

Rapport

Projektnavn **Genanvendelse af Restprodukter**
Projektnr. **1100043274**
Kunde **Dansk Restprodukt håndtering, DRH**
Notatnr. **-**
Version **1.4 – godkendt til offentliggørelse**
Til **DRH, branchesamarbejdet for genanvendelse af restprodukter, arbejdsgruppe for tørre og semitørre restprodukter**
Fra **Kim Hougaard Pedersen**
Kopi til **Erland Christensen**

Udarbejdet af **Kim Hougaard Pedersen (KIPR) og Tore Hulgaard (TOR)**
Kontrolleret af **Johan Forsberg**
Godkendt af **RGP gruppe**

Dato 2025-12-08

Undersøgelse af simpel behandlingsmetode for restprodukter fra tør og semitør røggasrensning

Rambøll
Hannemanns Allé 53
DK-2300 København S

T+45 5161 1000
<https://dk.ramboll.com/energi>

Indholdsfortegnelse

1	Resumé.....	3
2	Indledning.....	3
3	Baggrund og beskrivelse af materiale.....	3
3.1	Om betegnelser af aske og restprodukter	4
4	Behandlingsmetoder	5
4.1	Alternativ 1 – Tør cementstabilisering	5
4.2	Alternativ 2 – CO ₂ -stabilisering.....	6
4.3	Alternativ 3 – Vask med vand	7
4.4	Alternativ 4 – Sur vask.....	9
4.5	Alternativ 5 – avanceret sur vask	11
5	Evaluering af behandlingsløsninger.....	12
5.1	Evalueringer	13
5.1.1	Alternativ 1 – Tør cementstabilisering og deponering.....	14
5.1.2	Alternativ 2 – CO ₂ -stabilisering og genanvendelse i beton	15
5.1.3	Alternativ 3.1 – Vask m. vand og deponering	16
5.1.4	Alternativ 3.2 – Vask m. vand, cementstabilisering og deponering	17
5.1.5	Alternativ 3.3 – Vask m. vand og genanvendelse i beton	18
5.1.6	Alternativ 4.1 – Vask m. surt vand, cementstabilisering og deponering.....	19
5.1.7	Alternativ 4.2 – Vask m. surt vand og deponering.....	21
5.1.8	Alternativ 4.3 – Vask m. surt vand og genanvendelse i beton	22
5.1.9	Alternativ 5 – Avanceret sur vaskeproces.....	23
5.2	Resultater.....	24
6	Anbefalet koncept.....	26
7	Referencer.....	27

1 Resumé

Dette notat omhandler undersøgelsen af simple behandlingsmetoder for restprodukter (RGP) fra tør og semitør røggasrensning på danske affaldsenergianlæg. Sammenlignet med flyveaske, der tidligere er blevet undersøgt på samme måde, adskiller RGP sig blandt andet ved at have højere alkalinitet og kloridindhold hvilket er taget med i vurderingen, når behandlingsmetoderne gennemgås.

Flere alternativer er blevet vurderet, men tør cementstabilisering anbefales som den mest enkle og hurtigst implementerbare metode. Den er teknisk velkendt og kan etableres med begrænset investering. Ulempen er, at metoden ikke bidrager til cirkularitet, da restproduktet deponeres, og cementforbruget øger deponeringsmængden.

Andre metoder, der involverer vask med vand eller syre, kan reducere udvaskning i højere grad end cementstabilisering og muliggør nyttiggørelse, men de er dyrere, mere komplekse og kræver længere implementeringstid. Især syrevask kompliceres af, at syre formentlig skal indkøbes som råvarer. Ingen af metoderne vurderes dog til at kunne realiseres fuldt ud inden for 12-24 måneder, som det er efterspurgt, og det er ikke lykkedes at identificere en metode, der kan opfylde dette.

Cementstabilisering, som er vurderet til at kunne implementeres inden for 39 måneder inklusive myndighedsbehandling, er den hurtigste af de undersøgte metoder. Metoden kan desuden betragtes som et supplement til de andre beskrevne teknologier som evt. kan implementeres på et senere tidspunkt.

Som næste skridt anbefales det at undersøge fuldskala-implementering af cementstabilisering og afklare krav til udvaskning, deponering og myndighedsgodkendelser.

2 Indledning

Rambøll er af arbejdsgruppen for tørre og semitørre restprodukter blevet bedt om at kortlægge behandlingsløsninger for simpel genanvendelse af disse restprodukter (RGP) fra de danske affaldsenergianlæg. Den foreslåede løsning skal være simpel at installere og drifte, og skal kunne implementeres indenlands indenfor 12-24 måneder i tilfælde af de nuværende håndteringsmetoder begrænses. Investeringen skal også være begrænset, da løsningen vil ikke nødvendigvis være den endelige, men skal kunne anvendes indtil andre løsninger i mellemtiden er udviklet og implementerbare.

Arbejdet er baseret på et notat under ATR 11C – alternative behandlingsløsninger for flyveaske, og der vil derfor være henvisning til dette notat undervejs. Indledningsvist gives en sammenligning mellem flyveaske og RGP for at kunne vurdere betydningen af en behandlingsmetode og derfor valg af bedste løsning. I vurderingen indgår således økonomi, kompleksitet, implementerings- og anvendelsesmuligheder for slutprodukter/restprodukter.

Baseret på konklusionen, vil det næste oplagte skridt være at undersøge, hvordan den anbefalede behandlingsmetode implementeres i fuld skala indenlands, svarende til ATR 19, der er formuleret for flyveaske.

3 Baggrund og beskrivelse af materiale

Tør og semitør røggasrensning anvendes på en del af de danske affaldsenergi anlæg til blandt andet at reducere udledninger af SO₂ og HCl. Processen foregår ved at tilføre hydratkalk til røggassen, enten tørt

eller som oplæsning, som herefter reagerer med de sure gasser under dannelse af reaktionsprodukter som CaCl_2 , CaSO_3 og CaSO_4 . Disse produkter fanges i et posefilter, placeret nedstrøms, og de ledes derefter til en opsamlings silo. Da processen er placeret efter kedlen, er der også flyveaske i røggassen som på tilsvarende vis udskilles i posefilteret sammen med den tilsatte aktive kul/HOK (til fjernelse af Hg og Dioxin) og ubrugt hydratkalk. Samlet går blandingen under forkortelsen RGP og sammenlignet med flyveaske, har den en højere alkalinitet og større indhold af opløselige salte. I de fleste tilfælde vil kedelasken også indgå i blandingen, ved at den tilføres samme silo som RGP. Selv hvis kedelasken og RGP tilledes forskellige silo, er det sandsynligt at der ikke skelnes i forbindelse med behandling og derfor også transporteres i samme lastbil. Som en tommelfingerregel dannes der ca. 40 kg-RGP/ton affald (inkl. kedelasken) og i Danmark produceres der årligt ca. 20-25.000 tons/år (2023).

I dag er RGP klassificeret som farligt affald (EAK kode 19 01 13 eller EAK kode 19 01 07) og eksporteres til nyttiggørelse i Norge (NOAH) eller Tyskland (brug i saltminer), da deponi i Danmark ikke er muligt uden foregående behandling, hvilket bl.a. skyldes det høje klorid indhold [1]. Figur 1 angiver typiske bestanddele i RGP hvor flyveaske også er medtaget.

- Typiske eksempler og estimater

Hovedkomponent	Unit	Flyveaske (inkl. kedelasken)	FGT restprodukt (excl aske)	Mix aske og restprodukt (APCr)		Eksempel DK Middel for et anlæg
		Typiske værdier	SR=2	Estimat	Estimat	
Reference				Estimat	Estimat	
Massestrøm	kg/ton	22		18	40	
%		55		45	100	
Sum hovedkomponenter	mg/kg	516 700	501 553	550 400	544 110	651 742
S	mg/kg	47 000	35 548	41 800	4 500	46 300
F	mg/kg	4 100	5 648	3 400	100	4 705
Cl	mg/kg	71 000	199 567	128 900	170 000	160 500
Si	mg/kg	59 000	3 695	34 100	5 700	26 900
Al	mg/kg	27 000	872	15 200	16 000	11 200
Ca	mg/kg	164 000	324 270	236 100	270 000	281 000
Fe	mg/kg	11 000	922	6 500	6 000	7 225
K	mg/kg	51 000	0	28 100	28 000	34 100
Mg	mg/kg	12 000	2 781	7 900	5 700	8 890
Mn	mg/kg	600	0	300	520	427
Na	mg/kg	52 000	0	28 600	27 000	52 300
P	mg/kg	6 000	144	3 400	4 500	2 780
Ti	mg/kg	8 000	0	4 400	1 400	3 965
TOC	mg/kg	7 000	18 115	12 000	3 700	14 350

Figur 1: Hovedbestanddele af RGP og flyveaske [2].

Som det kan aflæses, er calcium- og klorindhold endnu højere for RGP end flyveaske, hvilket også kommer til udtryk ved en højere udvaskningsgrad af sidstnævnte [1]. Høj udvaskning af klorid er i sig selv problematisk, da grænseværdier overskrides væsentligt, men derudover kan høje mængder af klorid også mobilisere tungmetaller og sporelementer, der også er til stede i restproduktet.

3.1 Om betegnelser af aske og restprodukter

I nærværende rapport anvendes nedenstående betegnelser for aske og restprodukt fra affaldsforbrændingsanlæg.

Flyveaske: fællesbetegnelse for den del af asken, som føres med røggassen, efter at forbrændingsprocessen er afsluttet

Kedelaske: flyveaske, som udskilles fra kedlen som følge af udfældning på hedeplader mv., uden at der finder en tilsigtet røggasrensning sted.

Filteraske: flyveaske, som udskilles i et partikelfilter, typisk el-filter eller posefilter

RGP (røggasrensningsrestprodukt): Reaktionsprodukt af hydratkalk med især HCl og SO₂ med overskydende hydratkalk, tilsat aktivt kul/HOK og oftest udskilt i et posefilter. Indeholder for det meste flyveaske, som udskilles sammen med det øvrige RGP. RGP kan indeholde kedelaske, som er tilledt samme silo eller blandet sammen i forbindelse med transport.

APCr (Air pollution control residue): Typisk det samme som RGP, men kan anvendes også om andre restprodukter fra røggasrensning.

4 Behandlingsmetoder

I følgende afsnit beskrives alternative behandlingsløsninger til nuværende etablerede metoder for RGP 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 tidshorizont.

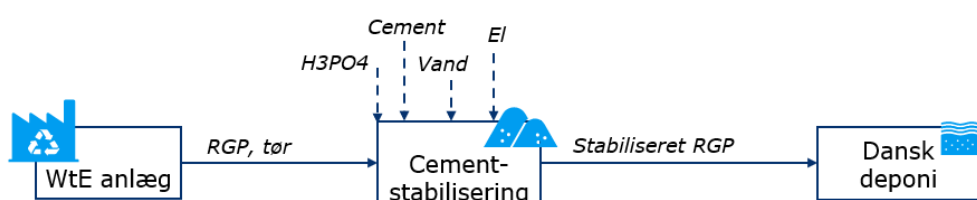
I ATR 11C har Rambøll defineret fem alternative metoder for flyveaske (med underkategorier), kategoriseret fra meget simpel til kompleks og de gennemgås her med RGP for øje.

4.1 Alternativ 1 – Tør cementstabilisering

Tør cementstabilisering anses som den mest simple metode, 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 asker, og er også undersøgt på RGP i et engelsk studie [3]. Cementstabilisering af materialet foregår ved, at det blandes med cement, sand og vand, og eventuelt chelateringsmiddel, hvorefter der støbes en fast blok. Chelateringsmidlet kan f.eks. være fosforsyre, som kan danne tungtopløselige forbindelser der immobiliserer tungmetaller, blandt andet grundet indkapsling [4].

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



Figur 1: Procesdiagram for tør cementstabilisering

Det forventes, at den cementstabiliserede RGP vil være egnet til deponi i Danmark, under forudsætning om, at tungmetaller og andre uønskede stoffer ikke vil frigives/udvaskes til nærmiljøet. Det skal dog undersøges hvor meget cement/RGP ratio skal være, da mere end 50% cement af denne samlede masse blev fundet nødvendigt for at undgå for høj Cl udvaskning [3], og viser det sig, at cementforbruget skal være højt, er et forbehandlingstrin nødvendigt, f.eks. vask som behandles i alternativ 3. På samme måde skal effekten af fosforsyre også undersøges, hvor det må forventes, at væsentligt mere fosforsyre skal tilsættes end ved stabilisering af flyveaske, da hydratkalk, som forefindes i større mængder, reagerer med fosforsyre under dannelse af calciumfosfat. I tilfælde af, at andre kemikalier skal tilsættes, kan aktivt kul potentielt også påvirke mængden, der er nødvendig pga.

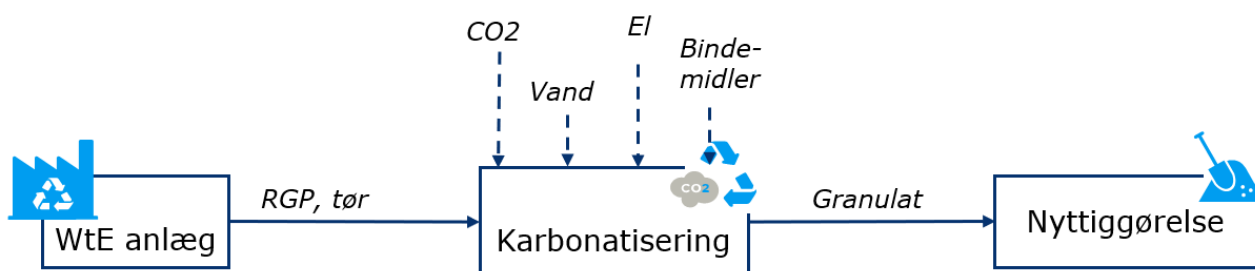
af dens adsorptionsegenskaber. Det bemærkes, at fosforsyre ikke forventes at påvirke klorid udvaskning, da de fleste Cl forbindelser i RGP allerede er i letopløselig form. Desuden vil stabiliseringen kun bevares, hvis den støbte blok forbliver intakt. I tilfælde af nedbrydning eller knusning, vil der igen være risiko for udvaskning. Det skal tænkes ind i testprotokollen for udvaskning, hvor prøven normalt knuses inden test.

Ulemperne ved brug af denne behandlingsløsning er negativ klimapåvirkning grundet forbrug af cement, samt at det også forårsager øget masse og volumen af materialet, der skal deponeres.

4.2 Alternativ 2 – CO₂-stabilisering

Stabilisering af aske 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), og der tilsættes vand og evt. sand, kalk og/eller cement.

Den væsentligste leverandør af teknologien er O.C.O. Technology Limited (tidligere C8) men 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 betonprodukter. Et simpelt procesflowdiagram for CO₂-stabilisering er illustreret i Figur 2.



Figur 2: Procesdiagram for CO₂ stabilisering

Ifølge O.C.O. medfører karbonatiseringen, at askens basiske bestanddele reagerer med CO₂ og bliver til tungtopløselige karbonater, samt at tungmetaller inkorporeres i det udfældede calcium karbonat. Processen fjerner ikke noget faststof, og derfor er det fulde indhold af tungmetaller, klorider, dioxin mm. stadig til stede i produktet. Behandlingen indebærer også, afhængig af den konkrete proces, at der opbygges pellets som det færdige produkt.

Ved gennemgang af deres produkt certifikater for aggregater angives en høj mængde vandopløselig klorid (op til 7.5 wt%) [5]. Dette understøttes også af studier, der har vist en begrænset effekt på udvaskning af klorid ved karbonatisering [6], og det må derfor formodes, at klorid fra det CO₂ stabiliserede RGP stadig kan udvaskes. Bindemidlet, som kan være cement, kan nok i nogen grad reducerer udvaskning af klorid som angivet ovenfor, men tilsætningen hos O.C.O. lader ikke til at være tilstrækkelig, men de nævner dog selv at kloridfrigivelsen svækkes. Udover ovennævnte kan indholdet af aktivt kul i RGP også påvirke processen negativt, grundet dets egenskab til at adsorbere eventuelle kemikalier, der tilsættes til processen, og det kan derfor medføre, at forbruges øges. På samme måde, hvis aggregaterne skal bruges i betonproduktion, kan det medføre øget forbrug af kemikalier pga. af adsorptionsegenskaberne. På den positive side, ved behandling af RGP i forhold til flyveaske, forventes der et øget optag af CO₂ pga. af overskuddet af hydratkalk, og det vil være positivt for klimaregnskabet.

Status for C8-processen i England er at den fået End-of-Waste (EoW) accept for aggregat produceret med røggasrensningsrestprodukt fra forbrændingsanlæg. Med EoW menes at et materiale, der tidligere blev klassificeret som affald, efter behandling opfylder bestemte kriterier og dermed ikke længere anses

som affald, men som et produkt eller en råvare. Dette kræver, at materialet har en specifik anvendelse, et marked, opfylder tekniske standarder og ikke medfører negative miljø- eller sundhedseffekter. I dette tilfælde er brug begrænset til aggregat til betonprodukter, og for de færdige betonprodukters anvendelse er der ingen særlige restriktioner og ingen krav om registrering. "Accept" betyder i denne sammenhæng, at det relevante EoW-bedømmelsesudvalg ikke har haft bemærkninger til den indsendte dokumentation. Det er ikke en formel myndighedsgodkendelse, og dens retskraft er derfor mindre stærk end en egentlig godkendelse, dvs. "afgørelsen" kan prøves ved domstol. Denne accept gælder ikke uden for England og kan som udgangspunkt ikke anvendes uden for Storbritannien.

Det vurderes, at produktet fra karbonatiseringsprocessen ikke vil kunne deponeres i Danmark uden yderligere behandling, da der stadig er risiko for høj udvaskning, især af kloridsalte, men nyttiggøres pt. ved anvendelsen i betonprodukter. Dog må det bemærkes, at der i Danmark stilles krav fra branchen (dvs. nærværende arbejdsgruppes medlemmer) om en begrænset og reguleret anvendelse af karbonatiseringsproduktet for at sikre, at produktet og dermed restproduktets indhold af tungmetal og klorider 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. Afslutningsvis kan det nævnes at teknologien kunne kombineres med vask af produktet inden CO₂-stabiliseringen, for at reducere mængden af udvasket klorid, men dette behandles ikke yderligere i notatet.

4.3 Alternativ 3 – Vask med vand

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

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

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

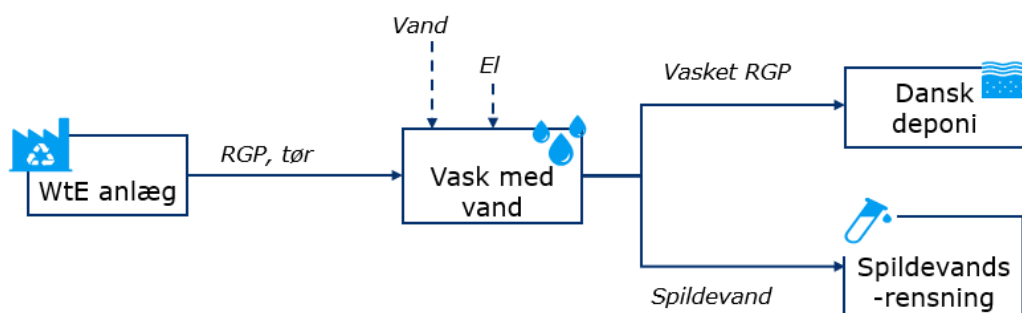
3.3 - Vask med vand efterfulgt af genanvendelse i beton (genanvendelse), se Figur 5.

For alle scenarier gælder en indledende vask af RGP med vand, hvorved en del af vandopløselige salte udvaskes, hvilket begrænser risikoen for miljøeffekter ved efterfølgende håndtering. Vask med vand vil opløse vandopløselige salte som klorider af calcium, natrium og kalium hvilket medfører en ganske betydelig vægtreduktion på 25% på tør basis eller mere, dog vil tilført vand forøge vægten. Visse tungere opløselige salte og tungmetaller vil også opløses, dog i begrænset omfang, og det er derfor potentielt nødvendigt at stabilisere produktet, f.eks. gennem cementstabilisering, inden det kan deponeres på et dansk deponi. Ved vask med vand vil opløsningen normalt være basisk med pH omkring 12 eller højere, bl.a. grundet indholdet af hydratkalk, og den højere pH kan øge opløseligheden af bly- og zinkforbindelser [8]. Dette kan være en fordel sammenlignet med vask af flyveaske alene hvor pH typisk er lidt lavere. Samlet set opløses tungmetaller dog i begrænset omfang, idet opløsning af de fleste tungmetalforbindelser kræver sure forhold [9], hvis de da ikke er bundet i mineraler, der ikke er opløselige i syre. De forskellige 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 behandling af spildevand, f.eks. et rensningsanlæg for spildevand og deraf følgende udledning af rensed spildevand og håndtering af en mindre mængde tungmetaltholdigt slam fra denne behandling. Spildevandet kan efter rensning ledes til recipient eller kommunalt rensningsanlæg afhængig af muligheder lokalt og i forhold til miljøgodkendelse. Vandmængden for RGP forventes at være højere end ved vask af flyveaske pga. af det højere klorindhold jævnfør tabel 1. Mængden af spildevand kan reduceres eller udledning kan helt

bortfalde ved udkrystallisering/op-koncentrering af opløste salte fra det rensede spildevand og recirkulering eller fordampning af vandet. Det kan være, at anlægget også har et spildevandsanlæg, f.eks. i forbindelse med røggaskondensering, der potentielt også kan behandle spildevandet fra vaskeprocessen. Dette vanskeliggøres dog af, at vaskevandet fra vaske af RGP er mere belastet med salte mv. end kondensat fra røggaskondensering. I det følgende er forudsat, at der skal investeres i et spildevandsanlæg, og at det rensede spildevand udledes efter behandling.

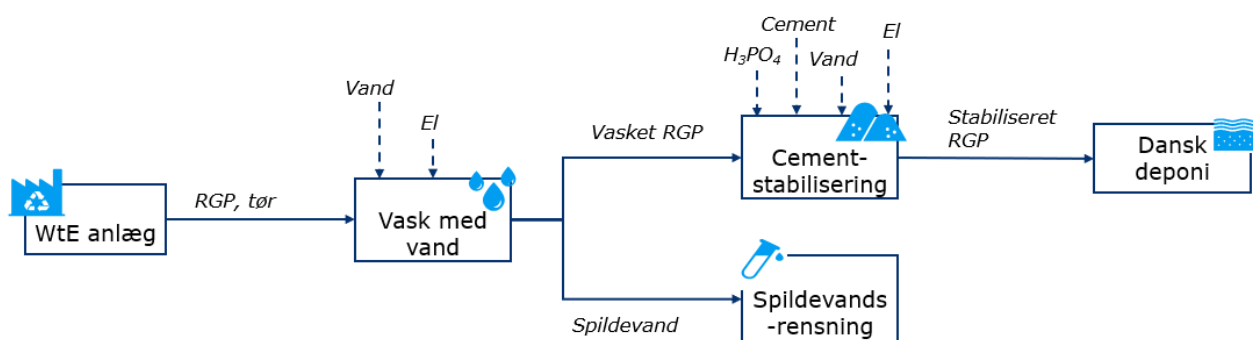
Alternativ 3.1: Et simpelt procesflowdiagram for vask af RGP til deponi er illustreret i Figur 3.



Figur 3: Procesdiagram for vask af RGP med vand til deponi

Vask med vand med efterfølgende deponering af produktet svarer til Ragn-Sells Ash2Salt anlæg i Högbytorp, Sverige, hvor der udvindes salte fra spildevandet ved behandling af restprodukt fra tør og semitør røggasrensning. Fra anlægget udledes ikke spildevand, da vandet fordampes i processen eller indgår i calciumklorid brine, som er et af produkterne. Den vaskede aske afsættes hos det lokale deponi, men som nævnt ovenfor er det ikke alle tungmetaller der udvaskes, og det skal derfor afklares om det vaskede produkt vil overholde krav til deponering i dansk regi.

Alternativ 3.2: Et simpelt procesflowdiagram for vask af RGP efterfulgt af cementstabilisering og deponi er illustreret i Figur 4.

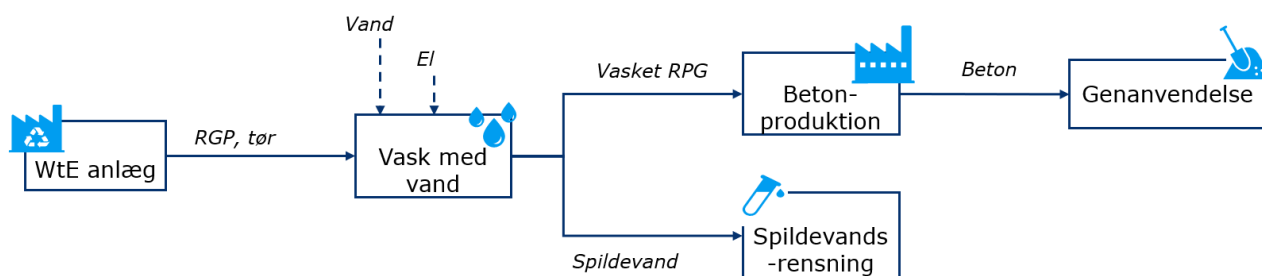


Figur 4: Procesdiagram for vask af RGP med vand og cementstabilisering til deponi

Ved vask med vand forventes det at RGP's cementlignende (puzzolan) egenskaber reduceres, da hydroxid fra overskydende hydratkalk, tilsat i røggasrensningsprocessen, vil reagere med det tilstedeværende silika og alumina og danne hydratiseringsprodukter [7]. Ved den efterfølgende cementstabilisering forventes dog, at den nødvendige mængde af cement vil være væsentligt lavere end ved stabilisering af den rå, ikke-vaskede RGF, da indholdet af opløselige salte, herunder tungmetalsalte,

vil være reduceret, så udvaskningspotentialet er reduceret. Yderligere undersøgelse af processen og den resulterende deponeringsklasse er nødvendig, men metoden forventes at være mere sikker end henholdsvis vask med vand eller cementstabilisering alene.

Alternativ 3.3: Et simpelt procesflowdiagram for vask af RGP til genanvendelse i betonproduktion er illustreret i Figur 5.



Figur 5: Procesdiagram for vask af RGP med vand til betonproduktion (3.3)

Det vurderes at det vaskede restprodukt ikke kan erstatte flyveaske i konstruktionsbeton hvis DS/EN 450-1:2012 (krav til flyveaske i beton) skal overholdes, hvor der bl.a. stilles krav til, at en del af brændslet er baseret på kul, og der skal være en vis mængde SiO_2 , Al_2O_3 og Fe_2O_3 tilstede. Der er også krav til indhold af Cl, sulfat, alkalimetaller m.m. og hvorvidt disse overholdes, må afgøres ved test. F.eks. for højt indhold af Cl kan forårsage korrosion af armeringen i betonen. Ydermere er der også krav til free lime, da det kan have en negativ indflydelse på styrken, men da det for RGP's vedkommende allerede eksisterer som hydratkalk, evt. reageret med CO_2 i røggassen, forventes ingen væsentlig yderligere ekspansion. Samme ovenstående betragtninger skal gøres, hvis den vaskede RGP erstatter tilslag eller slagge, hvor der også er krav til størrelsesfordeling og styrke. Samlet set kræver det en nærmere undersøgelse, om vasket RGP kan indgå i konstruktionsbeton og stadig opfylde DS/EN 206 (specifikation af produktion af beton), men f.eks. et krav for slagge er, at kloridindholdet skal være $<0.1\%$ hvilket vil være en betydelig reduktion af nuværende kloridindhold. Som minimum forventes det, at restproduktet skal leve op til betingelser for ikke-farligt affald, hvis det skal accepteres af branchen og/eller at det anvendes i andre betonprodukter med kontrolleret anvendelse som beskrevet i alternativ 2. Indholdet af aktivt kul kan også give udfordringer i betonen. Selvom det er under grænsen for kulstof i RGP, kan det i form af at være aktivt kul, udvise stor adsorption af luftindblandingsmidler, der anvendes til at opnå en modstandsdygtighed over for frost, og derved nedsætte deres effekt. I lighed med Alternativ 2 (CO_2 -stabilisering) ønskes det ikke, at produktet og dermed RGP spredes ukontrolleret. I den videre vurdering antages det dog, at det vaskede restprodukt kan indgå i visse former for betonproduktion.

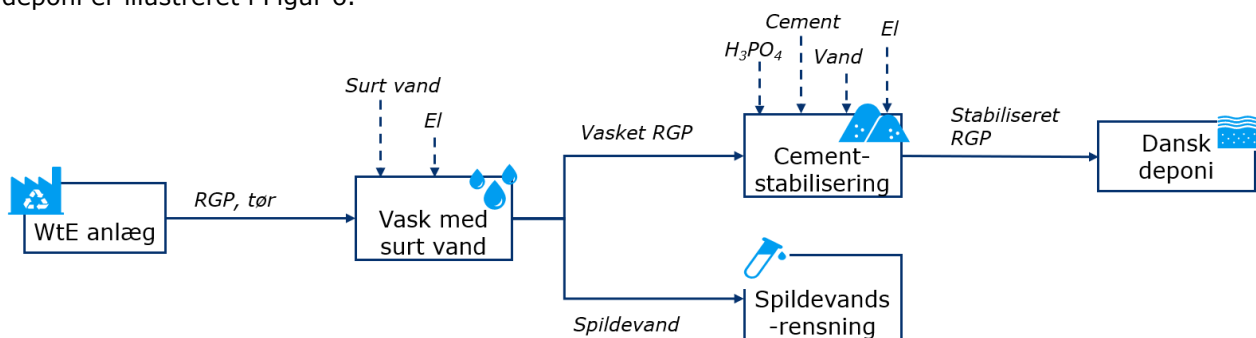
4.4 Alternativ 4 – Sur vask

Der skelnes mellem tre behandlingsmuligheder:

- 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.

Ved at vaske RGP med surt vand vil både vandopløselige salte og en stor andel af tungmetallerne udvaskes [9], hvilket begrænser risikoen for miljøeffekter ved efterfølgende håndtering af den vaskede RGP. Det forventes derfor, at den vaskede RGP er af en højere renhedsgrad end ved vask med vand (Alternativ 3).

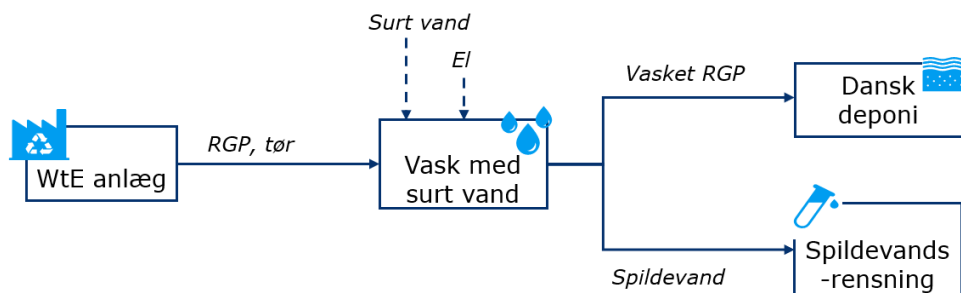
Scenario 4.1: et simpelt procesflowdiagram for sur vask af RGP efterfulgt af cementstabilisering og deponi er illustreret i Figur 6.



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

Dette scenarie er taget med da det potentielt stadig vil være nødvendigt at stabilisere restproduktet, f.eks. gennem cementstabilisering, inden den kan deponeres på et dansk deponi. Ligesom ved vask med vand, vil RGP's cementlignende egenskaber begrænses noget. Der forventes alligevel behov for en mindre mængde cement (per kg rå-RGP) end ved vask med vand (Alternativ 3.2), da syreopløselige tungmetaller er fjernet, og udvaskningspotentialitet derfor væsentligt reduceret.

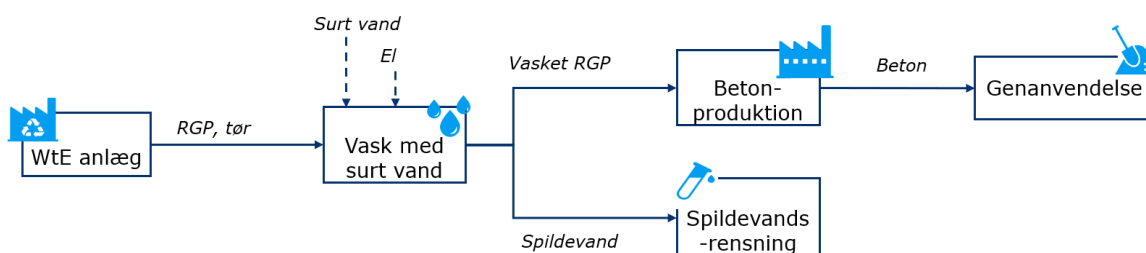
Scenario 4.2: et simpelt procesflowdiagram for sur vask af RGP til deponi er illustreret i Figur 7.



Figur 7: Procesdiagram for vask af RGP med surt vand til deponi (4.2)

For begge scenarier (4.1 og 4.2), må der foretages en vurdering for deponeringsklasse af restproduktet, herunder om det opfylder krav til ikke-farligt affald.

Scenario 4.3: Et simpelt procesflowdiagram for sur vask af RGP til genanvendelse i betonproduktion er illustreret i Figur 8.



Figur 8: Procesdiagram for vask af RGP med surt vand til betonproduktion (4.3)

I lighed med Alternativ 3.3, vurderes det umiddelbart vaskede RGP ikke kan anvendes i konstruktionsbeton efter gældende standarder både med hensyn til RGP's fremkomst og også indhold. På den anden side, kan vask med syre have ændret egenskaberne for RGP, så udvaskning af tungmetaller m.m. er minimeret, hvilket kan imødekomme kravet, om at frigivelse af farlige substanser ikke overskrides og dermed medføre lempede krav til anvendelse i betonprodukter, sammenlignet med vask med vand. Det må forventes, at RGP som minimum skal leve op til betingelser for ikke-farligt affald hvis det skal accepteres af branchen. I lighed med Alternativ 2 (CO₂-stabilisering) ønskes det ikke, at produktet og dermed RGP's eventuelle indhold af tungmetal mm. spredes ukontrolleret.

For all alternative behandlingsscenarier med surt vand, forventes der et større forbrug af syre, f.eks. sammenlignet med vask af flyveaske alene, grundet overskuddet af hydratkalk. Af rapporterede leverandører er FAW/FLUWA fra AIK Technik AG, der anvender syre fra en vådskrubber til at vaske flyveaske. Det kan lade sig gøre, fordi vådskrubberen er den primære metode til at fjerne alle sure gasser, og der generes derved også større mængder syre fra det sure trin. For de danske anlæg, med semitør røggasrensning, er der enten ingen efterstillet skrubber, eller hvis der er, vil mængden af syre i sagens natur være begrænset af den simple årsag, at den største mængde af de sure gasser fjernes i det semitørre anlæg. En grov overslagsberegning viser at der skal bruges omegnen 50 gange mere syre end den efterstillede skrubber/polisher producerer alene til at neutralisere overskuddet af hydratkalk. Som grov indikation af størrelsesorden skal der anvendes dobbelt så meget syre til neutralisering af RGP som til flyveaske. Det svarer til i omegnen af den syremængde, der ville have været blevet dannet, hvis en vådskrubber alene havde stået for fjernelse af de sure gasser i røggassen. Det forventes derfor, at der vil være betydelige omkostninger til forbrug af syre ved sur vask, medmindre der kan anvendes surt vand fra en vådskrubber proces fra et andet anlæg eller alternativt, en proces strøm fra en helt anden industri. Mht. til førstnævnte, skal det tages med betragtningen, hvad anlæggets eget behov for vask af flyveaske er, samt hvilke mængder der kræves til vask af RGP. I den videre vurdering antages det, at syre skal tilkøbes.

Alle alternative behandlingsscenarier med sur vask stiller også krav til et rensningsanlæg for spildevand med deraf følgende udledning af rensed spildevand og håndtering af en mindre mængde tungmetaltholdigt slam fra denne behandling. Dette kan medføre en betydelig omkostning at få sådan et anlæg etableret, hvis ikke anlægget har sådan et i forvejen som diskuteret i alternativ 3.A

Som ved vask med vand er det muligt at udskille salte fra det rensede spildevand og derigennem reducere mængden, saltholdigheden eller helt undgå spildevandsudledning. Dette behandles i alternativ 5.

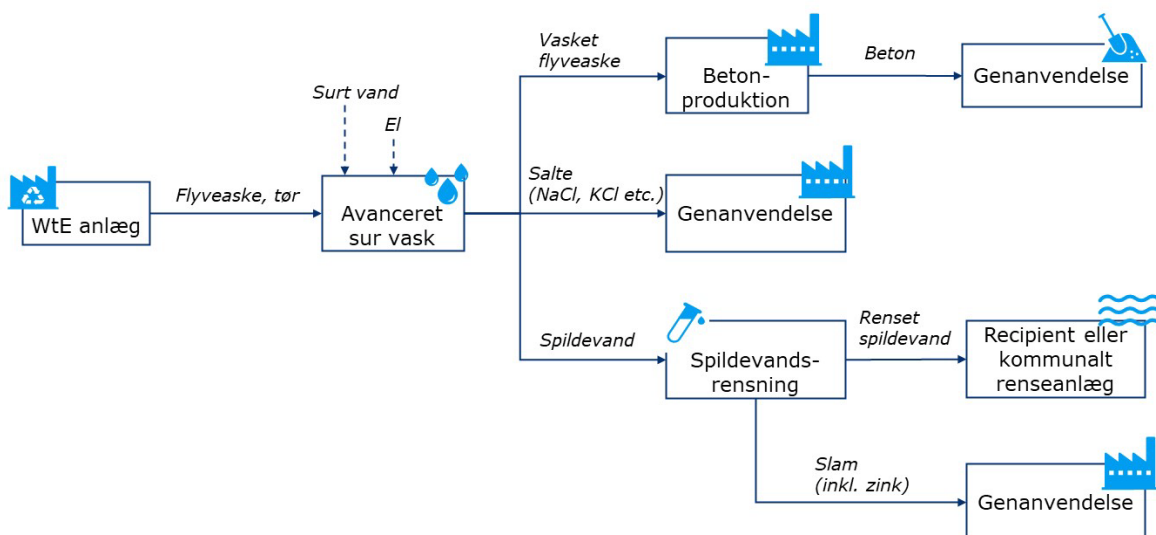
4.5 Alternativ 5 – avanceret sur vask

Avanceret sur vask er valgt som benchmark for komplekse processer, da den både inkluderer sur vask og tilrettelægger for genanvendelse af salte og metaller. Overordnet set, kunne den betragtes som den optimale og endelige løsning man sigter efter, og hvor de enkelte processer etableres og bringes i produktion trin for trin, men i dette notat forudsættes implementering i et samlet trin.

I avanceret sur vask adskilles flyveasken, eller RGP i dette tilfælde, i hhv. rensed RGP, salte og metalholdigt spildevand. Den rensede RGP kan enten deponeres eller muligvis anvendes i betonproduktion (jf. Alternativ 4.3). Saltene, hovedsageligt natriumklorid (NaCl), calciumklorid (CaCl₂) og kaliumklorid (KCl), kan udvindes og genanvendes f.eks. som vejsalt. Kaliumsalte har forholdsvis høj værdi og anvendes bl.a. til gødningsformål. Afsætning af saltene kræver dog, at de er tilpas rene. Metallerne i spildevandet kan udvindes vha. en rensningsproces. Her er det især zinkslam, som principielt er muligt at genanvende, da det indgår som mellemprodukt ved fremstilling af metallisk zink på linje med zink-koncentrat, som er et mellemprodukt fra oparbejdning af zinkmalm på dets vej til

metallisk zink. Ligesom diskuteret i alternativ 4, vil der være omkostninger med forbrug af syre, hvis ikke der kan anvendes en spildstrøm af surt vand fra en kilde. Indgår fordampning også i processen, forventes der højere omkostninger til energiforbrug, medmindre varmen kan hentes fra forbrændingsanlægget eller en ekstern kilde. Af forskellige kommercielle introducerede varianter af processen, i hvert tilfælde udbudt til flyveaske, er HaloSep fra Stena Metall, der dog er taget af markedet og fremstår i dag som demonstrationsanlæg, eller FLUWA/FLUREC fra AIK Technik AG.

Et simpelt procesflowdiagram for processen for avanceret sur vask, med flyveaske som eksempel, er illustreret i Figur 9.



Figur 9: Procesdiagram for Avanceret sur vask (Alternativ 5)

5 Evaluering af behandlingsløsninger

Til bestemmelse af en behandlingsmetode for RGP 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. [10] med RGP for øje, 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 [10]. Den klimamæssige værdi, ved eventuel udnyttelse af produkterne, indgår ikke i vurderingen.

- **Udvaskningsrisici:** Udvaskningsrisiko af skadelige stoffer vurderes i et Life Cycle Analysis (LCA) perspektiv, og er vurderet ud fra Maresca m.fl. [10].
- **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. Den teknisk implementeringstid varierer fra 21 til 43 måneder for de forskellige metoder. 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 proces anlægget, 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 RGP 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, Dvs. dermed indgår der også her en potentiel klimagevinst ved at man erstatter råvarer og produktionen af dem, inklusive deres udvinding, forædling og fremstilling.
- **Technology Readiness Level (TRL):** Måler modenheten af behandlingsmetoden og den bagvedliggende teknologi. Dette indbefatter om det lever op til krav for udvaskning og klassificering i dansk regi.
- **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. 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 for-projekter eller feasibility studier.

5.1 Evalueringer

For hver behandlingsmetode og evalueringsparameter er der givet en score (1-5), hvor 5 er den mest fordelagtige bedømmelse mens 1 er den mindst fordelagtige for det pågældende kriterie. 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 resultatet af sammenligning af behandlingsmetoderne. Ligeværdige metoder, eller hvor der er beskedne forskelle imellem dem, for samme score på den enkelte parameter

Nedstrøms processer efter behandling af RGP 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, spredning og implementeringstid medregnes slutdisponeringen, da afsætningsmuligheden skal være på plads. Det omfatter derfor både etablering og drift af anlæg samt slutdisponering af behandlet RGP.

5.1.1 Alternativ 1 – Tør cementstabilisering og deponering

Økonomi Score 5	<p>Samlet behandlingspris er vurderet til lav. Dette begrundes i, at investeringen er meget lav, dog med middel driftsomkostninger på grund af indkøb af cement og evt. fosforsyre samt omkostninger (herunder statsafgift) til deponering. Mængden der skal deponeres estimeres til 60% højere end mængden af RGP alene.</p>
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 3	<p>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 under produktionen, samt der udledes CO₂ fra råmaterialerne der anvendes i produktionen. Sammenlignet med stabilisering af flyveaske alene, forventes et højere forbrug af cement ved stabilisering af RGP og den samlede vurdering ender således med en middel score.</p>
Udvaskningsrisici Score 3	<p>Cementstabilisering er vurderet til at have middel påvirkninger på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogen og ikke-karcinogen). Derfor vurderes denne behandlingsmetode til at have generelt middel påvirkning ved brug af den rette mængde cement.</p>
Spredningsrisici Score 4	<p>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.</p>
Implementeringstid Score 5	<p>Implementeringstiden vurderes som kortest sammenlignet med de andre behandlingsmetoder, idet der er tale om kendt teknik, som kræver begrænset udvikling og afprøvning. Der er dog en række usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Test skal sikre at krav til udvaskning kan overholdes (inkl. opløselige salte) og deponeringsklasse skal afklares • 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
Nyttiggørelse Score 1	<p>Ingen</p>
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	<p>Teknologien anses for at være færdigudviklet, men afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning kan overholdes (inkl. opløselige salte).</p>
CRI (Commercial Readiness Index) Score 5	<p>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.</p>

5.1.2 Alternativ 2 – CO₂ -stabilisering og genanvendelse i beton

Anvendelse af den behandlede RGP 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 5	<p>Den samlede behandlingspris vurderes som lav. Dette begrundes i, at investeringen vurderes som relativt lave, og at driftsomkostninger vil være lave på grund af moderat forbrug samt lave omkostninger til afsætning af produktet. Der vil også være et tilskud i forbindelse med at der bindes CO₂ i processen</p>
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	<p>Elforbruget til CO₂-stabilisering er vurderet til lavt/moderat og bidragene for forbrug – især cement - anses for moderate. CO₂-optag ved stabilisering indgår positivt i klimaregnskabet.</p>
Udvaskningsrisici Score 3	<p>CO₂-stabilisering er vurderet til at have gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen). Risikoen for udvaskning ved anvendelse af aggregat i beton vurderes lidt højere, end ved deponering af stabiliseret restprodukt (alternativ 1) men samlet vurderes denne behandlingsmetode til at have mellem påvirkning.</p>
Spredningsrisici Score 2	<p>Spredningsrisikoen vurderes som forholdsvis stor ved anvendelse i betonprodukter el. lign. 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 viser dog angiveligt vist lav udvaskning.</p> <p>Ved anvendelse analogt med slagge vurderes udvaskningen at overholde restproduktbekendtgørelsens krav på niveau med slagge (kategori 2 eller 3) for metallerne, men mængden af klorid der kan udvaskes skal afklares. Det kræver også, at produktet optages på bekendtgørelsens bilag, hvilket der ikke er forudsat her.</p>
Implementeringstid Score 2	<p>Implementeringstiden vurderes som relativt lang. Der er tale om kendt teknik for processen, men at den tekniske udvikling samt myndighedsbehandling for afsætning af produktet vil tage tid.</p> <p>Af usikkerheder, der kan påvirke implementeringstiden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afprøvning skal sikre at krav til udvaskning kan overholdes, fx jf. restproduktbekendtgørelsen • 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	<p>Behandlingsmetoden leder til høj nyttiggørelse. Produktet påtænkes nyttiggjort ved anvendelse til betonprodukter – alternativ vejbygning</p>

	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 3	Middel, idet teknologien regnes som færdigudviklet. Test med restprodukt i stedet for flyveaske skal muligvis udføres, hvilket gør at den scorer lidt lavere.
CRI (Commercial Readiness Index) Score 5	Højt, 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, vil være deres forventning ved etablering af anlæg.

5.1.3 Alternativ 3.1 – 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 middel dog med høje omkostninger (herunder statsafgift) til deponering.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	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 RGP for at reducere massen der skal deponeres. Samlet vurderes energi og klima som moderat/høj.
Udvaskningsrisici Score 2	Vask m. deponi er vurderet til at have gennemsnitlig påvirkning (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på human toksicitet (karcinogen), mens påvirkning for økotoksicitet i jord er i gennemsnit lidt lavere end de øvrige behandlingsformer. Til gengæld er påvirkning på human toksicitet (ikke-karcinogen) væsentlig højere end for de øvrige behandlingsformer. Derfor vurderes denne som relativt høj påvirkning. Den relativt høje human toksicitet skyldes primært risiko for udvaskning fra deponiet, hvor den vaskede RGP placeres, 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	Vasketeknologien 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 5	Der findes anlæg til vask af flyveaske med vand, fx Ragn-Sells anlæg i Högbytorp, Sverige, med Kanadevia (tidligere navn HZI) som leverandør, men ellers anvender de udbudte vasketeknologier sædvanligvis syre. Teknologien vurderes kompleks så det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring, også med deponering af produkt og rensning af spildevand.

5.1.4 Alternativ 3.2 – Vask m. vand, cementstabilisering og deponering

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 relativ høj. Investeringsomkostninger vurderes som middel pga. af omkostninger til procesanlæg og spildevandsrens med en vis kompleksitet samt udstyr til cementstabiliseringen. Driftsomkostninger vurderes som høje på grund af omkostninger til cementblanding og deponering af det vaskede produkt (herunder statsafgift) samt spildvandsrens
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 3	Elforbruget til vask m. cementstabilisering er vurderet til middel. Der anvendes dog cement, som har et højt energiforbrug og CO ₂ udledning under produktionen.
Udvaskningsrisici Score 4	Vask m. cementstabilisering er vurderet til at have lavere påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen). Der er en vis risiko for udvaskning med spildevand og fra slam fra spildevandsrens. Derfor vurderes denne behandlingsmetode til at have relativ 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

	<p>skadelige udslip, og at der anvendes tæt bundmembran og opsamling og behandling af perkolat.</p> <p>I forhold til stabilisering og udvaskning med syre (alternativ 4.1) vurderes det dog, at der er højere risiko for spredning.</p>
Implementeringstid Score 4	<p>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:</p> <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 1	<p>Ingen, dog mulighed for udvinding af opløste salte. Forbrug af cement koster materialebrug.</p>
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	<p>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.</p>
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	<p>Der findes anlæg til vask af flyveaske med vand, fx Ragnsells anlæg i Högbytorp, Sverige, med Kanadevia som leverandør men ellers anvender de udbudte vasketeknologier sædvanligvis syre. Teknologien vurderes kompleks så det vil være nødvendigt at engagere leverandører med erfaring. Der mangler også erfaring med kombinationen af cementstabilisering og behandling af spildevand.</p>

5.1.5 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	<p>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.</p>
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	<p>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 RGP, for at produktet kan indgå i betonproduktion. Der spares på klimapåvirkning ved at andre tilslagsmaterialer til betonen spares, herunder evt. cement. Samlet scores denne behandling til forholdsvis høj.</p>

Udvaskningsrisici Score 4	Vask af restprodukt og genanvendelse i beton er vurderet til at have relativt lav påvirkning (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen).
Spredningsrisici Score 2	Spredningsrisikoen vurderes som middel/høj, når det vaskede produkt anvendes i beton, hvis denne anvendes uden større begrænsninger. Det tages her i betragtning, at RGP 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 for afsætning af produkt, og derfor kræver nogen udvikling og afprøvning. Der er desuden 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 det vaskede produkt 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 2	Vasketeknologien anses for at være i det væsentlige færdigudviklet. For det vaskede produkt er det mere usikkert og afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. Dertil kommer tekniske krav og standarder til anvendelse i beton overholdes. Ligeledes skal behandling af spildevand skal afprøves under den konkrete anvendelse. Overordnet scores relativt lavt.
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. Det gælder også for anvendelse af det vaskede produkt til betonprodukter og rensning af spildevand, hvilket gør, at det vurderes som middel score.

5.1.6 Alternativ 4.1 – Vask m. surt vand, cementstabilisering og deponering

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 1	Behandlingsprisen vurderes som meget høj. Både investerings- og driftsomkostninger vurderes som høje, dette på grund af forholdsvis høje omkostninger til procesanlæg med en vis kompleksitet og relativt høje omkostninger til syre, cementblanding og omkostninger til
---------------------------	--

	deponering af det vaskede restprodukt (herunder statsafgift). Dog forventes marginalt lavere resterende mængde restprodukt end tilsvarende vask med vand grundet den øget udvaskning ved brug af syre.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 2	Elforbruget til sur vask m. cementstabilisering er vurderet til moderat/højt. Udledningen af drivhusgasser er på et moderat niveau bl.a. pga. forbruget af cement samt et mindre bidrag fra produktion af syre. Dog spares der cement i forhold til stabilisering af uvasket RGP da en reduceret mængde skal stabiliseres. Samlet scores denne behandling til mellem/lavt.
Udvaskningsrisici Score 5	Sur vask m. cementstabilisering er vurderet til at have lave påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på økotoksicitet i jord, men forbrug af cement belaster lidt og der er en vis risiko for udvaskning med spildevand og fra slam fra spildevandsrens. For human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen) vurderes påvirkningen til lav. Samlet vurderes denne til 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 1	Ingen (dog mulighed for udvinding af salte). Hvis der kan findes en kilde til surt vand, f.eks. fra en vådskrubber, kan anvendelse af produkt til neutralisering spare kalk til behandling. 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 f.eks. AIK Teknik AG, der 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.

5.1.7 Alternativ 4.2 – Vask m. surt 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 komplekst procesanlæg, men uden anlæg til stabilisering. Driftsomkostninger vurderes som middel/høj, især med høje omkostninger til syreforbrug og til deponering (herunder statsafgift). Når RGP vaskes med syre, bliver mængden af behandlet restprodukter mindre end med vand (scenarie 3.1). Det påvirker forbrug og deponeringsomkostninger.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 4	Elforbrug til sur vask m. deponi er vurderet som et middelforbrug sammenlignet med de øvrige behandlingsformer. Udover et mindre CO ₂ bidrag fra syre produktion, er der ikke yderligere væsentlige forbrug, som udleder klimagasser. Det er dog muligt, at der skal bruges energi til tørring af den vaskede RGP for at reducere massen, der placeres i deponi. Samlet scores energi og klima som middel/høj.
Udvaskningsrisici Score 3	Sur vask m. deponi er vurderet til at have middel påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på økotoksicitet i jord. For human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen) 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 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 RGP 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 2	Ingen (dog mulighed for at supplere med udvinding af salte og zink). Hvis der kan findes en kilde til surt vand, f.eks. fra en vådskrubber, kan anvendelse af produkt til neutralisering spare kalk til behandling.
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.
--	--

5.1.8 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	Den samlede løsning vurderes forholdsvis høj. Investeringen vurderes også som middel med et forholdsvis komplekst procesanlæg, men uden anlæg til stabilisering. Driftsomkostninger vurderes som høje pga. af forbrug af syre men da RGP bruges til beton vil der ikke være deponerings omkostninger og der kan formentlig tages en pris for produktet. Derfor ender den samlede score som relativt højt.
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 tilslagsmaterialer, når det vaskede restprodukt anvendes i beton. Samlet scores denne behandling til relativ høj påvirkning.
Udvaskningsrisici Score 5	Sur vask m. beton er vurderet til at lavere gennemsnitlige påvirkninger (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på både økotoksicitet i jord, human toksicitet (karcinogen) og human toksicitet (ikke-karcinogen). Derfor vurderes denne til generelt lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 3	Spredningsrisikoen vurderes som middel, når det vaskede restprodukt anvendes i beton uden større begrænsninger. Det er dog under forudsætning, at langt det meste udvaskelige tungmetal og salte er vasket ud af restproduktet under syrevasken.
Implementeringstid Score 2	Implementeringstiden vurderes som relativt lang, idet der ikke er tale om kendt teknik for afsætning af produkt, og derfor kræver nogen udvikling og afprøvning. Der er desuden 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 det vaskede produkt i beton erstatter tilsvarende råvarer i form af finkornet sand eller andet tilslag. Hvis der kan findes en kilde til surt vand, f.eks. fra en vådskrubber, kan anvendelse af produkt til neutralisering spare kalk til behandling.

TRL (Technology Readiness Level) Score 3	Teknologien for syrevask anses for være fuldt udviklet. For det vaskede produkt er det mere usikkert og afprøvning skal sikre, at krav til udvaskning kan overholdes. Dertil kommer tekniske krav og standarder til anvendelse i beton overholdes. Ligeledes skal behandling af spildevand skal afprøves under den konkrete anvendelse. Overordnet bliver scoren middel.
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 betonbrug.

5.1.9 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 2	Behandlingspris vurderes som relativt høj, blandt andet på grund af højt syreforbrug. Investeringen vurderes som meget høj på grund af høje omkostninger til procesanlæg med stor kompleksitet. Driftsomkostninger vurderes som middel da omkostning til afsætning af produkt(er) er lave, og genanvendelse af salte og anvendelse af RGP i beton kan være indtægtsgivende. Forbrug af syre trækker den anden vej.
Energiforbrug og klimapåvirkning Score 2	Elforbruget til avanceret sur vask er vurderet til højt, og herudover er det et termisk energibehov til tørring af salt og evt. vasket restprodukt. Behandlingen vurderes til samlet at have et meget højt energiforbrug. Dette kompenseres dog af besparelser andre steder, når salte og Zn genanvendes, dvs. sparet energiforbrug i produktion af de erstattede råvarer, som erstattes.
Udvaskningsrisici Score 5	Avanceret sur vask er vurderet til at have lavere påvirkning (i forhold til de øvrige behandlingsmetoder) på human toksicitet (karcinogen), mens påvirkning for økotoxikitet i jord er lidt lavere og påvirkning på human toksicitet (ikke-karcinogen) væsentlig lavere end de øvrige behandlingsformer i gennemsnit (da Zn udvindes og dermed ikke udvaskes fra RGP eller spildevandsslam). Derfor vurderes denne som lav påvirkning.
Spredningsrisici Score 3	Spredningsrisikoen vurderes som middel, når den vaskede RGP anvendes i beton, og denne anvendes uden større begrænsninger. Saltene, der udvindes, forudsættes også tilpas rene og det forudsættes at langt det meste udvaskelige tungmetal er vasket ud under syrevasken inden anvendelsen i beton.

Implementeringstid Score 1	<p>Implementeringstiden vurderes som lang selvom der er tale om kendt teknik for selve processen, og der derved kræves begrænset udvikling og afprøvning. Men for afsætning af produkt vil der kræves noget udvikling og afprøvning.</p> <p>Af forhold og usikkerheder, som kan påvirke implementeringstiden:</p> <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 RGP – og krav til salte og zinkslam. Dog kan anlæg etableres og drives uden disse faciliteter som mellem-løsning • 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	<p>Behandlingsmetoden leder til meget høj grad af nyttiggørelse. Anvendelse af det vaskede produkt 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. Desuden, hvis der kan findes en kilde til surt vand, f.eks. fra en vådskrubber, kan anvendelse af produkt til neutralisering spare kalk til behandling.</p>
TRL (Technology Readiness Level) Score 4	<p>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.</p>
CRI (Commercial Readiness Index) Score 4	<p>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.</p>

5.2 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 vigtigt 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	Evalueringsskriterier								Weighted Score - total ekskl. TRL og CRI
	Økonomi*	Energiforbrug og klimapåvirkning	Udvaskningsrisici	Spredningsrisiko	Implementeringstid*	Nyttiggørelse	TRL	CRI	
1. Tør cementstabilisering	↑ 5	⇒ 3	⇒ 3	⇒ 4	↑ 5	↓ 1	⇒ 4	↑ 5	3,8
2. CO2 stabilisering	↑ 5	⇒ 4	⇒ 3	⇒ 2	⇒ 2	⇒ 4	⇒ 3	↑ 5	3,4
3.1. Vask m. deponi	⇒ 3	⇒ 4	⇒ 2	⇒ 3	⇒ 3	⇒ 2	⇒ 4	↑ 5	2,8
3.2. Vask m. cementstabilisering	⇒ 2	⇒ 3	⇒ 4	⇒ 4	⇒ 4	↓ 1	⇒ 4	⇒ 4	3,0
3.3. Vask m. beton	⇒ 4	⇒ 4	⇒ 4	⇒ 2	⇒ 2	⇒ 4	⇒ 2	⇒ 3	3,3
4.1. Sur vask m. cementstabilisering	↓ 1	⇒ 2	↑ 5	↑ 5	⇒ 4	↓ 1	⇒ 4	⇒ 4	2,9
4.2. Sur vask m. deponi	⇒ 3	⇒ 4	⇒ 3	⇒ 4	⇒ 3	⇒ 2	↑ 5	↑ 5	3,1
4.3. Sur vask m. beton	⇒ 4	⇒ 4	↑ 5	⇒ 3	⇒ 2	⇒ 4	⇒ 3	⇒ 4	3,6
5. Avanceret sur vask	⇒ 2	⇒ 2	↑ 5	⇒ 3	↓ 1	↑ 5	⇒ 4	⇒ 4	2,9
Vægtning:	25%	10%	15%	15%	20%	15%			

Figur 10: Evalueringsmatrix

Behandlingsmetode	Økonomi		
	Investering	Driftsomkostninger	Samlet økonomi
1	↑ 5	⇒ 3	5
2	⇒ 4	↑ 5	5
3,1	⇒ 3	⇒ 3	3
3,2	⇒ 3	↓ 1	2
3,3	⇒ 3	↑ 5	4
4,1	⇒ 2	↓ 1	1
4,2	⇒ 3	⇒ 2	3
4,3	⇒ 3	⇒ 4	4
5	↓ 1	⇒ 3	2

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

Behandlings- metode	Implementeringstid (teknik)					Afklarings af afsætning og godkendelser			Total		Score - total
	Teknisk udvikling, test, forprojekt	Udbud, kontrahering	Projektering, konstruktion	Idriftsættelse	Sum teknik	Afsætning af produkter	Myndigheds-behandling af anlæg	Myndigheds-behandling af produktafsætning	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	9	9	6	24	56	👉 3
3,2	8	6	15	3	32	6	9	6	21	53	👉 4
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). Se også punktet Implementeringstid øverst i afsnit 5 for forbehold omkring tidsestimat.

På baggrund af evalueringsmatricen, rangerer metoderne i følgende rækkefølge: (1) cementstabilisering, (2) vask m. surt vand og genanvendelse i beton og (3) CO₂-stabilisering. Herefter følger de øvrige scenarier, og lavest er vask med vand, hvor produktet ledes til deponi.

6 Anbefalet koncept

Ingen af koncepterne kan gøres inden for 12-24 måneder inklusive myndighedsbehandling men baseret på evalueringen og overvejelser, anbefales tør cementstabilisering med deponering som en foretrukket option. Det er her vigtigt, at løsningen er teknisk enkel, etableringstiden kort og investeringen begrænset. Tør cementstabilisering kan desuden betragtes som et supplement til de andre beskrevne teknologier som evt. kan implementeres på et senere tidspunkt.

Anbefalingen understøttes af følgende yderligere fordele:

- Teknologi kendt, afprøvet og kommercielt tilgængelig
- Implementeringstiden er kortest
- Samlet økonomi 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

7 Referencer

- [1] Danish Waste Solutions, Mulighed for nyttiggørelse eller deponering af restprodukter fra danske affaldsforbrændings-anlæg i Danmark, 15. februar 2024.
- [2] Tore Hulgaard, Rambøll, Semitørt restprodukt – Muligheder, Workshop for restproduktgenanvendelse, Dansk restprodukt håndtering, 5/12-2021.
- [3] Lampris et al., Solidification/stabilisation of air control residues using Portland cement: Physical properties and chloride leaching, *Waste Management* 29 (2009), 1067–1075.
- [4] Bournonville et al., Stabilization of minerals by reaction with phosphoric acid, *Evolution of Model Compounds, Process Safety and Environmental Protection*, 84(B2), 117–124,
- [5] O.C.O technology, product sheet, <https://oco.co.uk/wp-content/themes/crush-theme/assets/pdf/2025/UKCA-MLS-6F-All-In-EN13242-2022.pdf>
- [6] J. Todorovic, H. Ecke et al., Demobilisation of critical contaminants in four typical waste-to-energy ashes by carbonation, *Waste Management* 26 (2006), 430–441.
- [7] Akula et al., Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils, *MethodsX* 7 (2020).
- [8] Chimenos et al., Optimizing the APC residue washing process to minimize the release of chloride and heavy metals, *Waste Management* 25 (2005), 686-693.
- [9] Tian et al., Effects of water, acid or alkali washing on WtE bottom ash, fly ash and combined ash, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12 (2024).
- [10] 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.