



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Behandling af PFAS- forurennet jord til recirkulering af råstoffer

Miljøprojekt 2278

September 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Sabine Lindholst, Teknologisk Institut
Tore Svendsen, Vandrensning.com ApS

Fotos:

Teknologisk Institut
Nordic Waste

ISBN: 978-87-7038-649-4

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Forord	4
2.	Sammenfatning og konklusion	5
3.	Summary and conclusions	6
4.	Introduktion	7
4.1	PFAS-forurenet jord og konsekvenser heraf	7
4.2	Projektets formål	7
4.3	Projektets udførelse	7
5.	Vaskeanlæg i pilotskala	8
5.1	Design af pilotjordvasker	8
6.	Forurenet jord	10
6.1	Lokalisering af PFAS-forurenet jord	10
7.	Jordvaskeforsøg	11
7.1	Jordtyper anvendt i vaskeforsøgene	11
7.2	Design of Experiments til planlægning af forsøgsmatrice	11
7.3	Resultater af jordvask	12
7.4	Repræsentativ prøvetagning	18
7.5	Effekt af rengøring af anlægget	18
8.	Behandling af slamfraktionen	20
8.1	Behandling af slamfraktionen	20

1. Forord

Denne projektrapport afslutter projektet 'Behandling af PFAS-forurenede jord til recirkulering af råstoffer' under Miljøstyrelsens tilskudsordning Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening (TUP). Projektet er gennemført i perioden fra september 2022 til januar 2024 med det overordnede formål at udvikle en jordvaskeenhed til vask af PFAS-forurenede jord til recirkulering af råstoffer (sand og sten) og genbrug af vaskevandet.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Nordic Waste A/S, Vandrensning.com ApS, Envytech Solutions AB og Teknologisk Institut. Idet Nordic Waste A/S gik konkurs, inden alle projektaktiviteter var gennemført, afrapporteres kun de resultater, der var opnået inden konkursen. Det betyder, at de forsøg med SAFF (Surface Active Foam Fractionation), der var planlagt hos Envytech Solutions, ikke er omfattet af afrapporteringen. Rapporten giver et samlet overblik over det arbejde, der er udført i løbet af projektet, og over de væsentligste udfordringer, resultater og konklusioner.

Teknologisk Institut

Aarhus, april 2024

2. Sammenfatning og konklusion

Sammenfatning

Projektet 'Behandling af PFAS-forurenede jord til recirkulering af råstoffer' blev gennemført fra september 2022 til januar 2024. Projektets hovedformål var at udvikle en jordvaskeenhed til rensning af PFAS-forurenede jord og genbrug af råstoffer som sand og sten. Projektet blev udført i et samarbejde mellem Nordic Waste A/S, Vandrensning.com ApS, Envytech Solutions AB og Teknologisk Institut.

Konklusion

Det vigtigste resultat fra projektet er, at jordvask kan anvendes til at rense den modtagne, forholdsvis sandede jord forurenede med langkædede PFAS-forbindelser. Projektet viste, at det var muligt at opnå høje PFOS-reduktioner (96 %) ved høje koncentrationer i råjorden. Dog var de endelige koncentrationer i det vaskede sand stadig let forhøjede sammenlignet med grænseværdierne, hvilket indikerer, at genvask kan være nødvendig.

Ydermere blev det konkluderet, at vask ved lavt tryk og hurtig tilsætning af jorden var lige så effektiv som vask ved højt tryk og langsom tilsætning af jord, der kræver mere vand og energi.

Endelig blev det observeret, at det selv ved lave PFAS-koncentrationer i jorden var muligt at opnå en væsentlig PFAS-reduktion ved en vaskeproces med vand.

Resultaterne i nærværende rapport viser, at PFAS var let at vaske ud af jorden, hvilket også understøttes af fund af høje PFAS-koncentrationer i perkolat fra deponier (data er præsenteret i rapporten for MUDP-projektet PFASinator - Sustainable and cost-effective technology for PFAS-removal from landfill leachate). Det vil derfor generelt være muligt ved rensning med vand at fjerne selv høje PFAS-koncentrationer fra sandede jorde og dermed undgå grundvandsforurening og spredning af PFAS fra disse punktkilder.

3. Summary and conclusions

Summary

The project 'Treatment of PFAS Contaminated Soil for Recycling of Raw Materials' was carried out from September 2022 to January 2024. The main purpose of the project was to develop a soil washing unit for the cleaning of PFAS-contaminated soil and the recycling of raw materials such as sand and stone. The project was carried out in collaboration between Nordic Waste A/S, Vandrensning.com ApS, Envytech Solutions AB, and the Technological Institute. As Nordic Waste A/S went bankrupt, only the results that had been achieved before the bankruptcy are reported.

Conclusions

The most important result from the project is that soil washing can be used to clean the received, relatively sandy soil contaminated with long-chain PFAS compounds. The project showed that it was possible to achieve high PFOS reductions (96%) at high concentrations in the raw soil. However, the final concentrations in the washed sand were still slightly elevated compared to the limit values, indicating that re-washing may be necessary.

Furthermore, it was concluded that washing at low pressure and high soil feeding rate to the washing unit was just as effective as washing at high pressure and low feeding rate, which requires more water and energy.

Finally, it was observed that even at low PFAS concentrations in the soil, it was possible to achieve a significant PFAS reduction by a washing process with water.

The results in this report show that PFAS was easy to wash out of the soil, which is also supported by findings of high PFAS-concentrations in leachate from landfills (data are presented in the report for the MUDP project PFASinator - Sustainable and cost-effective technology for PFAS-removal from landfill leachate). Therefore, it will generally be possible to remove even high PFAS concentrations from sandy soils by washing with water, thus avoiding groundwater pollution and the spread of PFAS from these point sources.

4. Introduktion

4.1 PFAS-forurenet jord og konsekvenser heraf

Jord forurenet med miljøfremmede stoffer er et stadig stigende problem for miljøet og vores sundhed. Årligt deponeres >2.300.000 tons forurenet jord i Danmark¹. Råstoffer er begrænsede, og derfor skal der udvikles nye løsninger til at genbruge allerede indvundne mængder. Nordic Waste havde investeret i en jordvasker i fuldskala, og dette projekt skulle undersøge, om det var muligt at vaske jord for PFAS på en kosteffektiv måde, så jorden efterfølgende kunne genanvendes. Entreprenører ville således i stedet for at skulle deponere forurenet jord få mulighed for at få vasket jorden til genanvendelsesformål.

PFAS er en gruppe af stoffer, som er kendetegnet ved at være persistente og sundhedsskadelige. Deres kemiske struktur gør dem ikke alene i stand til at binde til jordpartikler, men også til at følge vandstrømme^{2,3}, hvilket udgør en kilde til langvarig forurening, der kan føre til spredning til store områder.

4.2 Projektets formål

I projektet blev effektiviteten af teknologien til PFAS-jordvask off-site optimeret. Med fokus på at opnå en kosteffektiv rensning blev det undersøgt, under hvilke betingelser (jordtype og PFAS-kontaminering) det er tilstrækkeligt alene at anvende vand til jordvask. Desuden blev der udviklet en metode til rensning af det anvendte vaskevand for efterfølgende at kunne recirkulere vandet til vaskeformål. Andre virkemidler til for- eller efterbehandling af jorden skulle have været inddraget (Surface Active Foam Fractionation (SAFF)), men blev grundet uventet projektafslutning ikke nået.

Målet var at opnå Best Available Technology (BAT) i forhold til gældende grænseværdier for dels at kunne genanvende den vaskede sand- og stenfraktion i fx vejkonstruktioner, dels at opkoncentrere PFAS til det mindst mulige volumen til efterfølgende destruktion.

4.3 Projektets udførelse

I projektet blev der hos Nordic Waste designet og bygget en jordvaskeenhed i pilotskala, der kunne efterligne vask i Nordic Wastes fuldskalaanlæg til jordvask, så vask af PFAS-forurenet jord kunne afprøves i mindre skala.

PFAS-forurenet jord (4 m³ i alt) blev afhentet fra forskellige hotspots og vasket i pilotvaskeenheden. Selve vaskevandet blev efterfølgende rensat af Vandrensning.com med det formål at kunne genbruge vandet til jordvask og koncentrere PFAS i så lille et volumen som muligt til efterfølgende destruktion. Som aftalt i projektet overtog Nordic Waste håndteringen af resterende jord og affaldsfraktionerne. De planlagte SAFF-forsøg hos Envytech med både jord og vaskevand ifm. optimering af jordvask og rensning af vaskevand blev ikke gennemført i projektet grundet Nordic Wastes konkurs undervejs i projektet.

¹ BEATE 2018-2019, Klima-, Energi- og Forsyningsudvalget 2021-22, KEF Alm. Del – Bilag 80, <https://www.ft.dk/samling/20211/almDEL/kef/bilag/80/2482515.pdf>

² Høisæter, Å., Pfaff, A., Breedveld, G.D., 2019. Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. J. Contam. Hydrol. 222, 112–122

³ McLachlan, M.S., Felizeter, S., Klein, M., De Kotthoff, M., Voogt, P., 2019. Fate of a perfluoroalkyl acid mixture in an agricultural soil studied in lysimeters. Chemosphere 223, 180–187.

5. Vaskeanlæg i pilotskala

For at kunne gennemføre forsøg med vask af PFAS-forurenede jord blev der hos Nordic Waste udviklet en jordvaskeenhed i pilotskala, der efterligner jordvaskeenheden i fuldskala mest muligt

5.1 Design af pilotjordvasker

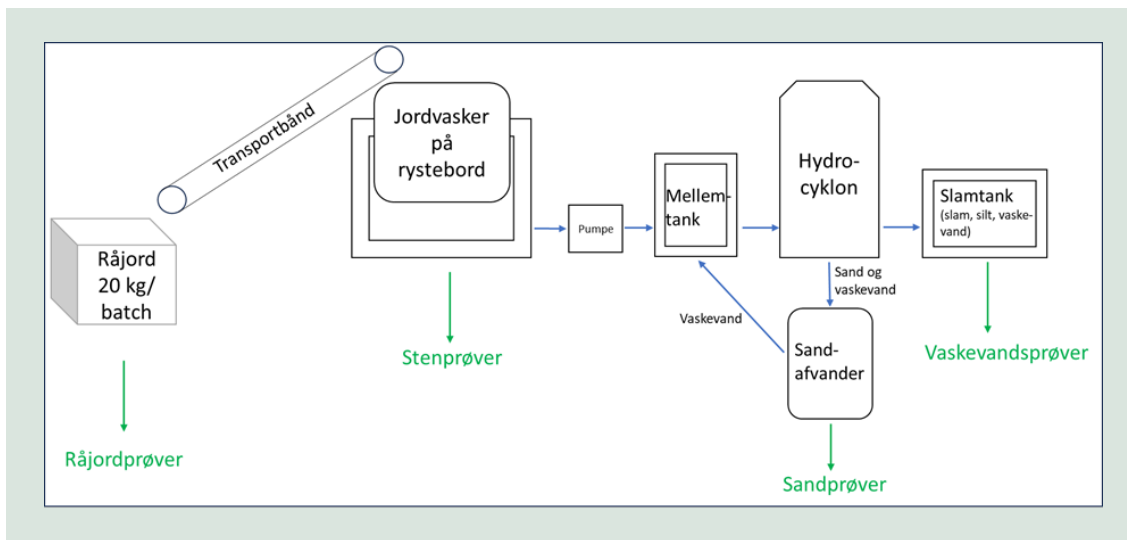
Pilotjordvaskeren (billedet nedenfor) blev designet til i videst muligt omfang at efterligne fuldskalavaskeren, som Nordic Waste havde investeret i.



Pilotenhed til jordvask.

Jorden (20 kg/vaskeforsøg) blev tilsat vasketanken ved hjælp af et transportbånd, og tilsætningshastigheden varierede i forsøgene. Vasketanken, der var udstyret med gitre af forskellig maskestørrelse, vibrerede kraftigt under selve vaskeprocessen (jordvask på rystebord). Dyser anbragt over vasketanken spulede jorden i vasketanken, og vandtrykket varierede ved forsøgene. En pumpe efter vasketanken overførte vand/jord-fraktionen til mellemtanken, hvorefter den blev ledt til cyklonen, der separerede i en sandfraktion og en slamfraktion (partikler lettere og mindre end sand - silt og organiske bestanddele samt vaskevand). Sandfraktionen blev afvandet på en rystesigte og vandet ført tilbage til mellemtanken. Processen blev afsluttet, når der ikke blev udskilt mere sand i cyklonen, hvorefter det resterende vaskevand i mellemtanken blev overført til slamtanken.

Processen er illustreret i FIGUR 1.



FIGUR 1. Illustration af vaskeprocessen. Råjorden bliver transporteret i jordvaskeren via transportbåndet. De blå pile indikerer vandets vej, mens de grønne pile indikerer prøvetagningspunkterne.

6. Forurennet jord

Fire PFAS-forurenede jorde i Danmark blev lokaliseret, og prøver af den forurenede jord blev udtaget og indbragt til vaskeforsøg

6.1 Lokalisering af PFAS-forurennet jord

Der blev identificeret fire lokaliteter i Danmark med kendt PFAS-forurening. Forureningsgraden var bestemt på baggrund af jordanalyser rekvireret af de ansvarshavende virksomheder/myndigheder (analyserapporter blev stillet til rådighed), og fra hver af disse lokaliteter blev der til jordvaskeforsøg afhentet 1 m³ jord.

Opgravningen af jordprøver på hver lokalitet/prøvetagningssted foregik så præcist som muligt i forhold til de modtagne analyserapporter, hvad angik såvel placering som opgravningsdybde. På trods heraf viste den afhentede jord meget afvigende PFAS-koncentrationer sammenlignet med resultaterne i de modtagne analyserapporter – se TABEL 1.

Det skal bemærkes, at analyser i de modtagne rapporter var foretaget på jordprøver udtaget flere måneder inden afhentning af jord til forsøg i nærværende projekt.

TABEL 1. Forventede PFAS-koncentrationer og koncentrationen i den afhentede jord. Der blev gennemført repræsentativ prøvetagning i den afhentede jord.

	Forventet konc. PFAS sum 4 [µg/kg TS]	Konc. PFAS sum 4 i modtaget jord [µg/kg TS]
A (øvelsesplads for brandslukning)	680 – 770 (10 – 50 cm dybde)	38
B (metalforarbejdende industri)	170 – 1.200 (10 – 100 cm dybde)	1.700
C (øvelsesplads for brandslukning)	Opgravet jordbunke med højt PFAS-indhold (ingen analyse tilgængelig)	15
D (brandslukningsområde)	12.000	6

Jordprøver ved de første tre jordtyper blev udtaget efter principperne for repræsentativ prøvetagning (D-jordprøven blev udtaget af underleverandør), på de præcise lokaliteter og i den dybde, som var angivet i de til rådighed stillede analyserapporter. På trods heraf viste det sig, at PFAS-indholdet i den opgravede jord på nær B-jorden var langt lavere end den forventede koncentration. Det er ikke muligt at fastslå, om årsagen hertil er udvaskning, der er sket siden de jordanalyser, der allerede var blevet udført på stedet, eller om PFAS-koncentrationen varierer meget på få meters afstand, eller om begge fænomener gør sig gældende.

7. Jordvaskeforsøg

Jordvaskeforsøg blev gennemført efter en forsøgsplan udviklet med Design of Experiments (DoE) for at identificere den vigtigste vaskeparameter

7.1 Jordtyper anvendt i vaskeforsøgene

I vaskeforsøgene blev der arbejdet med følgende to jordprøver:

B-jord

- 1100 – 1700 µg/kg TS, PFAS sum 4
- 99,8 % PFOS
- 0,2 % PFDS, PFDA, PFDoDA, PFNS, PFHpS, PFHxS, PFPeA og PFBS.

D-jord

- 5 – 7 µg/kg TS, PFAS sum 4
- PFOS og PFHxS dominerede.

Begge jordtyper var forholdsvis sandede jordtyper, som det ses i FIGUR 2.



FIGUR 2. B-jord (venstre), D-jord (højre).

7.2 Design of Experiments til planlægning af forsøgsmatrice

To parametre (jordtilførselsrate og vandtryk) kunne varieres ved vaskeforsøgene, og en forsøgsmatrice blev genereret vha. Design of Experiments (DoE) for at identificere den vigtigste vaskeparameter. Af hver 1 m³ indhentet jord blev udtaget otte delprøver a 20 kg ved repræsentativ prøvetagning. Forsøgsmatricen er præsenteret i TABEL 2.

TABEL 2. Forsøgsmatrice til jordvask. Parametre: Tryk (= vandtryk fra dyserne. Lav = 0,1 bar, høj = 1,5 bar), tid (= tidsrum for tilsætning af 20 kg jord. Lav = 100 sek, høj = 180 sek). Jordtype ren jord = jord uden PFAS-forurening.

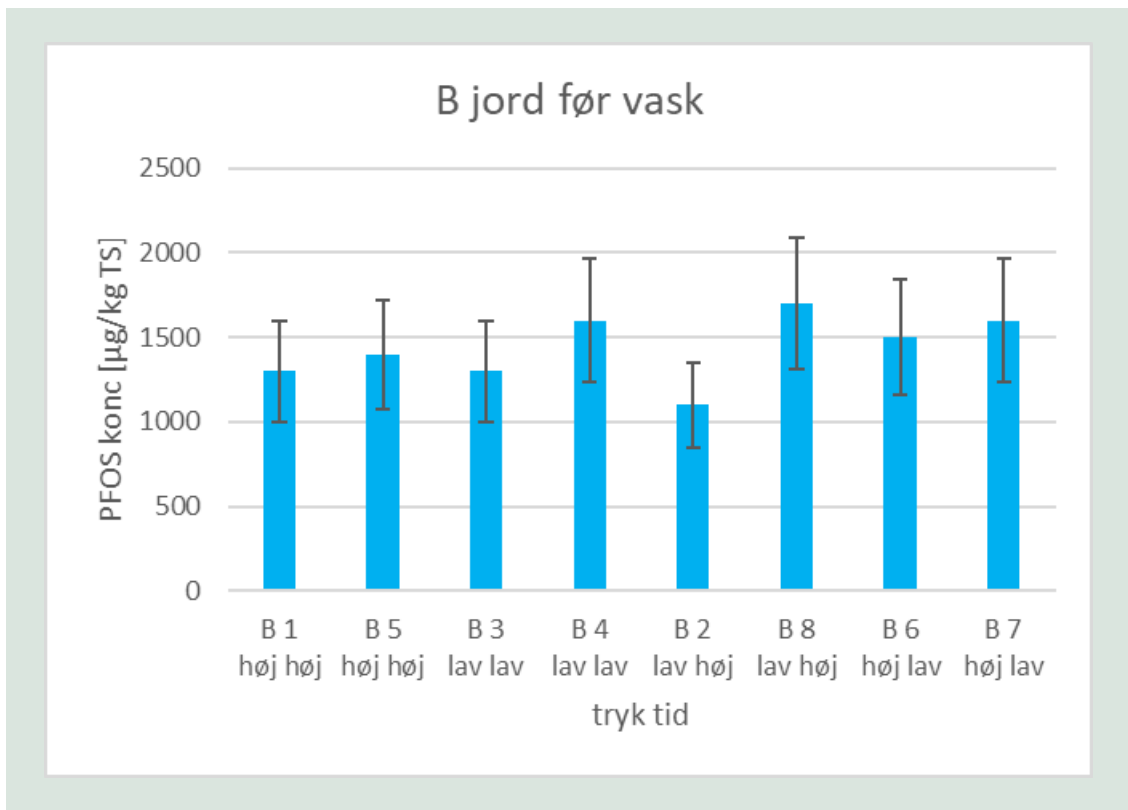
Delprøve	Tryk [bar]	Tid [s]	Jordtype	Vandforbrug [l]
1	høj	høj	B	317
2	lav	høj	B	140
3	lav	lav	B	78
4	lav	lav	B	78
5	høj	høj	B	317
6	høj	lav	B	176
7	høj	lav	B	176
8	lav	høj	B	240
Ren jord 1	høj	høj	Ren jord	317
Grundig rengøring af anlægget				
Ren jord 2	høj	høj	Ren jord	317
9	høj	lav	D	176
10	lav	lav	D	78
11	lav	høj	D	140
12	høj	lav	D	176
13	høj	høj	D	317
14	lav	høj	D	140
15	lav	lav	D	78
16	høj	høj	D	317
Ren jord 3	høj	høj	Ren jord	317

Vask af jord blev gennemført i rækkefølgen angivet i forsøgsmatricen. Efter hver delprøve blev anlægget skyllet med vand, men ikke alle dele af anlægget kunne nås. Effekten af eventuelt manglende rengøring (dvs. overførsel af PFAS fra en delprøve til den næste) blev forsøgt estimeret ved at indskyde vask af PFAS-fri jord (= ren jord) og beskrives i afsnit 7.5.

7.3 Resultater af jordvask

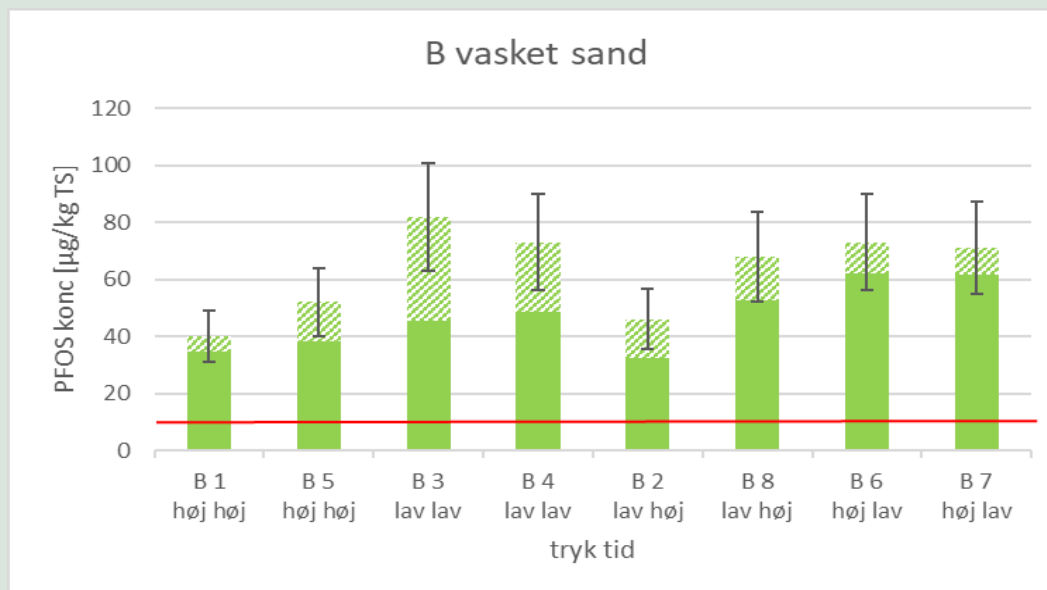
Resultaterne af vask af B-jorden er vist i FIGUR 3 og FIGUR 4. Data præsenteres som PFOS-resultater, da PFOS udgjorde 99,8 % af PFAS-koncentrationen i B-jord.

Jorden indeholdt en høj PFAS-koncentration på 1600 µg/kg TS i gennemsnit.



FIGUR 3. PFAS-koncentrationen i de otte delprøver af indhentet jord. Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23\%$.

PFOS-koncentrationerne i de otte delprøver var ikke signifikant forskellige.



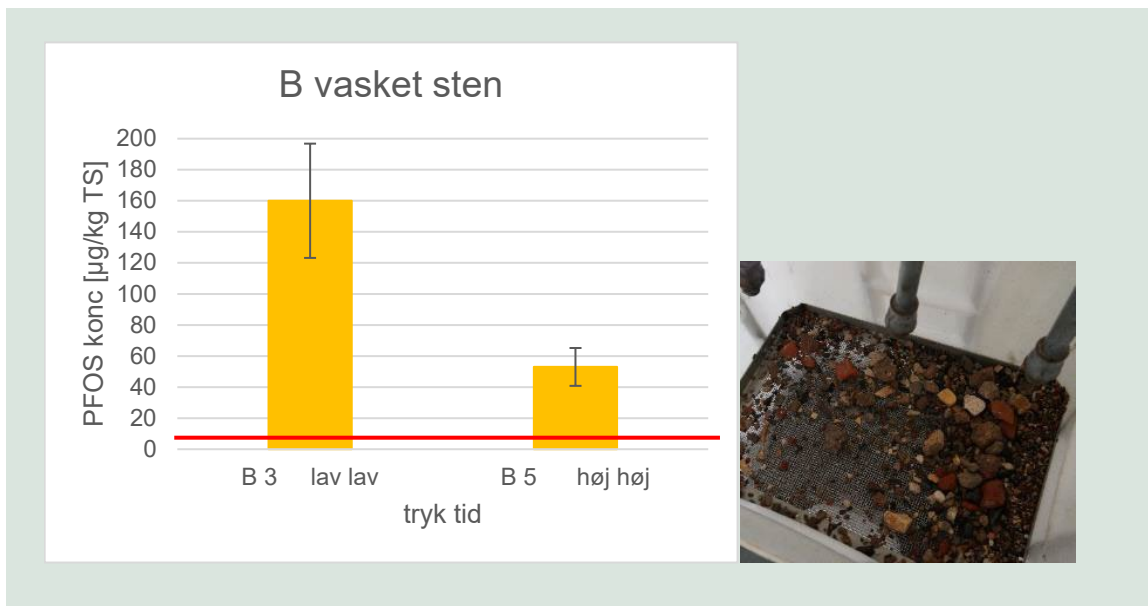
FIGUR 4. PFOS-koncentrationen i den vaskede sandfraktion ved de otte delprøver. Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23\%$, mens usikkerheden i forsøgsgennemførelsen må antages at være meget højere. Den røde linje repræsenterer kvalitetskriteriet for jord for PFAS sum 4 på $10\ \mu\text{g}/\text{kg TS}$. Stiplet andel = PFOS-bidrag fra resterende vaskevand i sandet. Nederst: Billede af sand fra cyklonen afvandes i sandafvanderen.

PFOS-reduktionen i sandfraktionen over for råjordfraktionen lå på 96% i gennemsnit (standardafvigelse $0,95$). Den stiplede andel af søjlerne ($14 - 45\%$) repræsenterer det resterende vaskevand i sandfraktionen efter vask, som ville kunne skylles ud ved en enkelt skylning af sandet. PFAS-koncentrationen efter vask ligger stadigvæk en anelse over grænseværdien, og en gentagen vask af sandet ville være ønskelig, omend ikke mulig i nærværende projekt, for at afklare om sandet efterfølgende ville overholde grænseværdien.

PFDS, som var indeholdt med $1,9\ \mu\text{g}/\text{kg TS}$ i råjorden, blev fjernet med 90% i gennemsnit (standardafvigelse 2%), mens PFDA, som var indeholdt med $1,25\ \mu\text{g}/\text{kg TS}$ i gennemsnit, ikke længere kunne detekteres i sandet. Der henvises til data i bilagene.

Der kunne ikke identificeres signifikant forskel mellem vask med de forskellige yderpunkter af parametrene, hvilket betyder, at der i det givne parameterinterval (som var udvalgt ud fra teknisk/fysisk opnåelige minimums- og maksimumsværdier) ikke kunne ses forskel mellem de to parametre. Vask ved lavt tryk og hurtig tilsætning af jorden var lige så effektiv ved lavere vandforbrug som vask ved højt tryk og langsom tilsætning af jord, der kræver mere vand og energi. Muligvis ville der have vist sig en forskel ved vask af mere lerholdig jord, som desværre ikke var til rådighed i de gennemførte forsøg.

Prøver af vaskede sten blev udtaget ved to delprøver (parameter lav lav og høj høj), og PFOS-koncentrationen i stenfraktionen er vist i FIGUR 5.



FIGUR 5. PFOS-koncentrationen i den vaskede stenfraktion ved to delprøver med henholdsvis lavt vandtryk og hurtig jordtilsætning (lav lav) og modsat (høj høj). Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23 \%$, mens usikkerheden i forsøgsgennemførelsen må antages at være meget højere. Den røde linje repræsenterer grænseværdien for PFAS sum 4 på $10 \mu\text{g}/\text{kg TS}$.

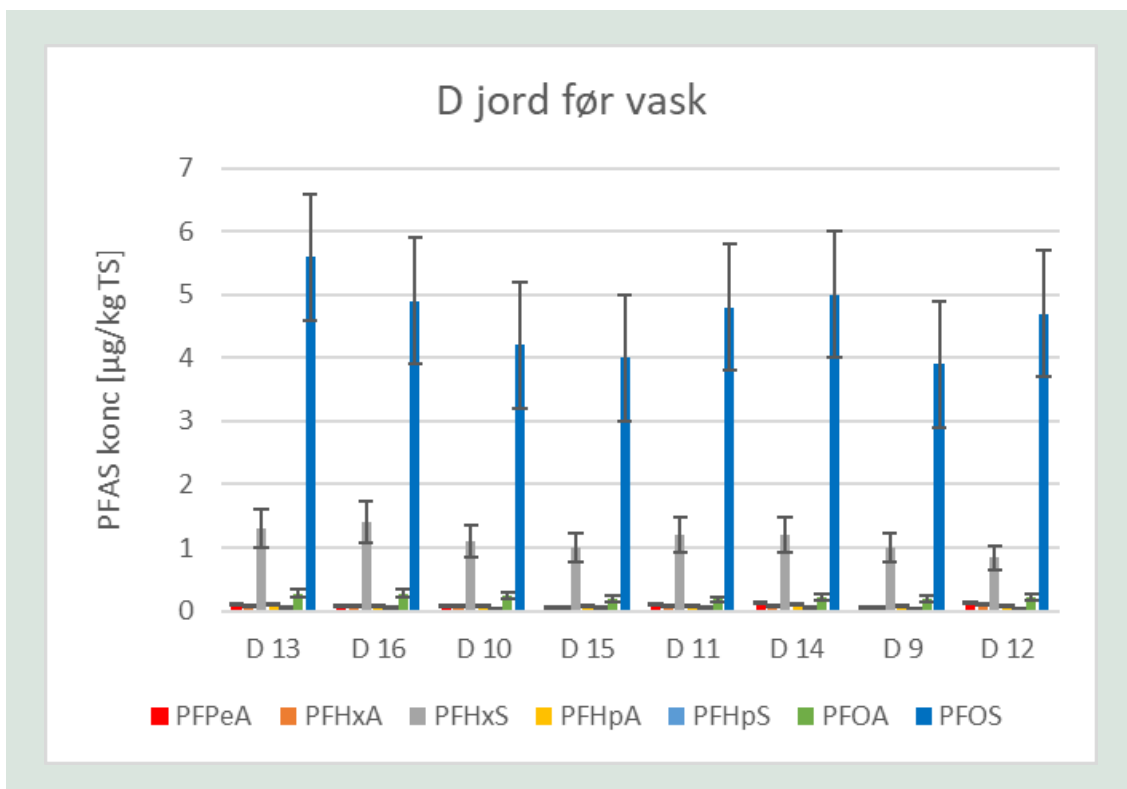
PFOS-reduktionen lå på 88 % for B 3 og 96 % for B 5. Højt vandtryk og langsom jordtilsætning (høj høj) viste en signifikant højere vaskeeffektivitet, selvom PFOS i stenfraktionen stadigvæk lå over grænseværdien. Det forventes dog, at vaskeeffektiviteten i storskalavaskeren er væsentligt højere, da stenene her har meget længere berøringsstid med vandet og bliver udsat for mekanisk påvirkning, som ikke kunne efterlignes i pilotanlægget.

Råjorden, den vaskede sand og de vaskede sten er vist i FIGUR 6.



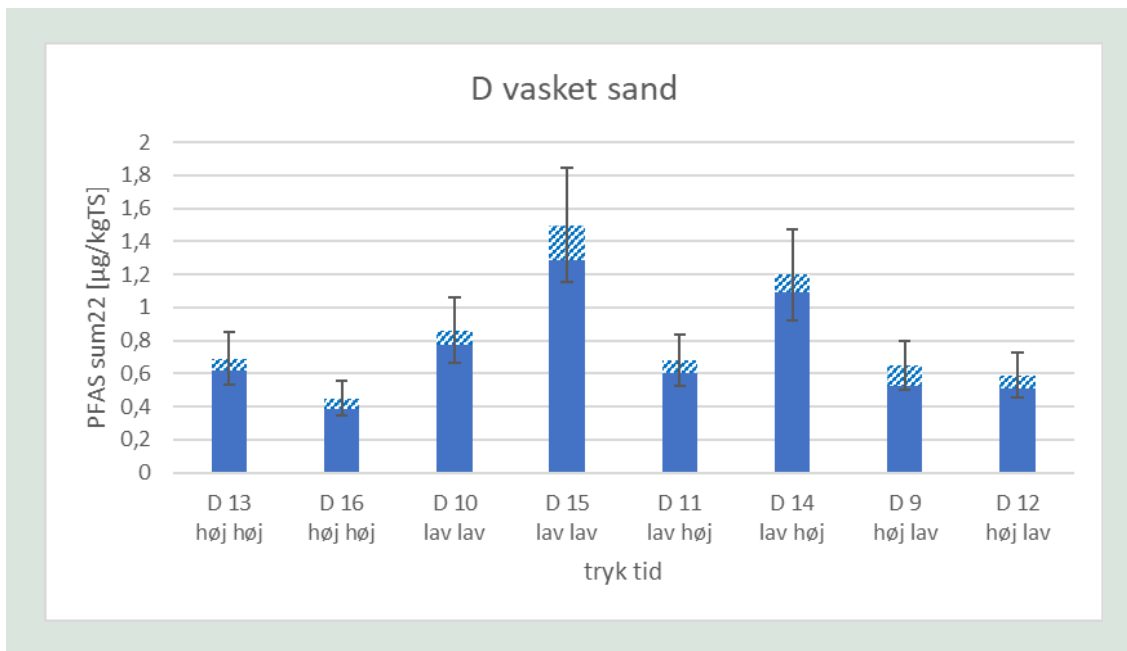
FIGUR 6. Fra højre mod venstre råjord, vasket sand og vaskede sten.

Resultaterne for vask af D-jord er vist i FIGUR 7 og FIGUR 8.



FIGUR 7. PFAS-koncentrationen i råjorden ved de otte delprøver. Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23\%$.

I D-jorden dominerede PFOS og PFHx. PFAS-koncentrationen lå allerede under grænseværdien for sum 4 ($10 \mu\text{g}/\text{kg TS}$).

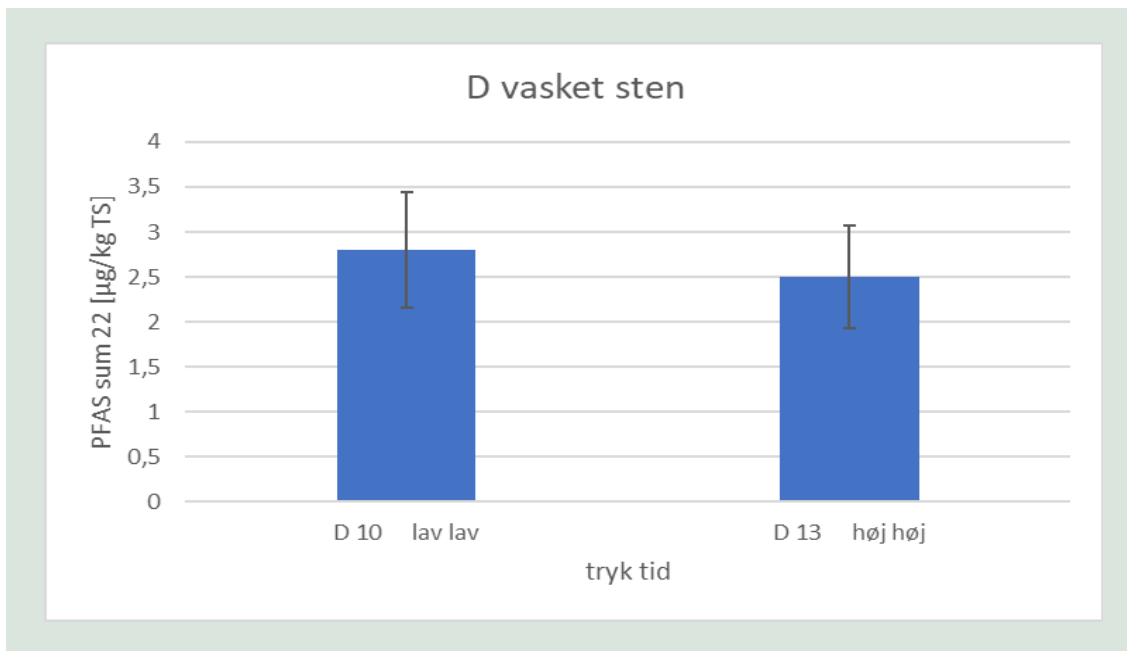


FIGUR 8. PFAS-koncentrationen i den vaskede sandfraktion ved de otte delprøver. Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23\%$, mens usikkerheden i forsøgsgennemførelsen må antages at være meget højere. Stiplet andel = PFAS-bidrag fra resterende vaskevand i sandet.

Reduktionen af PFOS i sandfraktionen overfor råjorden lå ved 85 % for PFOS (standardafvigelse 7 %) og 87 % for PFHxS (standardafvigelse 6 %). Alle andre påviste PFAS i råjorden lå under detektionsgrænsen i den vaskede sandfraktion. Den gennemsnitlige reduktion af PFAS sum 22 lå på 86 % (standardafvigelse 7 %). 9 - 14 % af PFAS i sandet kan forklares med resterende vaskevand i sandfraktionen, som er repræsenteret gennem den stiplede andel i søjlerne.

Også ved lave PFAS-koncentrationer i jorden var det muligt at opnå en væsentlig PFAS-reduktion gennem vask. Heller ikke her kunne der påvises statistisk sikker forskel på de forskellige vaskeparametres effektivitet.

Prøver af vaskede sten blev udtaget ved to delprøver (parameter lav lav og høj høj), og PFAS-koncentrationen i stenfraktionen er vist i FIGUR 9.



FIGUR 9. PFAS-koncentrationen i den vaskede stenfraktion ved to delprøver med henholdsvis lavt vandtryk og hurtig jordtilsætning (lav lav) og modsat (høj høj). Fejllinjerne repræsenterer analyseusikkerheden $U_{rel} = 23 \%$, mens usikkerheden i forsøgsgennemførelsen må antages at være meget højere.

PFAS-reduktionen (sum 22) lå på 52 % for D 10 og 67 % for D 13. De forskellige parametre var ikke signifikant forskellige. Også her forventes der en væsentligt højere vaskeeffektivitet i fuldskalavaskeren grundet længere opholdstid i vandet og væsentligt større mekanisk påvirkning.

7.4 Repræsentativ prøvetagning

På tre af de fire identificerede lokationer blev delprøver af hver grab jord udtaget og poolet til den 1 m³ jordprøve, der blev fragtet til Nordic Waste og brugt i vaskeforsøgene. På D-lokaliteten blev prøven udtaget af underleverandør under ukendte forhold.

Alle jord- og sandprøver hos Nordic Waste blev udtaget efter princippet for repræsentativ prøvetagning. Vaskevandsprøven blev udtaget efter endt forsøg og efter kraftig omrøring.

7.5 Effekt af rengøring af anlægget

Da pilotanlægget ikke kunne adskilles mellem hver vask af delprøve, blev afsmitningen af PFAS fra den stærkt PFAS-forurenede B-jord estimeret efter sidste delprøvevask ved at vaske 'ren' jord (uden PFAS) i anlægget. Efter en grundig rengøring af pilotanlægget, hvor alle dele blev afmontering og grundigt vasket med vand, blev en ny delprøve 'ren' jord vasket i anlægget for at verificere effekten af rengøringen. Se TABEL 3.

TABEL 3. PFOS-koncentration i vasket sand og slamfraktionen (vandandelen) efter sidste delprøve B-jordvask, en efterfølgende vask af ren jord og en vask mere af ren jord efter grundig rengøring af pilotanlægget.

	PFOS-koncentration ved sidste vask af B-jord	Ren jord efter almindelig skylning	Ren jord efter grundig rengøring af pilotanlægget
Vasket sand [µg/kg TS]	68	1,8	0,074

Slamfraktion [ng/l]	77.000	700	57
---------------------	--------	-----	----

Usikkerheden, der blev tilføjet gennem overførsel af PFAS fra vask til vask, var så lille, at den udgør en brøkdel af analyseusikkerheden. Det er dog vigtigt at gennemføre grundig rengøring ved skift af jord med høje PFAS-koncentrationer til jord med lave PFAS-koncentrationer.

8. Behandling af slamfraktionen

Slamfraktionen består af silt, organiske partikler og opløst organisk stof samt vaskevandet. Vandet ønskes genanvendt til vask for at spare på ressourcen og for at minimere det volumen, der skal sendes til destruktion. Slamfraktionen blev derfor behandlet med koagulerings-/flokkuleringskemi efterfulgt af bundfældning, hvorefter vandfraktionen blev rensset på en resinkolonne

8.1 Behandling af slamfraktionen

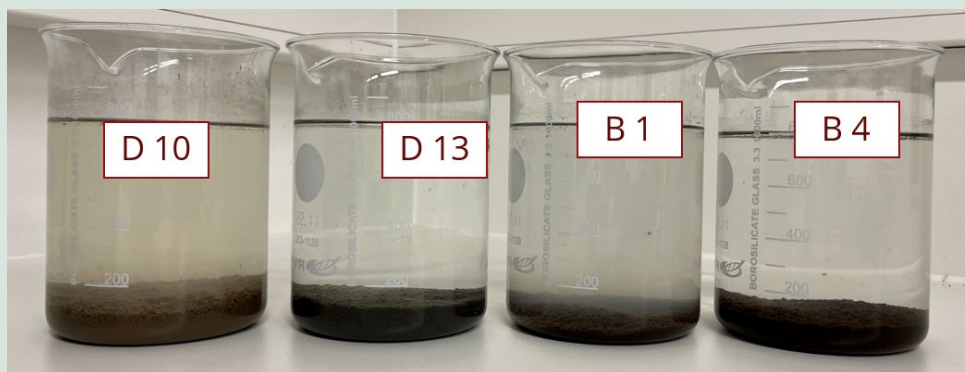
For at kunne genanvende vaskevandet til vask af jord skulle vandet separeres fra slammet og renses for PFAS. Slammet skal sendes til destruktion, som er en betydelig omkostning, hvorfor slammængden skal holdes så lille som muligt.

Følgende forsøg med bægerglas blev gennemført med slam/vaskevand-fasen af begge jordtyper med parametrenes yderpunkter (høj høj og lav lav). Koaguleringsmidlet polyaluminiumklorid (PAX) 500 ml/m³ blev tilsat under omrøring efterfulgt af en polymer for at binde specielt PFAS (Fluorloc, 500 ml/m³ ved B-slam, 200 ml/m³ ved D-slam), og polymer (22,5 ml/m³ ved B-slam, 15 ml/m³ D-slam). Resultaterne efter to timers bundfældningstid er vist i TABEL 4 og FIGUR 10.

TABEL 4. Effekt af koagulering/flokkulering på slamfraktionen.

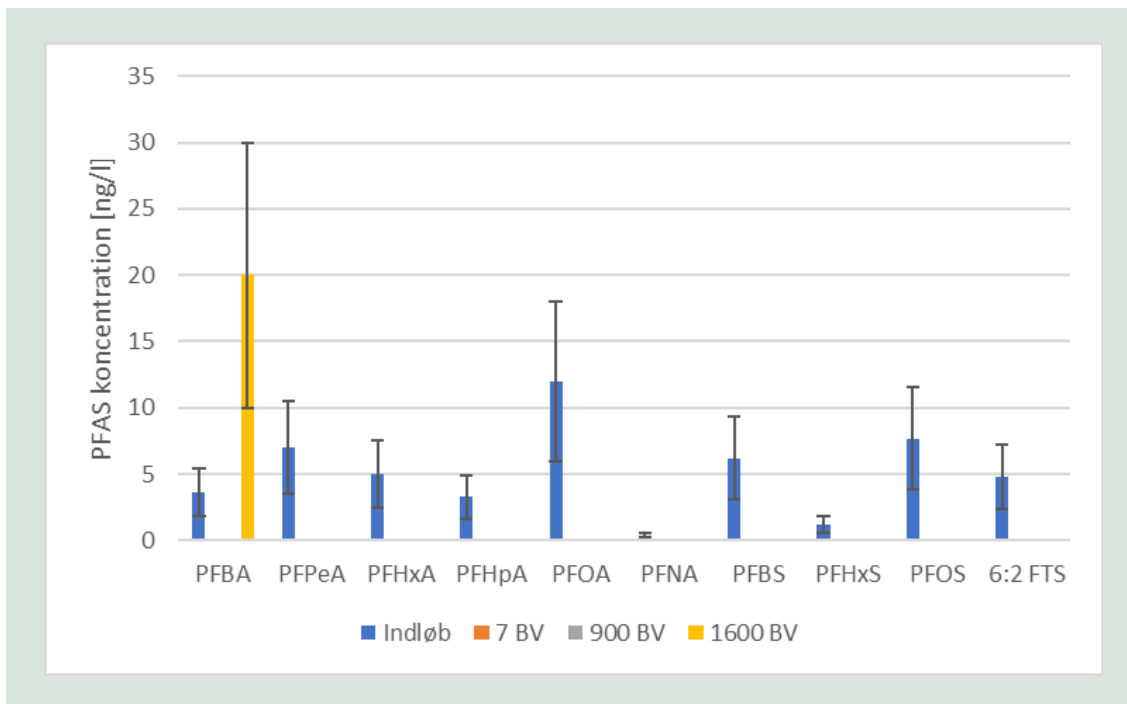
Jord	D 10	B 4	D 13	B 1
Parametre (tryk tid)	lav lav	lav lav	høj høj	høj høj
Vandforbrug ved vask af 20 kg jord [l]	110	110	317	317
Slamandel efter flokkulering [%]	11	7	7	4
Slam efter flokkulering [l]	12,1	7,7	22,2	12,7
PFAS sum 22 i vaskevandet [ng/l]	440	110.000	290	39.000
PFAS sum 22 i vaskevandet efter flokkulering [ng/l]	9,3	650	7	3.400
PFAS-fjernelse igennem flokkulering [%]	98	99	97	91

Behandling af slam/vand-fraktionen ved koagulering/flokkulering fjernede mellem 91 % og 97 % af PFAS fra vandfasen. Ved vask af 20 kg jord og efterfølgende koagulering/flokkulering af slam/vaskevandsfasen blev i forsøgene alt efter anvendte vaskeparametre (lav lav eller høj høj) dannet mellem 7,7 og 22,2 l slam, der skal sendes til destruktion. Også i forhold til dannet slammængde, der skal destrueres, er vaskeparametrene lav lav at foretrække.



FIGUR 10. Slam/vaskevandsfraktion vaskeforsøgene (øverst); koagulerings-/flokuleringsforsøg (nederst). Måling af slammængden blev gennemført i måleglas.

Vaskevandet fra B-jord (300 l) blev efter koagulering/flokkulering renset ydermere ved hjælp af en anionisk ionbytteresinkolonne (Purolite PFA694E), og resultatet er vist i FIGUR 11. Indløbskoncentrationen af PFAS lå langt under de viste laboratorieforsøg, sandsynligvis fordi koagulering/flokkulering kunne gennemføres mere effektivt i større målestok. Koncentrationen i D-vaskevandet var efter koagulering/flokkulering så lav (11 ng/l PFAS sum 22), at kolonneforsøg ikke var relevante.



FIGUR 11. Kolonneforsøg med resiner af forbehandlet B-vaskevand. PFAS-koncentrationer for indløbsvandet og udløbsvandet efter hhv. 7, 9 og 1600 BV er vist.

Først efter 900 BV skete gennembrud af kortkædede carboxylsyrer (PFBA). Det kan ikke umiddelbart forklares, at PFBA-gennembruddet viser højere koncentration end indløbsvandet, men det formodes, at usikkerheden hos analyselaboratoriet var højere i de lave koncentrationer, end den var angivet af laboratoriet (fejllinjen).

Ud fra resultaterne var det muligt at rense vaskevandet også fra den stærkt kontaminerede jord, ikke kun til genbrug til vaskeformål, men også til udledning til renseanlæg. Her forventes dog, at adsorbenten i kolonnen skal skiftes ofte.

Behandling af PFAS-forurenet jord til recirkulering af råstoffer

Projektet 'Behandling af PFAS-forurenet jord til recirkulering af råstoffer' blev gennemført fra september 2022 til januar 2024. Projektets hovedformål var at udvikle en jordvaskeenhed til rensning af PFAS-forurenet jord og genbrug af råstoffer som sand og sten. Projektet blev udført i et samarbejde mellem Nordic Waste A/S, Vandrensning.com ApS, Envytech Solutions AB og Teknologisk Institut.

Det vigtigste resultat fra projektet er, at jordvask kan anvendes til at rense den modtagne, forholdsvis sandede jord forurenet med langkædede PFAS-forbindelser. Projektet viste, at det var muligt at opnå høje PFOS-reduktioner (96 %) ved høje koncentrationer i råjorden. Dog var de endelige koncentrationer i det vaskede sand stadig let forhøjede sammenlignet med grænseværdierne, hvilket indikerer, at genvask kan være nødvendig.

Ydermere blev det konkluderet, at vask ved lavt tryk og hurtig tilsætning af jorden var lige så effektiv som vask ved højt tryk og langsom tilsætning af jord, der kræver mere vand og energi.

Endelig blev det observeret, at det selv ved lave PFAS-koncentrationer i jorden var muligt at opnå en væsentlig PFAS-reduktion ved en vaskeproces med vand.

Resultaterne i nærværende rapport viser, at PFAS var let at vaske ud af jorden, hvilket også understøttes af fund af høje PFAS-koncentrationer i perkolat fra deponier (data er præsenteret i rapporten for MUDP-projektet PFASinator - Sustainable and cost-effective technology for PFAS-removal from landfill leachate). Det vil derfor generelt være muligt ved rensning med vand at fjerne selv høje PFAS-koncentrationer fra sandede jorde og dermed undgå grundvandsforurening og spredning af PFAS fra disse punktkilder.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk