA, aplică fitoremedierea ca tehnică inovatoare care utilizează levigatul provenit din depozitele de deșeuri ca resursă, în loc de eliminarea tradițională, având un impact mare asupra mediului (Figura 4). Planta care este utilizată este *Chrysopogon zizanioides*, iar implementarea plantelor a demonstrat o mulțime de avantaje precum: protejează apele subterane de contaminare, se

(leachate act like nutrients), improves the air quality, reduces the cost of leachate treatment with > 60 %, in just two years the initial investment is compensated (Figure 5), provides habitat for wildlife, sustainable [27].

reduce infiltrarea și eroziunea solului (levigatul este folosit ca substanță nutritivă), îmbunătățește calitatea aerului, reduce costul de tratament al levigatului cu > 60%, în doar doi ani investiția inițială este compensată (Figura 5), asigură habitat pentru fauna sălbatică, este o metodă durabilă [27].



Figure 4. Landfill Leachate Disposal in a previous (1) and new approach (2) [28].

In a study that took place in Wisconsin, US 20 types of hybrid poplars and willows were used to treat groundwater that was mixed with landfill leachate. The method was developed to identify which species are more suitable for the local conditions (Figure 6). The groundwater that was taken from the landfill includes metals, salts, VOCs, PAHs and others [29].

Într-un studiu care a avut loc în Wisconsin, SUA, 20 de tipuri de plopi hibridi și sălcii au fost folosite pentru a trata apele subterane care au fost amestecate cu levigat din depozit de deșeuri. Metoda a fost dezvoltată pentru a identifica care specii sunt mai potrivite pentru condițiile locale (Figura 6). Apele subterane care au fost luate în studiu conțin metale, săruri, compuși organici volatili, hidrocarburi policiclice aromatice și altele [29].

A full-scale poplar system was developed for the treatment of leachate that came from a facility of paper mill sludge compost (Figure 7). The leachate is applied to the trees using drip irrigation. The system was functional and the cost of it reached to \$23,000, compared to the annual cost of leachate treatment of \$19,000. The payback period was about one year [30].

Un sistem la scară largă de plopi a fost dezvoltat pentru tratamentul levigatului care a provenit de la o instalație de fabrică de hârtie (Figura 7). Levigatul este aplicat arborilor folosind irigarea prin picurare. Sistemul a fost funcțional și costul a ajuns la 23.000 dolari, în comparație cu costul anual de tratament al levigatului de 19.000 dolari. Perioada de amortizare a fost de aproximativ un an [30].

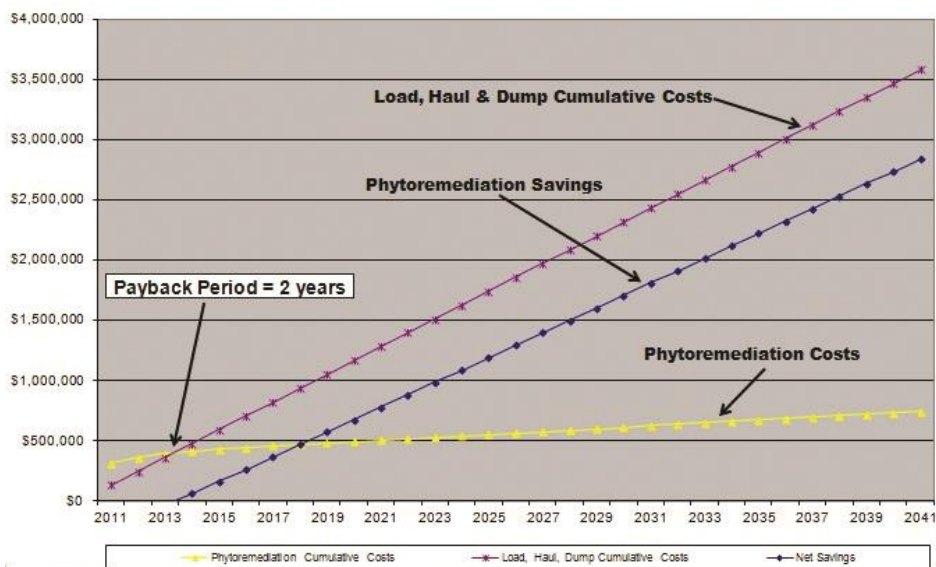


Figure 5. The graph shows that phytoremediation reduces costs and the payback period is of just 2 years [31].



Figure 6. Poplars and willows used in a phytoremediation leachate system [29].



Figure 7. Ex-situ phytoremediation of landfill leachate [30].

5. Conclusions

Landfill leachate is a major environmental problem and innovative solutions of treating it must be applied. Using phytoremediation for the leachate treatment is an important approach because of using a green solution to the problems generated by municipal waste. The phytoremediation – leachate system was successfully implemented in different projects and further research on more species and particular sites must be undertaken.

Acknowledgement

This work was partially supported by the strategic grant POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) of the Ministry of National Education, Romania, cofinanced by the European Social Fund – Investing in People, within the Sectoral Operational Programme Human Resources Development 2007-2013.

This paper is supported by the Sectoral Operational Programme Human Resources Development POSDRU/159/1.5/S/137516 financed from the European Social Fund and by the Romanian Government.

This work was supported by a grant of the Romanian National Authority for Scientific Research, CNCS – UEFISCDI, project number PN-II-PT-PCCA-2013-4-1717.

References

- [1] Jadia, C.D., Fulekar, M.H., 2009, Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques, African Journal of Biotechnology, Vol. 8, No. 6, pp. 921-928, available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>.
- [2] ***, European Union Statistics, Eurostat database, on line at: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>, Date of access: 12/02/2015.

5. Concluzii

Levigatul este o problemă majoră de mediu și trebuie să fie aplicate soluții inovative de tratare a lui. Utilizarea fitoremedierii pentru tratarea levigatului reprezintă o abordare “verde” la problemele generate de deșeurile municipale. Sistemul fitoremediere - levigat a fost implementat cu succes în diferite proiecte și este necesară continuarea cercetărilor cu privire la mai multe specii de plante care pot fi utilizate cu succes și situri particulare pentru aplicarea la scară largă.

Mulțumiri

Această lucrare a fost parțial finanțată în cadrul proiectului strategic POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) a Ministerului Educației Naționale, România, co-finanțat din Fondul Social European – Investește în oameni, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

Acest articol a fost realizat în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane POSDRU/159/1.5/S/137516 finanțat din Fondul Social European și Guvernul României.

Această lucrare a fost finanțată de grant al Autorității Naționale pentru Cercetare Științifică, CNCS - UEFISCDI, număr proiect PN-II-PT-PCCA-2013-4-1717.

- [3] Sogut, Z., Zaimoglu, B.Z., Erdogan, R., Sucu, M.Y., 2005, Phytoremediation of landfill leachate using *Pennisetum clandestinum*, Journal of Environmental Biology, Vol. 26, No. 1, pp. 13-20.
- [4] ***, European Environmental Agency, on line at: http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=landfill%20leachate, Date of access: 23/02/2015.
- [5] Ward, M.L., Bitton, G., Townsend, T., Booth, M., 2002, Determining Toxicity of Leachates from Florida Municipal Solid Waste Landfills Using a Battery of-Tests Approach, Environmental Toxicology Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 258-266.
- [6] Jones D.L., Williamson K.L., Owen A.G., 2006, Phytoremediation of landfill leachate, Waste Management, Vol. 26, pp. 825–837.
- [7] Zhang B.Y., Zheng J.S., Sharp R.G., 2010, Phytoremediation in Engineered Wetlands: Mechanisms and Applications, Procedia Environmental Sciences, Vol. 2, pp. 1315–1325.
- [8] Doran, P.M., 2009, Application of plant tissue cultures in phytoremediation research: incentives and limitations, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 103, pp. 60–76.
- [9] Sarma, H., 2011, Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology, Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 4, pp. 118–138.
- [10] ***, <http://www.slideshare.net/dwillard/hazardous-wastes>, Date of access: 20/02/2015.
- [11] Wenzel, W.W., 2009, Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils, Plant Soil, Vol.321, pp. 385–408.
- [12] García J.A. L., Grijalbo L., Ramos B., Fernández-Piñas F., Rodea-Palomares I., Gutierrez-Mañero F.J., 2013, Combined phytoremediation of metal-working fluids with maize plants inoculated with different microorganisms and toxicity assessment of the phytoremediated waste, Chemosphere, Vol. 90, pp. 2654–2661.
- [13] Cameselle C., Chirakkara R.A., Reddy K.R., 2013, Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities, Chemosphere 93: 626–636.
- [14] Kim K.-R., Owens G., 2010, Potential for enhanced phytoremediation of landfills using biosolids – a review, Journal of Environmental Management, Vol.91, pp. 791–797.
- [15] Foucault Y., Lévêque T., Xiong T., Schreck E., Austruy A., Shahid M., Dumat C., 2013, Green manure plants for remediation of soils polluted by metals and metalloids: Ecotoxicity and human bioavailability assessment, Chemosphere Vol. 93, pp. 1430–1435.
- [16] Sang N., Han M., Li G., Huang M., 2010, Landfill leachate affects metabolic responses of *Zea mays* L. seedlings, Waste Management, Vol. 30, pp. 856–862.
- [17] Białowiec A., Wojnowska-Baryła I., 2007, The efficiency of landfill leachate evapotranspiration in soil-plant system with reed *Phragmites australis*, Ecohydrology and hydrobiology, Vol. 7, No 3 - 4: 331-337.
- [18] Zalesny J.A., Zalesny Jr. R.S., Coyle D.R., Hall R.B., 2007, Growth and biomass of *Populus* irrigated with landfill leachate, Forest Ecology and Management, Vol.248, pp 143–152.
- [19] Duggan J., 2005, The potential for landfill leachate treatment using willows in the UK—A critical review, Resources, Conservation and Recycling Vol. 45, pp. 97–113.
- [20] Cheng C.Y., Chu L.M., 2011, Fate and distribution of nitrogen in soil and plants irrigated with landfill leachate, Waste Management, Vol. 31, pp. 1239–1249.
- [21] ***, <http://www.aaees.org/images/e3swinners/e3competition-winners2012gpsmallprojects05.jpg>, Date of access: 15/02/2015.
- [22] Dimitriou I., Aronsson P., Weih M., 2006, Stress tolerance of five willow clones after irrigation with different amounts of landfill leachate, Bioresource Technology, Vol. 97, pp. 150–157.
- [23] Justina M.Z., Zupancic M., 2009, Combined purification and reuse of landfill leachate by constructed wetland and irrigation of grass and willows, Desalination, Vol. 246, pp.157 –168.
- [24] Dimitriou I., Aronsson P., 2010, Landfill leachate treatment with willows and poplars – Efficiency and plant response, Waste Management Vol. 30, pp. 2137–2145.
- [25] Zupanc V., Justin M.Z., 2010, Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoids*, Waste Management Vol. 30, pp. 2130–2136.
- [26] Justin M.Z., Pajk N., Zupanc V., Zupancic M., 2010, Phytoremediation of landfill leachate and compost wastewater by irrigation of *Populus* and *Salix*: Biomass and growth response, Waste Management Vol. 30, pp. 1032–1042.
- [27] ***, <http://www.aaees.org/e3competition-winners-2012gp-smallprojects.php>, Date of access: 15/02/2015.
- [28] ***, <http://www.aaees.org/images/e3swinners/e3competition-winners-2012gp-smallprojects19.jpg>, Date of access: 15/02/2015.

- [29] ***, http://sand-creek.com/phyto_gallery/leachate-phytoremediation-bench-scale-feasibility-testing/, Date of access: 16/02/2015.
- [30] ***, http://sand-creek.com/phyto_gallery/ex-situ-phytoremediation-of-paper-mill-landfill-leachate/, Date of access: 16/02/2015.
- [31] ***, <http://www.aaees.org/images/e3swinners/e3competition-winners-2012gp-smallprojects18.jpg>, Date of access: 15/02/2015.