

Til

Dansk Restprodukt Håndtering (DRH), Branchesamarbejdet for Genanvendelse af Restprodukter, arbejdsgruppe for flyveaske

Document type

Report

Dato

Mar 2026

ALTERNATIVE BEHANDLINGS- LØSNINGER FOR FLYVEASKE SCREENING AF BEHANDLINGSMETODER

ALTERNATIVE BEHANDLINGSLØSNINGER FOR FLYVEASKE SCREENING AF BEHANDLINGSMETODER

Project name **EFW BRANGR Technical Assistance WtE fly ash (DK)**
Project no. **1100043274-002**
Recipient **GAR**
Document type **Report**
Version **2.2, godkendt til offentliggørelse**
Date **2026/03/20**
Prepared by **TOH**
Checked by **JOF**
Approved by **Flyveaskegruppen**
Description **Alternative behandlingsmetoder for flyveaske**

INDHOLD

1.	Indledning	3
2.	Behandling af flyveaske i Danmark	4
3.	Behandlingsløsninger	5
3.1	Alternativ 1 – Tør cementstabilisering	5
3.2	Alternativ 2 – CO ₂ -stabilisering	5
3.3	Alternativ 3 – Vask med vand	6
3.4	Alternativ 4 – Sur vask	8
3.5	Alternativ 5 – avanceret sur vask	10
4.	Evaluering af behandlingsløsninger	12
4.1	Evalueringer	13
4.1.1	Alternativ 1 – Tør cementstabilisering	13
4.1.2	Alternativ 2 – CO ₂ -stabilisering	14
4.1.3	Alternativ 3.1 – Vask m. vand og cementstabilisering	15
4.1.4	Alternativ 3.2 – Vask m. vand og deponering	16
4.1.5	Alternativ 3.3 – Vask m. vand og genanvendelse i beton	17
4.1.6	Alternativ 4.1 – Vask m. surt vand og cementstabilisering	18
4.1.7	Alternativ 4.2 – Vask m. surt vand og deponi	19
4.1.8	Alternativ 4.3 – Vask m. surt vand og genanvendelse i beton	20
4.1.9	Alternativ 5 – Avanceret sur vaskeproces	22
4.2	Resultater	23
5.	Anbefalet koncept	25

1. INDLEDNING

Branchesamarbejdet for Genanvendelse af Restprodukter (GAR) har engageret Rambøll til at gennemføre et udviklingsprojekt for at undersøge mulighederne for øget genanvendelse af flyveaske fra affaldsenergianlæg. Udviklingsprojektet består af tre delopgaver.

- A. Generel vidensopbygning: Kriterier, spredning, miljøvurdering
- B. Optimering (/minimering) af flyveaskemængder: Askekaraktistika og fordeling 2./3.-træk
- C. Test af nye løsninger: Test af alternative behandlingsløsninger

Følgende notat indgår som del af delopgave C, *Test af nye løsninger*, beskrevet under ATR 11C. Delopgaven har som formål at vurdere potentialet for "simple" behandlingsløsninger for flyveasken som alternativ til de mere "etablerede" og typisk mere komplekse løsninger.

Projektets leverancer for delopgave C er i form af to notater der inkluderer følgende:

- *C1, Beskrivelse af alternative behandlingsløsninger*
- *C2, Udredningsnotat af primær løsning*

Følgende notat beskriver aktivitet C1. Notatet indeholder en beskrivelse af alternative behandlingsløsninger, inkluderet den påtænkte anvendelse af slutprodukter, økonomi og potentiale for fuldskala løsning.

Det vil foretages en vurdering af, hvilken løsning der er mest attraktiv baseret på økonomi, kompleksitet, implementeringshorisont og vurdering af anvendelsesmuligheder for slutprodukter/evt. restprodukter.

Løsningen skal være simpel at installere og drifte, og der tages sigte på mulig implementering og drift af installationen indenfor kort tid (få år) for at sikre en national behandlingsløsning, hvis de nuværende håndteringsmetoder begrænses.

Løsningen kan eventuelt være en midlertidig løsning, som på sigt kan erstattes af andre løsninger, som i mellemtiden er udviklet og optimeret. Derfor lægges også vægt på, at den nødvendige investering er begrænset.

2. BEHANDLING AF FLYVEASKE I DANMARK

Forbrænding af affald genererer flere restproduktstrømme, heriblandt slagge og flyveaske. Slaggen består af den ikke-brændbare del fra affaldet, og i Danmark genanvendes denne fraktion under regulering af restproduktbekendtgørelsen. Flyveaske dannes under rensningen af røggas på anlæggene og klassificeres som farligt affald, grundet indholdet af salte, tungmetaller, organiske forureningskilder, samt den høje pH-værdi. Det er derfor ikke muligt at deponerer flyveasken ubehandlet, da man risikerer at skadelige stoffer frigives og påfører skade på mennesker og miljøet.

Det er i dag ingen alternativer til behandling af flyveaske i Danmark, og flyveaske bliver derfor eksporteret til behandlingsfaciliteter i udlandet. Tyskland og Norge er de to primære modtagere af flyveaske fra danske forbrændingsanlæg. I Tyskland kan flyveasken bruges som genopfyldningsmateriale i saltminer. I Norge modtages flyveasken af NOAH med formål at neutralisere surt affald (primært svovlsyre), og slutproduktet af neutraliseringsprocessen er en gipsopløsning, der er velegnet som fyldmateriale til rehabilitering af kalkbruddet på Langøya i Oslofjorden udenfor Holmestrand.

Det er indikationer på, at lagerkapaciteten hos NOAH og i de tyske saltminer er begrænset, og at de vil lukke muligheden for deponi af flyveaske i fremtiden, ligesom der er politiske kræfter, der arbejder for at eksport af farligt affald som udgangspunkt skal være forbudt inden for EU. Det er derfor relevant at undersøge muligheder for at kunne håndtere flyveaske lokalt. Etablering af en dansk deponiløsning er derfor undersøgt som del af dette studie, men med et stadig større fokus på cirkulær økonomi er behandling af flyveaske for genanvendelsesformål også belyst.

Mulige behandlingsmetoderne dækker over både forskellige former for stabilisering/neutralisering for senere deponering eller muligheder for genanvendelse af flyveasken.

3. BEHANDLINGSLØSNINGER

I følgende afsnit beskrives alternative behandlingsløsninger til nuværende etablerede metoder for flyveaske fra danske forbrændingsanlæg. De præsenterede alternativer er udvalgt på baggrund af ønske om en simpel løsning, som kan implementeres relativt hurtigt, hvis man står uden en afsætningsmulighed inden for en kort tidshorisont.

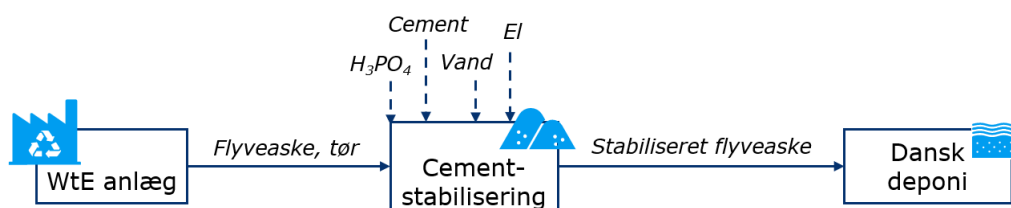
Rambøll har defineret fem alternative metoder (med underkategorier), kategoriseret fra meget simpel til kompleks.

3.1 Alternativ 1 – Tør cementstabilisering

Tør cementstabilisering anses som den mest simple metoden, da den ikke baseres på vask og dermed ikke stiller krav til et rensningsanlæg for spildevand.

Cementstabilisering er en velafprøvet metode for stabilisering af en række forskellige materialer, heriblandt aske. Cementstabilisering af flyveaske foregår ved, at flyveaske blandes med cement, sand og vand, og potentielt fosforsyre til neutralisering af asken og binding af tungmetaller.

Et simpelt procesflowdiagram for tør cementstabilisering er illustreret i Figur 1.



Figur 1, Procesdiagram for tør cementstabilisering

Det forventes at den cementstabiliserede flyveasken vil være egnet til deponi i Danmark, under forudsætning om, at tungmetaller og andre uønskede stoffer ikke vil frigives/udvaskes til nærmiljøet.

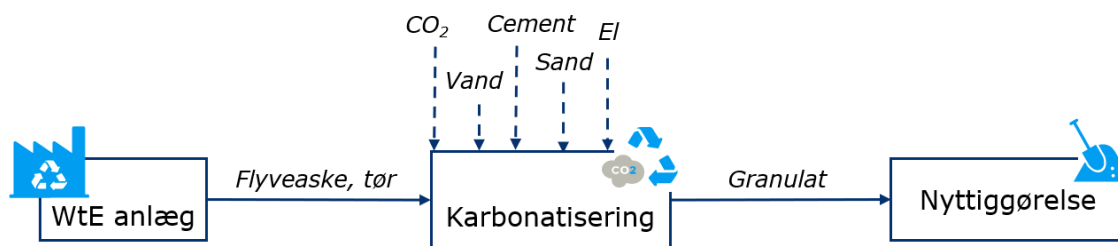
3.2 Alternativ 2 – CO₂-stabilisering

Stabilisering af flyveaske vha. CO₂ er en afprøvet teknologi i kommerciel drift i Storbritannien. Der anvendes typisk CO₂ fra røggassen til at karbonatisere asken (alternativt CO₂ fra trykflaske), med tilsætning af vand og evt. sand, kalk og/eller cement. Ved karbonatiseringen reagerer askens basiske bestanddele med CO₂ og bliver til karbonater. Dette betyder, at pH af eluat fra asken reduceres fra et niveau på typisk 11-12 til tæt på neutralt i produktet, hvorfor tungmetaller bliver mindre udvaskelige. Processen fjerner ikke noget faststof, og derfor er det fulde indhold af tungmetaller, dioxin mm. til stede i produktet. Behandlingen indebærer også – afhængig af den konkrete proces – at der opbygges pellets som det færdige produkt.

Den væsentligste leverandør af teknologien er O.C.O. Technology Limited (tidligere C8, carbon-eight). Der er også andre leverandører af CO₂-stabiliseringsprocesser.

Ved C8-processen dannes pellets med diameter på nogle millimeter, som i England anvendes som tilslag til botonprodukter.

Et simpelt procesflowdiagram for CO₂-stabilisering er illustreret i Figur 2.



Figur 2, Procesdiagram for CO₂ stabilisering

C8-processen har fået "accept af" End-of-Waste status i England for aggregat produceret med røggasrensningsrestprodukt fra forbrændingsanlæg, ved brug begrænset til aggregat til betonprodukter, hvis anvendelse der dog ikke er restriktioner på eller krav om registrering af. "Accept af" skal forstås således, at et udvalg til bedømmelse af End-of-Waste (EoW) ikke har haft bemærkninger til den fremsendte dokumentation, og der er dermed ikke tale om en formel godkendelse. Dens gyldighed er mindre stærk end en egentlig godkendelse, da den kan prøves ved en domstol. Denne "accept" gælder dog ikke uden for Storbritannien (og det er uklart om den gælder uden for England).

Det vurderes, at produktet fra karbonatiseringsprocessen kan deponeres eller nyttiggøres. Det må bemærkes, at der i Danmark stilles krav fra branchen (dvs. nærværende arbejdsgruppe) om en begrænset og reguleret anvendelse af karbonatiseringsproduktet for at sikre, at produktet og dermed flyveaskens indhold af tungmetaller mm. ikke spredes ukontrolleret. Dette svarer til princippet for den danske slagge-genanvendelse (jf. restproduktbekendtgørelsen). I det følgende er regnet med anvendelse af produktet som tilslag til betonprodukter med kontrolleret anvendelse. Det er således en forudsætning for at igangsætte nærmere undersøgelser, at produktet ikke anvendes på mere vidtgående måde.

3.3 Alternativ 3 – Vask med vand

Der skelnes mellem tre behandlingsmuligheder vha. vask af flyveasken med vand:

3.1 - Vask med vand efterfulgt af cementstabilisering (deponi), se Figur 3.

3.2 - Vask med vand (deponi), se Figur 4.

3.3 - Vask med vand efterfulgt af genanvendelse i beton (genanvendelse), se Figur 5.

For alle scenarier gælder en indledende vask af flyveasken med vand. Ved at vaske flyveasken vil vandopløselige salte udvaskes, hvilket begrænser risikoen for miljøeffekter ved efterfølgende håndtering. Vask med vand vil alene opløse vandopløselige salte (og tungmetaller) som klorider af calcium, natrium og kalium. Dermed opløses kun en mindre del af tungere opløselige salte og tungmetaller, og det er potentielt nødvendigt at stabilisere asken, eksempelvis gennem cementstabilisering, inden asken kan deponeres på et dansk deponi. Ved vask med vand vil flyveaskens cementlignende (puzzolane) egenskaber bibeholdes, og det forventes, at man må tilsætte en mindre mængde cement ved cementstabilisering af vasket produkt end ved stabilisering uden forudgående vask (alternativ 1). I det videre arbejde må deponeringsklasse for restproduktet fra scenarier 3.1 og 3.2 undersøges, herunder om den vaskede flyveaske kan blive ikke-farligt affald.

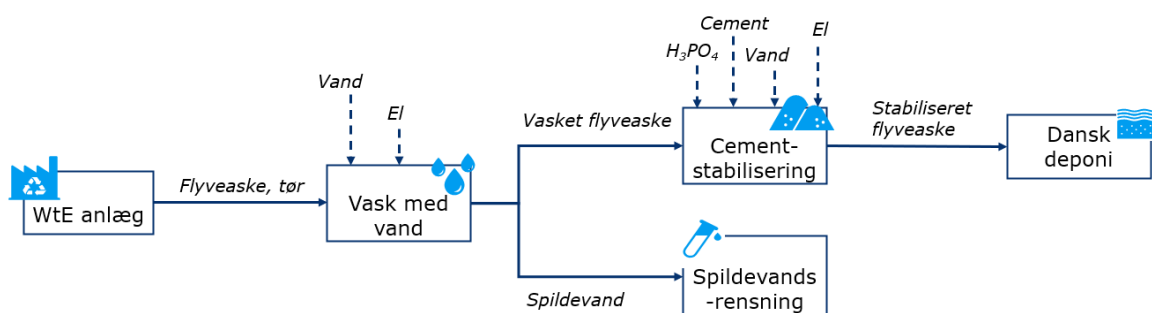
Alternativt er det potentielt mulig at anvende den vaskede flyveaske i betonproduktion, men det er ukendt om flyveasken på dette stadie er af tilstrækkelig renhed og hvilke betingelser, der skal opfyldes ved genanvendelse af vasket flyveaske i beton. Det må forventes, at asken som minimum skal leve op til betingelser for ikke-farligt affald, og der kan hentes inspiration fra de normer og krav, der gælder for anvendelse i beton af flyveaske fra kraftværker fyret med kul/biomasse. I lighed med Alternativ 2 (CO₂-stabilisering) ønskes det ikke, at produktet og dermed flyveasken spredes ukontrolleret.

Ved vask med vand vil opløsningen normalt være basis med pH typisk 10-12, og der opløses de salte, der er let-opløselige ved de betingelser, dvs. først og fremmest klorider med natrium, kalium og calcium. Som udgangspunkt opløses omkring 25% af faststoffet. Tungmetaller opløses i begrænset omfang, idet opløsning af de fleste tungmetallforbindelser kræver sure forhold, hvis de da ikke er bundet i mineraler, der ikke er opløselige i syre. Tungmetaller og deres forbindelser har dog meget forskellige opløseligheder, så der vil være undtagelser til de generelle tendenser.

Alle alternative behandlingsscenarier med vask med vand stiller krav om et rensningsanlæg for spildevand og deraf følgende udledning af rensed spildevand og håndtering af en mindre mængde tungmetallholdigt slam fra denne behandling.

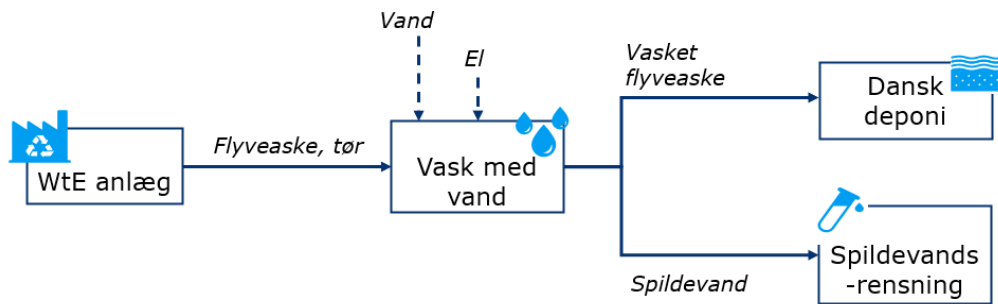
Mængden af spildevand kan reduceres eller udledning kan helt bortfalde ved udkrystallisering/opkoncentrering af opløste salte fra det rensede spildevand og recirkulering eller fordampning af vandet. I det følgende er forudsat, at det rensede spildevand udledes.

Et simpelt procesflowdiagram for vask af flyveaske efterfulgt af cementstabilisering og deponi er illustreret i Figur 3. Det forventes, at den nødvendige mængde af cement vil være væsentligt lavere end ved stabilisering af den rå, ikke-vaskede flyveaske, da indholdet af opløselige salte, herunder tungmetalsalte, vil være reduceret, så udvaskningspotentialt er reduceret. Asken forventes selv at bidrage til afbinding, da de puzzolane egenskaber forventes bibeholdt ved den blide påvirkning af vand.



Figur 3, Procesdiagram for vask af flyveaske med vand og cementstabilisering til deponi (3.1)

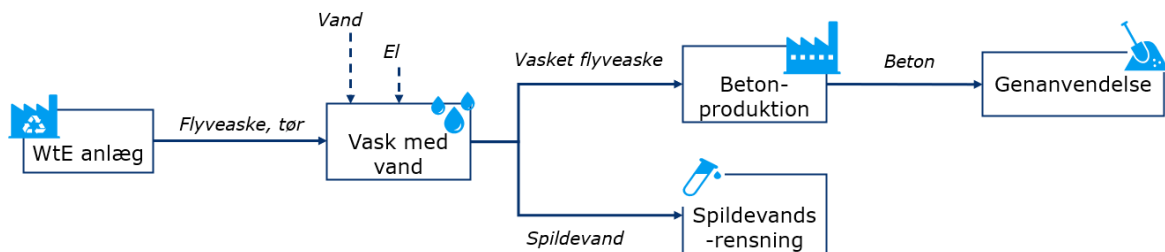
Et simpelt procesflowdiagram for vask af flyveaske til deponi er illustreret i Figur 4.



Figur 4, Procesdiagram for vask af flyveaske med vand til deponi (3.2)

Alternativ 3.2, vask med vand med deponering af det vaskede produkt svarer til RagnSells Ash-to-Salt anlæg i Högbysörp, Sverige, hvor der udvindes salte fra spildevandet ved behandling af restprodukt fra tørt/semi-tört röggasrensning. Fra anlægget udledes ikke spildevand, da vandet fordampes i processen eller indgår i calciumklorid brine, som er et af produkterne. Den vaskede aske tilledes det lokale deponi.

Et simpelt procesflowdiagram for vask af flyveaske til genanvendelse i betonproduktion er illustreret i Figur 5.



Figur 5, Procesdiagram for vask af flyveaske med vand til betonproduktion (3.3)

3.4 Alternativ 4 – Sur vask

Der skelnes mellem tre behandlingsmuligheder vha. sur vask af flyveasken:

- 4.1 - Vask med surt vand efterfulgt af cementstabilisering (deponi), se Figur 6.
- 4.2 - Vask med surt vand (deponi), se Figur 7.
- 4.3 - Vask med surt vand efterfulgt af genanvendelse i beton (genanvendelse), se Figur 8.

For alle scenarier gælder en indledende vask af flyveasken med surt vand, hvor det antages, at skrubbervæske fra det enkelte forbrændingsanlæg kan anvendes. Ved at vaske flyveasken med surt vand vil både vandopløselige salte og en stor andel af tungmetallerne udvaskes, hvilket begrænser risikoen for miljøeffekter ved efterfølgende håndtering af den vaskede aske. Det forventes derfor, at den vaskede flyveaske er af en højere renhedsgrad end ved vask med vand (Alternativ 3). Potentielt vil det stadig være nødvendigt at stabilisere asken, eksempelvis gennem cementstabilisering, inden den kan deponeres på et dansk deponi. Vask med surt vand vil begrænse

flyveaskens cementlignende egenskaber (puzzolanitet) noget. Der forventes alligevel behov for en mindre mængde cement (per kg rå-áske) end ved vask med vand (Alternativ 3.1 og 3.2), da syreopløselige tungmetaller er fjernet, og udvaskningspotentialer derfor væsentligt reduceret. Der må foretages en vurdering for deponeringsklasse af restproduktet fra scenario 4.1 og 4.2, herunder om det opfylder krav til ikke-farligt affald.

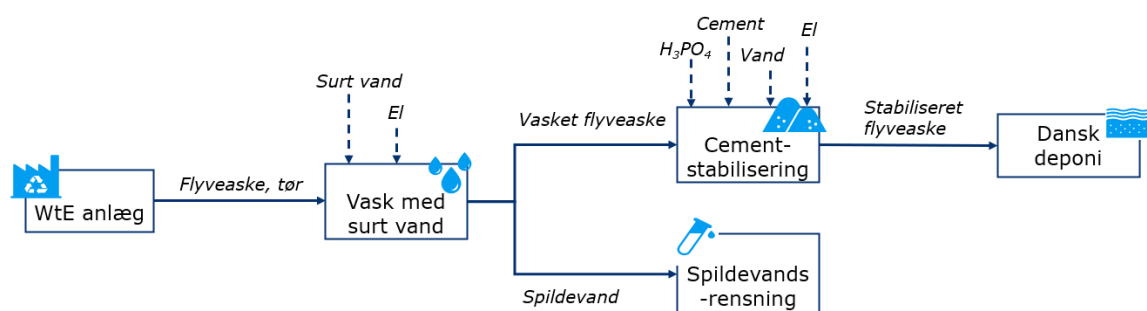
I lighed med Alternativ 3.3 er det potentielt muligt at anvende den vaskede flyveaske i betonproduktion, men det er ukendt, om flyveasken på dette stadie er af tilstrækkelig renhed og hvilke betingelser, der skal opfyldes ved genanvendelse af flyveaske i beton. Det må forventes, at asken som minimum skal leve op til betingelser for ikke-farligt affald. I lighed med Alternativ 2 (CO₂-stabilisering) ønskes det ikke, at produktet og dermed flyveaskens indhold af tungmetaller spredes ukontrolleret.

Alle alternative behandlingsscenarier med sur vask stiller krav til et rensningsanlæg for spildevand med deraf følgende udledning af rensat spildevand og håndtering af en mindre mængde tungmetaltholdigt slam fra denne behandling.

Det forudsættes dog, at vaskeanlægget placeres ved et forbrændingsanlæg med sur skrubber, som dels kan levere syre til vaskeprocessen og dels i forvejen har et spildevandsrensingsanlæg. Derved kan opnås væsentlige besparelser ved etablering og drift i forhold til etablering uden denne synergi. Bl.a. spares kalk til neutralisering i renseprocessen, når asken neutraliserer det sure skrubberspildevand.

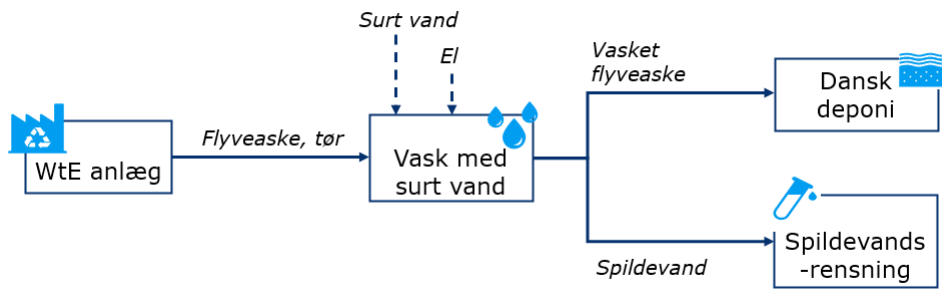
Som ved vask med vand er det muligt at udskille salte fra det rensede spildevand og derigennem reducere mængden, saltholdigheden eller helt undgå spildevandsudledning.

Et simpelt procesflowdiagram for sur vask af flyveaske efterfulgt af cementstabilisering og deponi er illustreret i Figur 6.



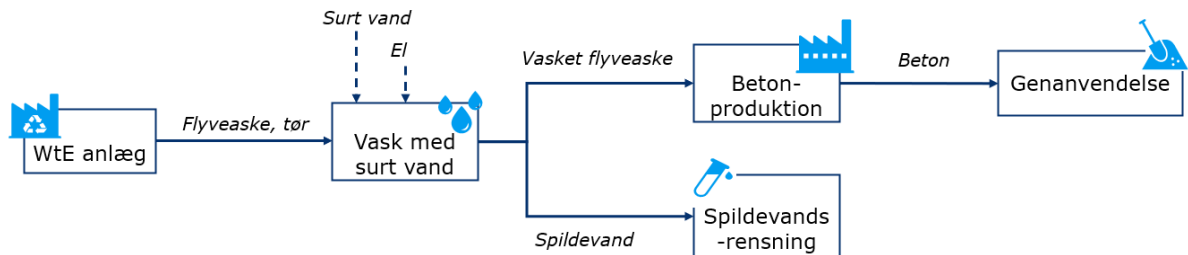
Figur 6, Procesdiagram for vask af flyveaske med surt vand og cementstabilisering til deponi (4.1)

Et simpelt procesflowdiagram for sur vask af flyveaske til deponi er illustreret i Figur 7. Den opnåede deponiklasse skal undersøges i det videre forløb.



Figur 7, Procesdiagram for vask af flyveaske med surt vand til deponi (4.2)

Et simpelt procesflowdiagram for sur vask af flyveaske til genanvendelse i betonproduktion er illustreret i Figur 8.



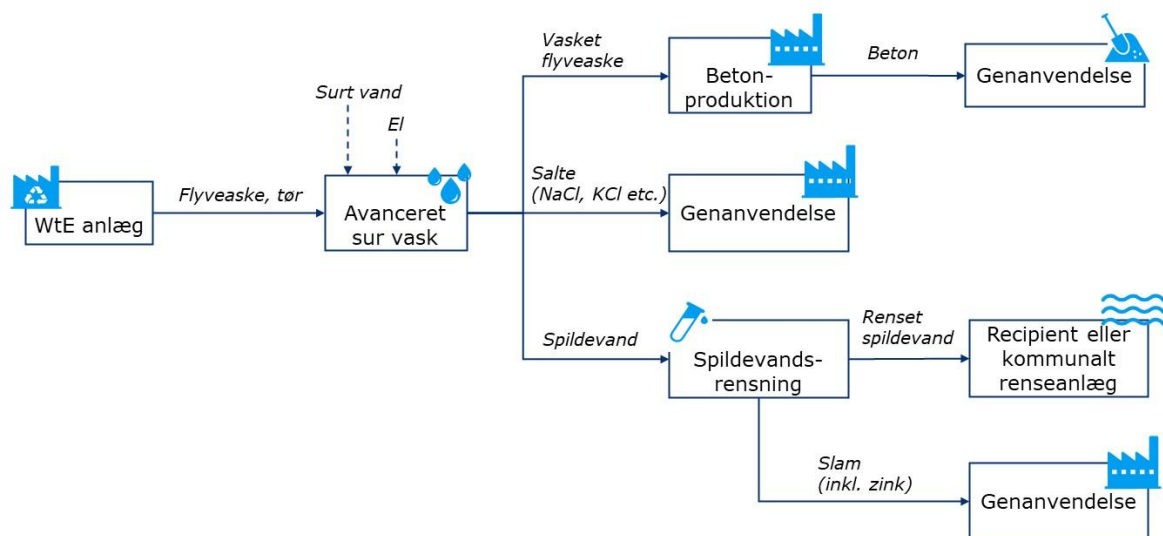
Figur 8, Procesdiagram for vask af flyveaske med surt vand til betonproduktion (4.3)

3.5 Alternativ 5 – avanceret sur vask

Avanceret sur vask er valgt som benchmark for komplekse processer, da den både inkluderer sur vask og tilrettelægger for genanvendelse af salte og metaller fra flyveasken.

Avanceret sur vask genanvender surt spildevand fra røggasrensningsanlægget til at vaske og adskille flyveasken i hhv. rensed aske, salte og metalholdigt spildevand. Den rensede aske kan enten deponeres eller potentielt anvendes i betonproduktion (jf. Alternativ 4.3). Saltene, hovedsageligt natriumklorid (NaCl), calciumklorid (CaCl_2) og kaliumklorid (KCl), kan udvindes og genanvendes f.eks. som vejsalt. Kaliumsalte har forholdsvis høj værdi og anvendes bl.a. til gødningsformål. Af-sætning af saltene kræver dog, at de er tilpas rene. Metallerne i spildevandet kan udvindes vha. en rensningsproces. Her er det især zink, som det principielt er muligt at genanvende i form af zinkslam, som kan indgå som mellemprodukt ved fremstilling af metallisk zink på linje med zinkkoncentrat, som er et mellemprodukt fra oparbejdning af zinkmalm på dets vej til metallisk zink.

Et simpelt procesflowdiagram for processen for avanceret sur vask er illustreret i Figur 9.



Figur 9 Procesdiagram for Avanceret sur vask (Alternativ 5)

4. EVALUERING AF BEHANDLINGSLØSNINGER

Til bestemmelse af en behandlingsmetode for flyveaske, det ønskes at undersøge nærmere, er der opstillet en række kriterier, som metoderne evalueres på baggrund af. De udvalgte kriterier er økonomi, miljømæssige forhold, kompleksitet, implementeringstid og vurdering af anvendelsesmuligheder for slutprodukter/evt. restprodukter.

Kriterierne er som følger:

- **Økonomi:** Vurdering af behandlingspris som opgøres på baggrund af samlede, groft estimerede etableringsomkostninger og driftsomkostninger over en planperiode på 15 år. Under drifts- og vedligeholdelseskostninger er medregnet grove estimater for energiforbrug, andre forbrug (cement, vand mm.), restprodukter og spildevand (inkl. deponeringsafgift), indtægter for salg af produkter, vedligehold og ansatte).
- **Energiforbrug og klimapåvirkning:** Energiforbrug (el og varme) til processen, samt den samlede udledning af drivhusgasser fra energi og materialer set ud fra et livscyklusperspektiv. Klimapåvirkning er vurderet ud fra Maresca m.fl., 2022, og den samlede vurdering for energi og klima er således vurderet som en kombination af det estimerede energiforbrug og klimapåvirkningen baseret på livscyklusanalyse af behandlingsmetoder for aske og røggasrensningsrestprodukt fra affaldsforbrændingsanlæg ved Maresca m.fl. 2022.
- **Udvaskningsrisici:** Udvaskningsrisiko af skadelige stoffer vurderes i et Life Cycle Analysis (LCA) perspektiv, og er vurderet ud fra Maresca m.fl., 2022.
- **Spredningsrisici:** Vurdering af den langsigtede risiko for, at skadelige stoffer bliver spredt i miljøet eller i bygningsdele og på den måde på længere sigt gør skade på enten miljø eller menneskers sundhed.
- **Implementeringstid:** Vurdering af tidshorisont for etablering inkl. godkendelser etc. regnet fra beslutning om igangsætning. En indikativ analyse er blevet udarbejdet med estimat for kortest muligt tidsforbrug, når det forudsættes, at alt går problemfrit. Det spænder fra 21 til 43 måneder for de forskellige metoder. Det sandsynlige tidsforbrug vil være betydeligt længere. Inkluderes den estimerede tid til myndighedsgodkendelse i beregningen, varierer den samlede implementeringstid fra 39 til 76 måneder, men her kan der være mulighed for at forkorte tiden ved at udføre visse faser af arbejdet parallelt. Der er dog betydelig risiko for optimistisk tidsestimat omkring myndighedsbehandling og godkendelse, især ved etablering af løsning for deponi. For selve procesanlægget, forudsættes det i dette notat, at anlægget etableres i tilknytning til eksisterende miljøgodkendt anlæg, og der f.eks. ikke skal udføres en ny VVM-undersøgelse eller greenfield miljøgodkendelse.
- **Nyttiggørelse:** Vurdering af det reelle nyttiggørelsespotentiale af flyveasken og dens restprodukter. Herunder vurderes også eventuelle forbrug og besparelser i råvareforbrug, som behandlingsmetoden kan tilskrives. Der er således reelt tale om vurdering af nettoeffekt på udnyttelse af råvarer.
- **Technology Readiness Level (TRL):** Måler modenheten af behandlingsmetoden og den bagvedliggende teknologi.
- **Commercial Readiness Index (CRI):** Måler behandlingsformens kommercielle modenhet. CRI afhænger af, hvorvidt teknologien er anvendt kommercielt. Dette er vigtigt for valg af processen og påvirker muligheden for at finansiere behandlingsmetoden, mm.

Alle ovenstående parametre vurderes ud fra en skala fra 1-5, hvor 5 er den mest fordelagtige bedømmelse mens 1 er den mindst fordelagtige for det pågældende kriterie. Vurderingerne er indikationer, ved at de bygger på arbejdsgruppens generiske forståelse og overordnede analyse af

teknologierne ved en typisk placering for den pågældende teknologi. Der er således ikke gennemført egentlige forprojekter eller feasibility studier.

4.1 Evalueringer

For hver behandlingsmetode og evalueringsparameter er der givet en score (1-5), således at 5 er bedst. En samlet evalueringsmatrice er opstillet og præsenteres i Figur 10. I følgende afsnit præsenteres, hvilke overvejelser der ligger til grund for den enkelte score. Scoren er resultat af sammenligning af behandlingsmetoderne. Der gives samme score til ligeværdige metoder på den enkelte parameter, og scorene ligger tæt mellem metoderne, hvor der er beskedne forskelle mellem dem.

Nedstrøms processer efter behandling af flyveasken betragtes som udgangspunkt udenfor scope af nærværende vurderinger. Det princip benyttes, for så vidt angår ressourceforbrug, energi og klima samt økonomi.

Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning og implementeringstid indgår slutdisponeringen (nedstrøms processer), fordi afsætningsmuligheden skal sikres. For de parametre indgår derfor etablering og drift af anlæg frem til og med slutdisponering af den behandlede aske.

4.1.1 Alternativ 1 – Tør cementstabilisering

Økonomi Score 4	Behandlingsprisen er vurderet til middel/lav. Dette begrundes i, at investeringen er lav, men at driftsomkostninger er middel på grund af indkøb af cement og omkostninger (herunder statsafgift) til deponering.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbruget til cementstabilisering er vurderet til at være i den meget lave ende. Til gengæld skal der anvendes en vis mængde cement, som kræver et højt energiforbrug til produktionen. Samlet vurderes denne parameter således til en medium/høj score.
Udvaskningsrisici Score 4	Cementstabilisering er vurderet til at have meget lave påvirkninger på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent). Derfor vurderes denne behandlingsmetode at have generelt lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 4	Med deponering af det stabiliserede produkt vurderes spredningsrisikoen for lav, idet det forudsættes, at deponering finder sted kontrolleret med en placering af deponi, som sikrer mod skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat.
Implementeringstid Score 5	Implementeringstiden vurderes som kort, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Afprøvning skal afklare deponeringsklasse og sikre, at krav til udvaskning kan overholdes (inkl. opløselige salte). • Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det stabiliserede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares. • Placering af anlæg til cementstabilisering skal afklares

	<ul style="list-style-type: none"> Anlæg til cementstabilisering skal godkendes af relevante myndigheder
Nyttiggørelse Score 1	Ingen
TRL (Technology Readiness Level) Score 5	Teknologien anses for at være færdigudviklet, idet ovennævnte afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning kan overholdes (inkl. opløselige salte).
CRI (Commercial Readiness Index) Score 5	Det forventes, at der kan findes kommercielle aktører, som kan tilbyde anlæg, og i øvrigt anses teknologien for så enkel, at man ikke nødvendigvis behøver at engagere leverandører med meget erfaring.

4.1.2 Alternativ 2 – CO₂ -stabilisering

Anvendelse af den behandlede flyveaske som aggregat er udenfor scope af nærværende vurderinger for så vidt angår ressourceforbrug, energi og klima samt økonomi, men indgår ved vurdering af udvaskningsrisici og risiko for spredning fra produktet og ved vurdering af implementeringstid.

Økonomi Score 4	Den samlede behandlingspris vurderes som relativt lav. Dette begrundes i, at investeringen vurderes som middel, og at driftsomkostninger vil være middel eller lave på grund af lave omkostninger til afsætning af produktet og moderat forbrug.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbruget til CO ₂ -stabilisering er vurderet til lavt/moderat og bidrage for forbrug – især cement - anses for moderate.
Udvaskningsrisici Score 3	CO ₂ -stabilisering er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent). Risikoen for udvaskning ved anvendelse af aggregat i beton vurderes højere end ved deponering af stabiliseret aske (alternativ 1). Samlet vurderes denne behandlingsmetode at have mellem påvirkning.
Spredningsrisici Score 1	Spredningsrisikoen vurderes som forholdsvis stor ved anvendelse i betonprodukter el. lign. ved kontrolleret anvendelse. Det skyldes, at produktet har højt indhold af vandopløselige salte, tungmetaller og dioxin, som potentielt kan frigives over tid trods den kontrollerede anvendelse. Data fra C8 har dog angiveligt vist lav udvaskning. Ved anvendelse analogt med slagge vurderes udvaskningen at overholde restproduktbekendtgørelsens krav på niveau med slagge (kategori 2 eller 3). Dette kræver dog, at produktet optages på bekendtgørelsens bilag, hvilket der ikke er forudsat her.
Implementeringstid Score 2	Implementeringstiden vurderes som relativt lang, selvom der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> Afprøvning skal sikre at krav til udvaskning kan overholdes, fx jf. restproduktbekendtgørelsen

	<ul style="list-style-type: none"> • Miljøforhold ved afsætning af produkt til betonprodukter skal afklares • Det kan blive nødvendigt at Miljøstyrelsen skal acceptere og iværksætte, at produktet kommer på bilag til restproduktbekendtgørelsen så det kan anvendes analogt med slagge. • Placering af anlæg til stabilisering skal afklares • Anlæg til stabilisering skal godkendes af relevante myndigheder. • Der skal findes aftagere til de relevante betonprodukter
Nyttiggørelse Score 4	Behandlingsmetoden leder til høj nyttiggørelse. Produktet påtænkes nyttiggjort ved anvendelse til betonprodukter – alternativ vejbygning eller lignende, og erstatter dermed andet tilslag som sten og grus. Dog udnyttes ikke Zn og salte, som kunne udvindes ved andre behandlingsmetoder.
TRL (Technology Readiness Level) Score 5	Høj, idet teknologien regnes som færdigudviklet.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	Høj, idet teknologien findes i kommerciel drift. Der er dog pt. kun én væsentlig leverandør (OCO), som har givet udtryk for, at fri anvendelse af produktet som aggregat til betonprodukter ville være deres forventning ved etablering af anlæg.

4.1.3 Alternativ 3.1 – Vask m. vand og cementstabilisering

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med deponering af det stabiliserede produkt. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og af implementeringstid indgår dog også deponiet og spildevandsudledning.

Økonomi Score 2	Behandlingsprisen vurderes som relativt høj. Både investerings- og driftsomkostninger vurderes som forholdsvis høje, dette på grund af relativt høje omkostninger til procesanlæg med en vis kompleksitet og relativt høje omkostninger til cementblanding og omkostninger til deponering af det vaskede produkt (herunder statsafgift).
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 2	Elforbruget til vask m. cementstabilisering er vurderet til højt, samtidig med at der anvendes cement, som har et højt energiforbrug og CO ₂ udledning under produktionen.
Udvaskningsrisici Score 3	Vask m. cementstabilisering er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoxicitet i jord, human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent). Der er en vis risiko for udvaskning med spildevand og fra slam fra spildevandsrens. Derfor vurderes denne behandlingsmetode til at have generelt mellem påvirkning.
Spredningsrisici Score 4	Med deponering af det stabiliserede produkt vurderes spredningsrisikoen for lav, idet det forudsættes, at deponering finder sted kontrolleret med en placering af deponi, som sikrer mod skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat. I forhold til stabilisering og udvaskning med syre (alternativ 4.1) vurderes det dog, at der er højere risiko for spredning.

Implementeringstid Score 4	Implementeringstiden vurderes som relativt kort, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Vask med vand er usædvanlig, og der er dermed få potentielle leverandører af færdigt koncept. • Afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. • Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det stabiliserede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares. • Placering af anlæg til vask og stabilisering skal afklares. • Anlæg til vask og stabilisering skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 2	Ingen, dog mulighed for udvinding af opløste salte
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	Teknologien anses for at være i det væsentlige færdigudviklet. Det gælder både vaskeprocessen og cementstabiliseringen, men dog ikke kombinationen. For det cementstabiliserede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes, og behandling af spildevand skal afprøves.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	Der findes anlæg til vask af flyveaske med vand, fx Ragnsells anlæg i Högbytorp, Sverige, med HZI som leverandør. Teknologien er så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring. Der mangler dog erfaring med kombinationen med cementstabilisering og behandling af spildevand.

4.1.4 Alternativ 3.2 – Vask m. vand og deponering

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med deponering af det vaskede produkt. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og implementeringstid indgår også deponiet og spildevandsudledning.

Økonomi Score 3	Behandlingsprisen vurderes som middel. Investeringen vurderes som middel med et forholdsvis komplekst procesanlæg med spildevandsrens, men uden anlæg til stabilisering. Driftsomkostninger vurderes som høje, især med høje omkostninger (herunder statsafgift) til deponering.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 3	Elforbrug til vask m. deponi er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Der er ikke yderligere væsentlige forbrug, som udleder klimagasser. Det er dog muligt, at der skal bruges energi til tørring af den vaskede aske for at reducere massen, der tilledes deponi. Samlet vurderes energi og klima som middel.
Udvaskningsrisici Score 3	Vask m. deponi er vurderet til at have gennemsnitlig påvirkning (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på human toksicitet (karcinogent), mens påvirkning for økotoksicitet i jord er i gennemsnit lidt lavere end de øvrige behandlingsformer. Til gengæld er påvirkning på human toksicitet (ikke-karcinogent) væsentlig højere end for de øvrige behandlingsformer. Derfor vurderes denne som mellem påvirkning. Den relativt høje human toksicitet skyldes primært risiko for udvaskning fra deponiet, som den vaskede aske tilledes, især Cr og Zn.

Spredningsrisici Score 3	Med deponering af det stabiliserede produkt vurderes spredningsrisikoen for lav, idet det forudsættes, at deponering finder sted kontrolleret og med placering af deponi, som sikrer mod skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat. I forhold til stabilisering og udvaskning med syre vurderes det dog, at der er højere risiko for spredning.
Implementeringstid Score 3	Implementeringstiden vurderes som middel, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Vask med vand er usædvanlig og der er dermed få leverandører. • Afprøvning skal afklare om krav til ikke-farligt affald kan overholdes og sikre, at krav til udvaskning kan overholdes, jf. deponeringsklassen. Især dette punkt vurderes som tidskrævende i lyset af den blide behandling med vand alene. • Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det vaskede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares. • Placering af anlæg til vask skal afklares. • Anlæg til vask skal godkendes af relevante myndigheder, herunder krav til udledning af spildevand.
Nyttiggørelse Score 2	Ingen, dog mulighed for udvinding af opløste salte.
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	Vaske teknologien anses for at være i det væsentlige færdigudviklet. For det vaskede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes, og behandling af spildevand skal afprøves.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	Der er få kommercielle aktører, der har erfaring med anlæg baseret på vand, idet vasketeknologien sædvanligvis anvender syre. Teknologien vurderes som så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring også med deponering af produkt og rensning af spildevand.

4.1.5 Alternativ 3.3 – Vask m. vand og genanvendelse i beton

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med anvendelse af det vaskede produkt som tilslag til beton. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og implementeringstid indgår dog også anvendelsen i beton og spildevandsudledning.

Økonomi Score 4	Behandlingspris vurderes som relativt lav. Investeringen vurderes som middel med et forholdsvis komplekst procesanlæg med spildevandsrens, men uden anlæg til stabilisering, mens driftsomkostningen vurderes som forholdsvis lave, især fordi omkostningen til afsætning af produktet til betonproduktion vurderes som lav.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbruget til vask m. beton er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Det er dog muligt, at der skal bruges energi til tørring af den vaskede aske, for at asken kan indgå i betonproduktion. Der spares lidt på klimapåvirkning ved at andre tilslagsmaterialer til betonen spares, herunder evt. cement. Samlet scores denne behandling til moderat/høj.

Udvaskningsrisici Score 3	Vask af flyveaske og genanvendelse i beton er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent). Derfor vurderes denne til generelt mellem påvirkning.
Spredningsrisici Score 1	Spredningsrisikoen vurderes som høj, når den vaskede aske anvendes i beton, hvis denne anvendes uden større begrænsninger. Det tages her i betragtning, at asken alene er vasket med vand, så tungmetaller kun i begrænset omfang er vasket ud.
Implementeringstid Score 2	Implementeringstiden vurderes som relativt lang, idet der ikke er tale om kendt teknik, og derfor kræver nogen udvikling og afprøvning. Der er endvidere en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Der skal findes aftagere til det vaskede produkt. • Analyseomfang og grænseværdier skal opstilles og aftales med aftager(e). • Afprøvning skal sikre, at krav til indhold og udvaskning – og tekniske krav – kan overholdes. • Det skal afklares, om der er behov for evt. myndighedsgodkendelse af anvendelsen af det vaskede produkt. • Anlæg til vask skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 4	Anvendelse af den vaskede aske i beton erstatter tilsvarende råvarer i form af finkornet sand eller andet tilslag, evt. cement. Dog udvindes ikke Zn og opløste salte, men der er mulighed for udvinding af salte fra spildevandet.
TRL (Technology Readiness Level) Score 3	Vasketeknologien anses for at være i det væsentlige færdigudviklet. For det vaskede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. Dertil kommer tekniske krav til anvendelse i beton. Ligeledes skal behandling af spildevand skal afprøves under den konkrete anvendelse.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 3	Der er få kommercielle aktører der har erfaring med anlæg baseret på vand, idet vasketeknologien sædvanligvis anvender syre. Teknologien vurderes som så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring også med anvendelse af det vaskede produkt til betonprodukter og rensning af spildevand.

4.1.6 Alternativ 4.1 – Vask m. surt vand og cementstabilisering

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med deponering af det stabiliserede produkt. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og implementeringstid indgår dog også deponiet og spildevandsudledning.

Økonomi Score 2	Behandlingsprisen vurderes som relativt høj. Både investerings- og driftsomkostninger vurderes som forholdsvis høje, dette på grund af forholdsvis høje omkostninger til procesanlæg med en vis kompleksitet og relativt høje omkostninger til cementblanding og omkostninger til deponering af det vaskede produkt (herunder statsafgift), dog marginalt lavere end tilsvarende vask med vand, da mængden af vasket aske er lavere, når der anvendes syre.
---------------------------	---

Energiforbrug og klimapåvirkning Score 2	Elforbruget til sur vask m. cementstabilisering er vurderet til moderat/højt. Udledningen af drivhusgasser er på et mellem niveau bl.a. pga. forbruget af cement. Dog spares lidt kalk til neutralisering af det skrubbepildevand, som anvendes til den sure vask. Samlet scores denne behandling til relativt lavt.
Udvaskningsrisici Score 4	Sur vask m. cementstabilisering er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på økotoxicitet i jord, idet dog forbrug af cement belaster lidt. For human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent) vurderes påvirkningen til moderat/lav, hvor især risiko for udvaskning af Cr og Zn dominerer. Samlet vurderes denne til mellem/lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 5	Med deponering af det stabiliserede produkt vurderes spredningsrisikoen for lav, idet det forudsættes, at deponering finder sted kontrolleret og med placering af deponi, som sikrer mod skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat. I forhold til stabilisering og udvaskning efter vask med vand vurderes det, at der er lavere risiko for spredning.
Implementeringstid Score 4	Implementeringstiden vurderes som relativt kort, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Afprøvning skal sikre at krav til udvaskning kan overholdes. • Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det stabiliserede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares. • Placering af anlæg til vask og stabilisering skal afklares. • Anlæg til vask og stabilisering skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 2	Ingen (dog mulighed for udvinding af salte). Anvendelse af aske til neutralisering sparer kalk ved behandling af syre fra vådskrubber. Forbrug af cement koster materialeforbrug.
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	Teknologien for både syrevask og cementstabilisering anses for at være fuldt udviklet, dog er kombinationen af syrevask og cementstabilisering ikke afprøvet før. Der vurderes derfor nødvendigt at afprøve kombinationen, bl.a. for at sikre, at krav til udvaskning kan overholdes for det vaskede produkt.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	Der findes kommercielle aktører, som kan tilbyde anlæg baseret på vask med syre. Teknologien er så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring, herunder med kombinationen med cementstabilisering.

4.1.7 Alternativ 4.2 – Vask m. surt vand og deponi

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med deponering af det vaskede produkt. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og implementeringstid indgår også deponiet og spildevandsudledning.

Økonomi Score 3	Behandlingsprisen vurderes som middel. Investeringen vurderes som middel med et forholdsvis komplekst procesanlæg, men uden anlæg til stabilisering. Driftsomkostninger vurderes som høje, især med høje omkostninger (herunder statsafgift) til deponering. Når asken vaskes
---------------------------	---

	med syre, bliver mængden af behandlet aske mindre end med vand (scenarie 3.1). Det påvirker forbrug og deponeringsomkostninger. Desuden opnås besparelser på spildevandbehandling, idet skrubber-spildevandet skulle behandles uanset askevask.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbrug til sur vask m. deponi er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Der er ikke yderligere væsentlige forbrug, som udleder klimagasser. Det er dog muligt, at der skal bruges energi til tørring af den vaskede aske for at reducere massen, der tilledes deponi. Der spares lidt ved at neutralisering ved hjælp af aske sparer kalk. Samlet scores energi og klima som middel/høj.
Udvaskningsrisici Score 4	Sur vask m. deponi er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på økotoksicitet i jord. For human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent) vurderes påvirkningen til moderat/lav, hvor især risiko for udvaskning af Cr og Zn dominerer. Denne effekt er dog mindre end ved tilsvarende vask med vand. Samlet vurderes denne til mellem/lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 4	Med deponering af det stabiliserede produkt vurderes spredningsrisikoen for lav, idet det forudsættes, at deponering finder sted kontrolleret og med placering af deponi, som sikrer mod skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat. I forhold til stabilisering og udvaskning af flyveaske med vand vurderes det, at der er lavere risiko for spredning ved den efterfølgende deponering. Den manglende stabilisering med cement trækker lidt ned.
Implementeringstid Score 3	Implementeringstiden vurderes som middel, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning, men der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Afprøvning skal afklare, om krav til ikke-farligt affald overholdes og sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. • Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det vaskede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares. • Anlæg til vask skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 3	Ingen (dog mulighed for at supplere med udvinding af salte og zink). Endvidere spares kalk og evt. andre kemikalier, når aske anvendes til neutralisering af syre fra vådskrubber.
TRL (Technology Readiness Level) Score 5	Teknologien for syrevask anses for være fuldt udviklet. For det vaskede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 5	Der findes kommercielle aktører, som kan tilbyde anlæg baseret på vask med syre. Teknologien er så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring.

4.1.8 Alternativ 4.3 – Vask m. surt vand og genanvendelse i beton

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med anvendelse af det vaskede produkt som tilslag til beton. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produktet og implementeringstid indgår dog også anvendelsen i beton og spildevandsudledning.

Økonomi Score 4	Elforbrug til sur vask med anvendelse til beton er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Der er ikke yderligere væsentlige forbrug, som udleder klimagasser. Det er dog muligt, at der skal bruges energi til tørring af den vaskede aske for at reducere massen, der tilledes deponi. Der spares lidt ved at neutralisering ved hjælp af aske sparer kalk. Samlet vurderes energi og klima som middel/lav omkostning.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbruget til sur vask m. beton er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Udledningen af drivhusgasser fra selve behandlingen er på et mellem niveau. Der spares kalk, når asken anvendes til neutralisering af skrubbepildevand, og der spares tilslagsmaterialer, når den vaskede aske anvendes i beton. Samlet scores denne behandling til lav påvirkning.
Udvaskningsrisici Score 3	Sur vask m. beton er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogent) og human toksicitet (ikke-karcinogent). Derfor vurderes denne til generelt mellem påvirkning. Risikoen for udvaskning ved anvendelse til beton anses for en smule større end ved deponering.
Spredningsrisici Score 2	Spredningsrisikoen vurderes som relativt høj, når den vaskede aske anvendes i beton, som anvendes uden større begrænsninger. Det er dog under forudsætning, at langt det meste udvaskelige tungmetal og salte er vasket ud af asken under syrevasken.
Implementeringstid Score 2	Implementeringstiden vurderes som relativt lang, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none"> • Der skal findes aftagere til det vaskede produkt • Analyseomfang og grænseværdier skal opstilles og aftales med aftager(e). • Afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning – og andre krav - kan overholdes. • Det skal afklares, om der er behov for evt. myndighedsgodkendelse af anvendelsen af det vaskede produkt. • Anlæg til vask skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 4	Anvendelse af den vaskede aske i beton erstatter tilsvarende råvarer i form af finkornet sand eller andet tilslag. Endvidere sparer anvendelse af aske til neutralisering af syre fra vådskrubber kemikalier til neutralisering af skrubbervæsken (især kalk).
TRL (Technology Readiness Level) Score 5	Teknologien for syrevask anses for være fuldt udviklet. For det vaskede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 5	Der findes kommercielle aktører, som kan tilbyde anlæg baseret på vask med syre. Teknologien er så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring.

4.1.9 Alternativ 5 – Avanceret sur vaskeproces

Ved vurdering indgår etablering og drift af anlæg frem til og med anvendelse af det vaskede produkt som tilslag til beton og afsætning af salte og zinkslam. Ved vurdering af udvaskningsrisici, risiko for spredning fra produkterne og implementeringstid indgår dog også anvendelsen i beton og spildevandsudledning.

For udvinding af salte vurderes i forhold til industriel udvinding af de samme salte og for zinkslam vurderes i forhold til industriel udvinding af zinkslam.

Økonomi Score 3	Behandlingspris vurderes som mellem. Investeringen vurderes som meget høj på grund af høje omkostninger til procesanlæg med stor kompleksitet. Driftsomkostninger vurderes som lave da omkostning til afsætning af produkt(er) er lave, og genanvendelse af salte kan være indtægtsgivende.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbruget til avanceret sur vask er vurderet til højt, og herudover er det et termisk energibehov til tørring af salt og evt. vasket aske, og behandlingen samlet som havende et højt energiforbrug. Dette kompenseres dog af besparelser andre steder, når salte og Zn genanvendes, dvs. sparet energiforbrug i produktion af de råvarer, som erstattes.
Udvaskningsrisici Score 4	Avanceret sur vask er vurderet til at have gennemsnitlig påvirkning (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på human toksicitet (karcinogent), mens påvirkning for økotoksicitet i jord er lidt lavere og påvirkning på human toksicitet (ikke-karcinogent) væsentlig lavere end de øvrige behandlingsformer i gennemsnit (da Zn udvindes og dermed ikke udvaskes fra aske eller spildevandsslam). Derfor vurderes denne som mellem/lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 2	Spredningsrisikoen vurderes som relativt høj, når den vaskede aske anvendes i beton, og denne anvendes uden større begrænsninger. Tilsvarende er der risiko for spredning af evt. forureninger i den udvundne salt. Det er dog en fordel, at langt det meste udvaskelige tungmetal er vasket ud under syrevasken inden anvendelsen i beton.
Implementeringstid Score 1	Implementeringstiden vurderes som lang. Der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning, men der er dog en række forhold og usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden: <ul style="list-style-type: none">• Investeringen er høj og anlægget har høj kompleksitet, hvilket belaster beslutningstempo og projekteringstid• Kun enkelte leverandører har erfaring med saltudvinding.• Der skal findes aftagere til det vaskede produkt, zinkslam og udvundne salte.• Analyseomfang og grænseværdier skal opstilles og aftales med aftager(e).• Afprøvning skal sikre, at krav overholdes til udvaskning fra den vaskede aske – og krav til salte og zinkslam. Dog kan anlæg etableres og drives uden disse faciliteter som mellem-løsning

	<ul style="list-style-type: none"> • Det skal afklares, om der er behov for evt. myndighedsgodkendelse af anvendelsen af det vaskede produkt, zinkslam og salte. • Anlæg til vask skal godkendes af relevante myndigheder.
Nyttiggørelse Score 5	Behandlingsmetoden leder til meget høj grad af nyttiggørelse. Anvendelse af den vaskede aske i beton erstatter tilsvarende råvarer i form af finkornet sand eller andet aggregat. Afsætning af salte erstatter produktion af andre salte, og afsætning af zinkslam sparer udvinding og behandling af råmalm. Endvidere sparer anvendelse af aske til neutralisering af syre fra vådskrubber kemikalier til neutralisering af skrubbevæsken (især kalk).
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	Teknologien for syrevask anses for være fuldt udviklet. For det vaskede produkt skal afprøvning sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. Udvinning af salte af forventet kvalitet mangler dog lidt udvikling, hvad også gælder sikring af kvalitet af zinkslam.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	Der findes kommercielle aktører, som kan tilbyde anlæg baseret på vask med syre, dog mangler referencer på udvinding af salte og zinkslam. Teknologien er så kompleks, at det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring.

4.2 Resultater

I Figur 10 præsenteres evalueringsmatricen, hvor hver behandlingsmetode er blevet rangeret ift. de førnævnte kriterier. Kriterierne er rangeret på en skala fra 1-5, hvor 5 er bedst.

Det er foretaget en vægtning af hvert evalueringskriterie på basis af følgende overvejelser:

- *Økonomi* er vægtet højt, da dette er en central faktor i en beslutningsproces. Parametre inkluderet i evalueringen af *Økonomi* er præsenteret i Figur 11.
- *Energiforbrug og klimapåvirkning* er tillagt en relativt lav vægtning, fordi forskel i energiforbrug er relativt lille i absolutte tal, og det samlede klimaaftryk (CO₂-eq.) anses at være af mindre betydning i et større perspektiv.
- *Udvaskningsrisici og Spredningsrisiko* er samlet set tillagt en relativt høj vægtning, da det anses som vigtig at opnå en lav miljøpåvirkning af den behandlingsløsning, der vælges.
- *Implementeringstid* er tillagt en middel til høj vægtning, da behandlingsløsningen, som vælges, ønskes gennemført indenfor en relativt kort tidsramme. Parametre inkluderet i evalueringen af *Implementeringstid* er præsenteret i Figur 12.
- *Nyttiggørelse* anses som vigtig på længere sigt, men for nuværende ønskes det også at belyse behandlingsløsninger, som kan lede til en dansk deponiløsning. Af denne grund er kriteriet tillagt en middel til lav vægtning.
- *TRL og CRI* inkluderes ikke i den vægtede score, men tages i betragtning som del af evalueringen af implementeringstid for de respektive behandlingsløsningerne.

Som tidligere nævnt er vurderingerne indikationer. Der er lagt stor vægt på, at løsningen skal kunne etableres hurtigt, herunder at teknikken skal være kendt og enkel og investeringen begrænset. Kriterierne er vurderet og prioriteret i dette lys.

En anden prioritering af de oplyste kriterier ville give andre resultater – og anden rangordning af behandlingsmetoderne.

Behandlingsmetode	Evalueringsskriterie								Weighted Score - total ekskl. TRL og CRI
	Økonomi*	Energiforbrug og klimapåvirkning	Udvaskningsrisici	Spredningsrisiko	Implementeringstid*	Nyttiggørelse	TRL	CRI	
1. Tør cementstabilisering	↔ 4	↔ 4	↔ 4	↔ 4	↑ 5	↓ 1	↑ 5	↑ 5	3,8
2. CO2 stabilisering	↔ 4	↔ 4	⇒ 3	↔ 2	↔ 2	↔ 4	↑ 5	↔ 4	3,2
3.1. Vask m. cementstabilisering	↔ 2	↔ 2	⇒ 3	↔ 4	↔ 4	↔ 2	↔ 4	↔ 4	2,9
3.2. Vask m. deponi	⇒ 3	⇒ 3	⇒ 3	↔ 3	↔ 3	↔ 2	↔ 4	↔ 4	2,9
3.3. Vask m. beton	↔ 4	↔ 4	⇒ 3	↓ 1	↔ 2	↔ 4	⇒ 3	⇒ 3	3,0
4.1. Sur vask m. cementstabilisering	↔ 2	↔ 2	↔ 4	↑ 5	↔ 4	↔ 2	↔ 4	↔ 4	3,2
4.2. Sur vask m. deponi	⇒ 3	↔ 4	↔ 4	↔ 4	↔ 3	⇒ 3	↑ 5	↑ 5	3,4
4.3. Sur vask m. beton	↔ 4	↔ 4	↔ 3	↔ 2	↔ 2	↔ 4	↑ 5	↑ 5	3,2
5. Avanceret sur vask	⇒ 3	↔ 2	↔ 4	↔ 2	↓ 1	↑ 5	↔ 4	↔ 4	2,8
Vægtning:	25%	10%	15%	15%	20%	15%			

Figur 10, Evalueringsmatrix

Behandlingsmetode	Økonomi		
	Investering	Driftsomkostninger	Samlet økonomi
			Behandlingspris
1	↑ 5	⇒ 3	4
2	⇒ 3	⇒ 4	3.5
3.1	↔ 2	↓ 1	1.5
3.2	⇒ 3	⇒ 3	3
3.3	⇒ 3	⇒ 4	3.5
4.1	↔ 2	↔ 2	2
4.2	⇒ 3	⇒ 3	3
4.3	⇒ 3	⇒ 4	3.5
5	↓ 1	⇒ 4	2.5

Figur 11, Parametre inkluderet i evalueringen af Økonomi (indikativ)

Behandlingsmetode	Implementeringstid (teknik)					Afklaring af afsætning og godkendelser				Total	Score - total
	Teknisk udvikling, forprojekt	Udbud, kontrahering	Projektering, konstruktion	Idriftsættelse	Sum teknik	Afsætning af produkter	Myndighedsbehandling af anlæg	Myndighedsbehandling af produktafsalgning	Sum afklaringer	Teknik og afklaringer	
	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	Måneder	
1	6	4	10	1	21	6	6	6	18	39	↑ 5
2	14	4	15	1	34	12	6	12	30	64	↔ 2
3,1	8	6	15	3	32	6	9	6	21	53	↔ 4
3,2	8	6	15	3	32	9	9	6	24	56	⇒ 3
3,3	14	6	15	3	38	12	9	12	33	71	↔ 2
4,1	8	6	15	3	32	6	9	6	21	53	↔ 4
4,2	8	6	15	3	32	9	9	6	24	56	⇒ 3
4,3	14	6	15	3	38	12	9	12	33	71	↔ 2
5	14	6	20	3	43	12	9	12	33	76	↓ 1

Figur 12, Parametre inkluderet i evalueringen af Implementeringstid (indikativ)

På baggrund af evalueringsmatrixen rangerer metoden cementstabilisering (1) og sur vask med deponering (4.2) højest, tæt fulgt af CO₂-stabilisering (2), sur vask med betonanvendelse (4.3) og sur vask med cementstabilisering (4.1).

5. ANBEFALET KONCEPT

Baseret på evalueringen og overvejelser, anbefales tør cementstabilisering som en foretrukken option. Det er her vigtigt, at løsningen er teknisk enkel, etableringstiden kort og investeringen begrænset.

Anbefalingen understøttes af følgende yderligere fordele:

- Teknologi kendt, afprøvet og kommercielt tilgængelig
- Samlet økonomi moderat
- Udvaskningsrisikoen er lav
- Ingen spredning af tungmetaller og dioxin
- Mulighed for indenlandsk slutbehandling
- Alternativ til forholdsvis komplekse vaskeløsninger

Ulemperne ved den foreslåede metode omfatter først og fremmest:

- Ingen cirkularitet:
Restproduktet deponeres, og der er ingen nyttiggørelse
- Ressourceforbrug til cement
- Cement øger deponeret mængde og dermed omkostninger til deponering

Teknologien anses for i det væsentlige at være færdigudviklet, hvorfor evt. afprøvning vil tilføre begrænset værdi, hvis der ikke er tale om et specifikt projekt.

Inden teknologien tages i anvendelse i forbindelse med et konkret projekt, skal en række forhold afklares, bl.a.:

- Afprøvning skal afklare deponeringsklasse og sikre, at krav til udvaskning kan overholdes (inkl. opløselige salte).
- Der skal findes et deponi, som kan og vil modtage det stabiliserede produkt, og evt. myndighedsgodkendelse heraf skal afklares.
- Placering af anlæg til cementstabilisering skal afklares
- Anlæg til cementstabilisering skal godkendes af relevante myndigheder

APPENDIX 1 REFERENCER

A. Maresca *, V. Bisinella, T.F. Astrup, 2022: Life cycle assessment of air-pollution-control residues from waste incineration in Europe: Importance of composition, technology and long-term leaching, *Waste Management* 144 (2022) 336–348