

REGION SYDDANMARK

ADRESSE COWI A/S
 Parallelsvej 2
 2800 Kongens Lyngby

FORURENINGSFANEN FRA DET TIDLIGERE GRINDSTEDVÆRKET

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

VIDENSOPSAMLING/LITTERSØGNING MED PRODUKTER/-
 PROCESSER, DER KAN ANVENDES I FORBINDELSE MED IN-SITU-
 OPRENSNING OG ON-SITE RENSNING AF FORURENET GRUNDEVAND

INDHOLD

1	Indledning og formål	4
1.1	Indledning	4
1.2	Formål	4
2	Reaktanter/produkter til in-situ-oprensning	6
2.1	Afgrænsning og vidensopsamling/litteratursøgning	6
2.2	Indsatsområde for in-situ afværge	9
2.3	Oversigt og vurdering af reaktanter	15
2.4	A: Kemisk reduktion	17
2.5	B: Anaerob biologisk nedbrydning (SRD)	20
2.6	C: kombination af kemisk reduktion og biologisk nedbrydning	27
2.7	D: Sorption	29
2.8	E: Kombination af sorption med kemisk reduktion og/eller anaerob biologisk nedbrydning	29
2.9	F: buffere til ph regulering (neutrale forhold mellem ca. 6-8)	34
2.10	G: Bakteriekulturer	35
2.11	Effekt af in-situ afværge for farmaceutiske stoffer	35
2.12	Dannelse af uønskede stoffer ved in-situ oprensning som kan udgøre en risiko mod overfladevand	36
2.13	Anbefaling til brug af in-situ reaktanter	37
3	AOP og andre potentielle on-site behandlingsmetoder	40
3.1	Metode for vidensopsamling/litteratursøgning	40
3.2	Erfaring fra andre brancher	40
3.3	Indsatsområde for on-site rensning	43

PROJEKTNR.

DOKUMENTNR.

A271643

01

VERSION

UDGIVELSESDATO

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

KONTROLLERET

GODKENDT

2.0

Vers. 1.0: 1. december 2025
 Vers. 2.0: 11. december 2025

TJR, MMBR

TJR

3.4	Oversigt og vurdering af on-site rensning herunder "Treatment Train"	43
3.5	Anbefaling til brug af AOP	46
4	Litteraturliste	49
4.1	Referencer ift. In-situ reaktanter	49
4.2	Referencer ift. AOP løsninger	54

BILAG

Bilag A	Tegninger	
A.1	Oversigtskort med forureningsudbredelse af klorerede opløsningsmidler	
A.2	Tværsnit, opstrømning til Grindsted Å	
A.3	Tværsnit med vinylklorid langs Grindsted Å (Rambøll, 2024b)	
A.4	Uorganisk kemi ved Grindsted Å, Terrænnære magasin	
Bilag B	Oplysning om indsatsområde 1 og 2	
B.1	Indsatsområde 1	
B.2	Indsatsområde 2	
Bilag C	Oversigt over kommercielle produkter til in-situ oprensning	
Bilag D	Oversigt over AOP og andre potentielle on-site behandlingsmetoder	

Forkortelser

AC	Aktivt kul
AOP	Advanced Oxidation Processes
cisDCE	Cis-dichlorethylen
Dhc	Dehalococcoides (specifikke bakterier som kan nedbryde klorerede opløsningsmidler)
DPT	Direct Push Teknologi (Geoprobe eller lignende)
EVO	Emulsified Vegetable Oil
ISCR	"In Situ Chemical Reduction" (kemisk reduktion)
GAC	Granular aktivt kul
MFS	Miljøfremmede stoffer
mZVI	Mikro Zero Valent Iron
nZVI	Nano Zero Valent Iron
PAC	Pulver aktivt kul
PCE	Tetraklorethylen
PRB	Permeabel Reaktiv Barriere
RO	Omvendt osmose
ROI	"Radius Of Influence" (influenradius ved injektion = afstand fra injektionsboring)
SRD	"Stimuleret Reduktiv Deklorering" = biologisk reduktion
SZVI	Sulficeret Zero Valent Iron
TCE	Trikllorethylen
Treatment Train	Flere afværgemetoder i kombination
VC	Vinylklorid
ZVI	Zero Valent Iron (Nul valent jern = Fe(0))

1 Indledning og formål

1.1 Indledning

Dette notat omfatter vidensopsamling/litteratursøgning med produkter/processer, der kan anvendes i forbindelse med oprensning af forureningsfanen fra det tidligere Grindstedværkets fabriksgrund (herefter kaldet forureningsfanen). Forslag til oprensning er beskrevet i (Rambøll, 2024b).

Arbejdet er opdelt i 2 forskellige delopgaver for afværgelse af forureningsfanen henholdsvis:

- › 1. Produkter til in-situ-oprensning af forureningsfanen.
- › 2. Avancerede Oxidations Processer (AOP) til on-site rensning af oppumpet forurennet grundvand.

I notatet gives der ligeledes en vurdering og anbefalinger til de mest egnede reaktanter/processer til oprensning af forureningsfanen.

Arbejdet er udført af COWI iht. Region Syddanmarks rammeaftale af marts 2022 vedrørende ressourcepersoner på jordområdet.

Oversigtskort med placering af forureninger fra det tidligere Grindstedværk er vist på Figur 1-1.



Figur 1-1 Oversigtskort for de fire forureninger i Grindsted, kilde: Region Syddanmark.

1.2 Formål

Formålet med de 2 delopgaver er følgende:

Produkter til in-situ-oprensning

Formålet er at udpege de bedst egnede produkter til efterfølgende laboratorie- og felttest af den anbefalede oprensningsmetode, som omfatter samtidig anvendelse af kemisk reduktion og/eller anaerob biologisk nedbrydning. Desuden skal det vurderes om kemisk og/eller biologisk reduktion kan kombineres med sorption.

Produkterne skal vurderes i forhold til, om de er egnede til anvendelse i indsatsområderne 1 og 2 lige nord for åen (se Figur 1-2). Produkterne skal kunne medvirke til at reducere indhold af vinylklorid (VC) og evt. cisDCE. Det skal indgå i vurderingen, om produkterne i forbindelse med nedbrydningen kan danne andre stoffer, som kan udgøre en risiko overfor overfladevand. Det ønskes desuden, at det vurderes, om de anbefalede produkter kan have effekt overfor de farmaceutiske stoffer, der relaterer sig til forureningsfanen (barbiturater og sulfonamider samt nedbrydningsprodukter heraf), herefter blot omtalt som Grindstedværkstoffer.

Avancerede Oxidations Processer (AOP) til on-site rensning

Formålet er at udpege den bedst egnede AOP metode til on-site rensning af op-pumpet grundvand fra forureningsfanen. Resultater fra afværgeprogram i 2019 (COWI, 2019) og laboratorieforsøg i 2020 (COWI, 2020) skal indgå i vurderingen. Desuden skal mulighederne for etablering af et "Treatment Train" vurderes. AOP-metoderne og eventuel "Treatment Train" skal primært vurderes i forhold til evnen til at kunne nedbryde Grindstedværkstofferne og sekundært i forhold til evnen til at nedbryde VC.



Figur 1-2

Oversigtskort der viser placering af indsatsområde 1 og 2 (Rambøll, 2024b)

2 Reaktanter/produkter til in-situ-oprensning

2.1 Afgrænsning og vidensopsamling/litteratursøgning

Projektet er afgrænset til at omfatte følgende tre overordnede reaktanttyper samt kombination af disse reaktanter:

- › In-situ kemisk reduktion (ISCR): Kemisk reduktion omfatter tilsætning af reaktive materialer, der resulterer i et kraftigt fald i grundvandsmiljøets redoxpotentiale. Der sker abiotisk nedbrydning af forurening. Oftest anvendes forskellige former for jern.
- › In-situ biologisk reduktion (Stimuleret Reduktiv Deklorering = SRD): SRD er en anaerobe bioremedieringsmetode, hvor man tilføjer donorer (ofte organiske stoffer) til et forurenat grundvandsmiljø for at fremme væksten af specifikke mikroorganismer, som kan nedbryde klorerede forbindelser til uskadelige stoffer (ethen og ethan). Teknikken kombineres oftest med tilsætning af specifikke bakterier.
- › In-situ immobilisering vha. sorbenter: Nogle forureningskomponenter kan sorberes på aktivt kul eller andre sorbenter. Dette udnyttes in-situ ved at indbygge det sorberende materiale i en permeabel væg eller på anden vis ved at injicere det i grundvandszonen. For at nedbryde forureningen kombineres sorbenter med reaktanter, der kan nedbryde forureningen (fx. ved kemisk reduktion og/eller biologisk reduktion).

In-situ kemisk oxidation (ISCO) er ikke omfattet af litteratursøgningen, idet regionen har vurderet at oxidation er en uegnet metode i forureningsfanen. ISCO er en teknik, hvor der tilsættes et kraftigt oxidationsmiddel til jord eller grundvand, som destruerer forureningsstofferne kemisk.

2.1.1 Metode for vidensopsamling/ litteratursøgning

COWI har udført en vidensopsamling/litteratursøgning af relevant litteratur vedr. de tre reaktanttyper, herunder:

- › Indhentet viden fra relevante danske in-situ projekter, vejledninger, erfaringsopsamlinger mm.
- › For sorptionsreaktanter, har vi endvidere fundet oplysninger fra forhandlers beskrivelse (link givet i Bilag C), suppleret med evt. præsentationer/webinarer om produkter og eksempler på lokalitetsanvendelse i felten fra deres hjemmesider.
- › For vurdering af effekt af reaktanter på farmaceutiske stoffer har vi gennemgået relevante DTU artikler, notater og studenterprojekter, se referencer i afsnit 4.1.2, 4.1.3 og 4.1.4.
- › Generel Google søgning af de 3 kategorier af reaktanter:

- › Generelle beskrivelser af reaktanter fra "case studies", erfaringsopsamlinger, videnskabelige artikler mm.
- › Indhentning af viden fra firmaer om kommercielt tilgængelige reaktanter (produkter), herunder fakta-ark om produkterne (se Bilag C).
- › Internetsøgning i amerikanske organisationer/firmaer herunder:
 - › US EPA (Hazardous Waste Clean-Up Information (CLU-IN) On-line Characterization and Remediation Databases Fact Sheet)
 - › Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR),
 - › ITRC (The Interstate Technology and Regulatory Council),
 - › ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program).
- › Interview/sparring med internationale eksperter i Nordamerika:
For at understøtte denne vurdering har Leah MacKinnon, M.A.Sc., og Neal Durant, Ph.D., begge fra Geosyntec Consultants, bidraget med deres ekspertise inden for in-situ oprensningsteknologier. Leah er Senior Principal med mere end 25 års erfaring inden for grundvandsoprensning, med særlig fokus på screening af teknologier fra laboratorieskala til fuldskalaimplementering. Neal er ligeledes Senior Principal og har over 30 års erfaring med ledelse af undersøgelser samt af oprensningsdesign. Både Leah og Neal har i to årtier støttet projekter i forskellige danske regioner.
- › Telefonisk drøftelse med Palle Ejlskov, Ejlskov A/S vedr. produkterne BOSS100® og CAT100®.

2.1.2 Væsentlig litteratur

Tabel 2-1 viser væsentlig litteratur, som er indgået i vurdering af reaktanter.

Tabel 2-1 Væsentlig litteratur som er indgået i vurdering af reaktanter

REFERENCE	BESKRIVELSE	NØGLEORD
WSP (2022a)	Denne rapport giver en god oversigt over fordele, ulemper og anvendelighed af de forskellige tilgængelige reaktanter til in-situ afværge baseret på erfaringer fra Danmark og i udlandet. Projektet fokuserer på at afdække videnshuller, erfaringsniveau og dokumentation af de mest almindelige reaktanter, der kan anvendes overfor klorerede opløsningsmidler. Reaktanterne er delt i 4 hovedkategorier: a) Jernbaserede reaktanter, hovedsageligt nulvalent jern (ZVI), b) reaktanter til stimulering af reduktiv deklorering c) aktiv kul reaktanter og d) reaktanter til in-situ kemisk oxidation (ISCO).	Litteraturstudie om reaktanter til grundvandsoprensning
	DTU har gennem en årrække gennemført udviklingsprojekter vedr. forureningsfanen. Det er udmundet i en række artikler i videnskabelige tidsskrifter og en række notater og studenterprojekter omhandlende geologiske/hydrogeologiske forhold, forureningsforhold, forureningsflux og især naturlig nedbrydning af Grindstedværkstoffe såvel som klorerede ethener i fanen.	Se afs. 5.1.2-5.1.4

REFERENCE	BESKRIVELSE	NØGLEORD
SIREM, 2016	Laboratorieforsøg på grundvand forurenet med cisDCE og VC i grundvandsfane i Odense (Rugårdsvej 234). Test af kemisk reduktion med fire jern-reaktanter: mZVI (Ferox-Flow™, FeH4 og Atomet 86) samt mZVI + kulstof-donor (EHC®). Kun én af mZVI fungerede tilfredsstillende i laboratoriet ved Batchtest (Ferox Flow fra Hepure, USA). EHC® var også effektiv men blev fravalgt pga. stor dannelse af methan.	Laboratorietest af reaktanter (ZVI og ZVI + kulstof). Nedbrydning af VC og cisDCE.
Region Syddanmark, 2025	Resultater af en reaktiv permeable barriere (PRB) med nedbrydning af cisDCE og VC i grundvandsfanen fra Rugårdsvej 234, Odense (Se Region Syddanmark, 2025). Resultater viser meget effektiv nedbrydning med mikro-ZVI efter 8 års drift. VC indhold op til ca. 10.000 µg/l ved baseline er reduceret til < 1 µg/l (> 99,9 % reduktion).	Dansk erfaring med fuldskala-oprensning med Mikro-ZVI til nedbrydning af VC og cisDCE.
Rambøll, 2023a; Ottosen et al. 20021a,b	Dokumentationsrapport for anvendelse af sorbent kombineret med anaerob biologisk nedbrydning (Plumestop® +donor og biokultur) og artikler fra projektet. Resultater viser udfordringer med fordeling af Plumestop® (aktivt kul) i barriere, hvor et tættere net af injektionspunkter blev løsningen. Plumestop® blev spredt mest i grundvandet strømningsretning og barrieren er derfor mest fuldkommen nedstrøms injektionspunkterne. Nedbrydningen af klorerede ethener førte i starten til en ikke komplet deklorering, men resulterede i ophobning af cisDCE, hvilket viste sig at være grundet mangel på næringsstoffer (N og P) og/eller vitamin B12. Fornyet bioaugmentering og tilsætning af næringsmedie med vitamin B12 resulterede i komplet deklorering nedstrøms barrieren. Tiltrømmende TCE ledte til desorption af cisDCE, dannet ved nedbrydning af TCE. Den videre nedbrydning skete således i en bred zone nedstrøms barrieren (senere monitoring viser samme billede).	Dansk erfaring med sorbent + kulstof donor i pilotforsøg
Region Syddanmark, 2018, 2020 og 2021.	Erfaringer med anaerob biologisk reduktion i Kærgård Plantage. Forureningen i Kærgård Plantage er sammenlignelig med forureningsfanen (Grindsted). Afværgestrategien i Kærgård Plantage er dog forskellig sammenlignet med afværgestrategien for forureningsfanen i Grindsted. I Kærgård sker der kildeoprensning i gruberne mens der for forureningsfanen i Grindsted planlægges en faneoprensning. Grundvandskemi og hydrogeologien er sammenlignelige i Kærgård og Grindsted, så mange af de erfaringer som er opnået ved fuldskalaoprensningen i Kærgård Klitplantage kan også bruges i relation til forureningsfanen. Ved recirkulationsløsning (aktivt system) er anvendt laktat som kulstof-donor (letomsættelig og opløst donor). Til passiv drift er der anvendt en emulgeret sojaolie (EVO). Der er tilsat særlig bakteriekultur målrettet til lave pH forhold (KB1Plus®). Der er ligeledes brugt både opløst buffer (kalium karbonat, kalium bikarbonat) og en langsomfrigivende buffer (calciumkarbonat) til pH optimering.	Erfaring med biologisk reduktion i Kærgård Plantage
Geosyntec, 2019	Resultater af laboratorieforsøg med reaktanter til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler i grundvandsfane (Hvedemarken, Farum). Resultater af laboratorieforsøg med indledende Batchtest af fem ZVI jernreaktanter til brug i PRB (primært cisDCE). To af reaktanterne var kommercielle produkter med kombination af mZVI og kulstof-donor (EHC® and Provect-IR®). Herudover to kommercielle reaktanter med Sulfideret ZVI (AquaZVI™ og Nanofer-25DS). Desuden blev der testet et ikke kommercielt produkt fra Københavns Universitet med Sulfidiceret ZVI. Der blev således testet for både abiotiske og biotisk reduktion. Der blev testet med og uden bakterietilsætning (bioaugmentation). Der blev lavet kolonnetest med den mest lovende reaktant (Provect-IR®). Dette produkt blev valgt frem for det tilsvarende produkt EHC®, da EHC® dannede høje methanindhold. S-ZVI produkterne blev fravalgt, da de ikke var så effektive til at nedbryde cisDCE. På baggrund af kolonneforsøg blev Provect-IR® valgt til test i pilotforsøg (PRB løsning).	Dansk erfaring med laboratorietest af reaktanter (ZVI, SZVI og ZVI + kulstof). Nedbrydning af primært cisDCE.

REFERENCE	BESKRIVELSE	NØGLEORD
Region Hovedstaden, 2025b	Denne rapport omhandler 5 års drift af pilotforsøg med PRB med brug af Pro- vect-IR® (kombination af mikro-ZVI og kulstof-donor) – se Geosyntec, 2019. Re- sultater fra pilotforsøget viser, at den udførte PRB virker effektiv til nedbrydning af forurening med klorerede opløsningsmidler (primært cisDCE) og at PRB efter ca. 5 år stadig virker effektivt, dog med tegn på at kulstof-donoren er ved at være opbrugt. Det har ikke været muligt at skelne mellem abiotiske og biotiske processer, men det vurderes at begge processer sker. Der er tilsat bakteriekul- tur til PRB'en (KB1 kultur).	Dansk erfaring med fuldskalaoprensning med Mikro-ZVI + kul- stof til nedbrydning af primært cisDCE.
Region Hovedstaden, 2025a	Moniteringsrapport efter 10 års drift af PRB med mZVI. Demonstrationsprojekt med Jet injektion i moræneler med tilsætning mZVI. Forurening med klorerede opløsningsmidler (primært trichlorethylen (TCE)) på Møllevej, Nivå. Jet injektion viste god og homogen levering af mZVI reaktant med ROI (Influensradius af spredning) på gennemsnitligt ca. 5 m, hvilket er betydeligt mere end ved tradi- tionel DPT injektion (her typisk 1-2 m med mZVI), 10 års monitoring viser at mZVI stadig er meget effektiv til at nedbryde klorerede opløsningsmidler (TCE, cisDCE og VC) til ethen/ethan. Det vurderes, at der både sker abiotisk og bio- tisk nedbrydning. Der blev ikke tilsat bakteriekultur, men læring fra projektet (og andre) er, at der altid bør tilsættes bakteriekultur, idet der også sker biologisk reduktion, hvor der bl.a. dannes VC.	Dansk erfaring med mZVI – 10 års monite- ring
Geosyntec Consul- tants, 2023	Direct Push Technology Injection of Solid Amendments - Practitioners' Guide. Rapporten giver en god beskrivelse af muligheder og begrænsninger ved brug af DPT (fx. Geoprobe) til injektion af reaktanter på fastform (nano, kolloid, mikro og granular). Desuden giver rapporten en oversigt over danske erfaringer med DPT injektioner med forskellige reaktanter på fast form.	Best practices + Dan- ske erfaringer med in- situ reaktanter ved DPT injektioner.
US EPA, 2019	Fact Sheet – Activated Carbon Based Technology for In Situ Remediation. Dette fakta-ark giver en god oversigt over mulighed for anvendelse af sorbenter til grundvandsoprensning, herunder kombination med andre reaktanter.	Fakta-ark om brug af sorbenter til in-situ op- rensning.

2.2 Indsatsområde for in-situ afværge

Jf. (Rambøll, 2024b) er indsatsområdet for in-situ oprensning i område 1 og 2 føl-
gende:

- › Terrænnære magasin: ned til 15 m u.t.
- › Øvre sekundære magasin: fra ca. 15-30 m u.t.

Det er efterfølgende aftalt med Region Syddanmark, at vurdering og anbefalinger
af reaktanter til in-situ oprensning i nærværende rapport, skal vurderes ud fra for-
holdene i det terrænnære magasin ned til ca. 15. m u.t. Anbefaling til reaktanter til
det sekundære magasin indgår således ikke i vurderingerne i denne rapport.

I Bilag B er der en sammenfatning af de væsentligste forhold i indsatsområdet,
som har betydning for vurderingen af reaktanterne. Vurderingen er baseret på in-
formationer fra DTU-artikler og notater samt Rambølls rapporter med undersøgel-
ser og forslag til afværgeindsats (Rambøll, 2024a og 2024b). Det bemærkes, at det
er en overordnet vurdering af forholdene og at oplysningerne ikke nødvendigvis er
dækkende for hele område 1 og 2. I den følgende vurdering har vi fokuseret på de

dele af fanen i det terrænnære magasin, hvor forureningsindholdet af VC er højest, idet de vurderes som det mest kritiske for in-situ oprensningen. Til støtte for vurderingen er der medtaget følgende resultater i bilag Bilag A:

- › Bilag A.1 viser udbredelse af forureningsfane for klorerede opløsningsmidler
- › Bilag A.2 viser et geologisk profil gennem område 1 og 2 til Grindsted Å. Figuren viser modellerede strømpile for grundvandstrømning til Grindsted Å for forskellig udbredelse af brunkulslaget (Lignite) mellem det terrænnære og sekundære magasin.
- › Bilag A.3 viser et geologisk tværsnit langs Grindsted Å ved område 1 og 2 med påvist VC-indhold.
- › Bilag A.4 viser en række temakort fra den nationale boringsdatabase Jupiter med uorganisk kemi ved område 1 og 2.

I det følgende gives en vurdering af forholdene i område 1, som har betydning for udvælgelse af de mest egnede reaktanter.

Praktiske forhold

Karakteristik af område 1 er beskrevet i (Rambøll, 2024b): *"Område 1 ejes af Billund Kommune. I området mellem Vestre Boulevard og Søndre Ringvej er naturområdet nord for åen defineret som mose, der er beskyttet efter naturbeskyttelseslovens §3. Generelt er der i dele af området begrænset plads pga. kort afstand mellem matrikelskel til parcelhuse og åbrink, ligesom der flere steder er beplantning/skov. Det kan ligeledes forventes at jorden er meget blød og våd, men det har dog været muligt at etablere boringer langs hele strækningen."*

COWI vurdering: Der kan være nogle praktiske udfordringer ved borearbejdet, men det har ikke den store betydning for valg af reaktant. Såfremt området oversvømmes af opstigende grundvand i perioder med højt grundvandsspejl, vil det have betydning for valg af reaktant, idet det ikke er ønsket, at der kan ske spredning af reaktanter til terræn og evt. overfladestrømning til åen.

Den tætte afstand til Grindsted Å er også en udfordring, idet der kan være en risiko for spredning af reaktanter til Grindsted Å.

Geologiske forhold

Det terrænnære magasin består af permeable sandede aflejringer - typisk mellemkornet sand, men heterogent således der er indhold af både mere fine og grove materialer.

Overordnet er geologien egnet til injektion af reaktanter. Reaktanter kan injiceres med forskellige boremetoder (DPT, filtersatte boringer, Jet Injektion, gravede render, "soil mixing" mm.). Heterogeniteten af de sandede aflejringer medfører, at der ikke kan forventes en homogen fordeling af reaktanter.

Hydrogeologiske forhold

Der er umiddelbart følgende forhold, som har betydning for valg af reaktanter ud fra de hydrogeologiske forhold:

- › Høj hastighed af grundvandsstrømning: På grund af den korte afstand til Grindsted Å er grundvandets hastighed i område 1 noget højere end i større

afstand fra åen. Høje grundvandshastigheder er ikke optimalt for en in-situ afværgelse i form af en PRB-løsning. Det skyldes, at tykkelsen af en PRB ved høje grundvandshastigheder skal være noget større end for lave hastigheder for at opnå den samme opholdstid (reaktionstid). Dette er praktisk muligt, men jo større tykkelse af en PRB jo større etablerings- og driftsudgifter.

- › Vertikal strømning tæt på åen: Tæt på åen er der komplekse strømningsforhold med både vertikal og horisontal strømning til Grindsted Å, fra både det sekundære og terrænnære magasin, se eksempel på strømningsscenarier i Bilag A.2. Særligt den vertikale strømning vil være vanskeligt at håndtere med en PRB-løsning.
- › Potentielt opstrømmende grundvand til terræn i område 1 er ligeledes en udfordring for nogle reaktanter, idet reaktanterne kan spredes med grundvandet til terræn.

Forureningsforhold

Forureningen med klorerede opløsningsmidler i område 1 består hovedsageligt af VC. Der er også relativt høje indhold af cisDCE, mens indholdet af moderstofferne tetrachlorethylen (PCE) og TCE er lave.

For den biologiske reduktion er forholdene i forureningsfanen allerede gunstige, idet der findes de rette specifikke nedbrydere (bakterier). Forekomst af ethen/ethan underbygger de gunstige nedbrydningsforhold.

For den kemiske reduktion er forholdene ikke så gunstige, idet VC og cisDCE er vanskeligere at nedbryde end moderstofferne TCE og PCE (længere halveringstider). Det betyder at tykkelsen af en PRB til nedbrydning af fx. VC typisk skal være noget større end for nedbrydning af TCE og PCE.

Brug af sorbenter (aktivt kul) er ligeledes ikke så gunstig for tilbageholdelse af VC sammenlignet med moderstofferne PCE og TCE og til dels også cisDCE.

Uorganisk kemi

Den uorganiske grundvandskemi har stor betydning for renseeffekten af reaktanter.

- › Redoxforhold: redoxforholdene i det terrænnære magasin er jernreducerende-sulfatreducerende. Redoxforholdene er gunstige for både den kemiske og biologiske reduktion (nedbrydning). Begge metoder kræver stærkt reducerende forhold.
- › Ilt og nitrat: Indholdet af ilt og nitrat er lavt, hvilket er gunstigt for både den biologisk og kemiske reduktion af klorerede opløsningsmidler.
- › Sulfat: Sulfatindholdet varierer en del. I de mere reducerede dele af fanen er indholdet lavt (ned til 20 mg/l), men andre steder er der målt relativt høje indhold (100-150 mg/l).

For den biologiske nedbrydning vil et højt sulfatindhold svække nedbrydningen og medføre et relativt stort forbrug af kulstof-donor. Ligeledes vil holdbarheden af donor være lavere. Så overordnet vil et højt sulfatindhold øge udgifterne til reaktant og injektion. Det vurderes dog ikke at sulfatindholdet vil

hæmme den biologiske nedbrydning, blot øge udgifterne.

For den kemiske reduktion vil et højt sulfatindhold medføre større korrosion af en jern-reaktant, hvilket kan reducere holdbarheden af reaktanten. Overordnet vurderes det dog ikke, at sulfatindholdet i det terrænnære magasin er kritisk for den kemiske reduktion.

› pH og alkalinitet:

Den kemiske reduktion ved brug af jernreaktant (ZVI) vil typisk medføre at pH stiger, da dannelse af hydroxid-ioner (OH^-) gør vandet mere basisk. Med den lave alkalinitet (indhold af bikarbonat) i det terrænnære magasin må det forventes, at pH vil stige ved brug af en jernreaktant ($> \text{pH } 8$). Dette kan være problematisk for den naturlige biologiske nedbrydning af de klorerede opløsningsmidler, som er mest effektiv under neutrale pH forhold (pH 6-8).

Den biologiske reduktion vil modsat en ZVI reaktant medføre pH fald (dannelse af brintioner). Med den lave alkalinitet i det terrænnære magasin må det forventes, at pH vil falde ved den biologiske reduktion ($\text{pH} < 6$). Dette vil gøre den biologiske nedbrydning langsommere og dermed ikke så effektiv.

Det er muligt, at der ved kombination af kemisk reduktion med ZVI og biologisk reduktion sker en neutralisering af de to modsatrettede processer, således at pH vil forblive neutral. Det vides ikke på nuværende tidspunkt.

Sammenfattende må det konkluderes, at den lave alkalinitet kan medføre uhensigtsmæssige pH forhold.

Det bemærkes, at det har været nødvendigt at tilsætte pH buffer ved den biologiske oprensning, som sker i Kærgård Klitplantage (Region Syddanmark, 2018) for at opretholde en neutral pH. Det samme kan vise sig at være nødvendigt i det terrænnære magasin i forureningsfanen.

› Aggressiv kuldioxid: Der måles aggressiv kuldioxid i det terrænnære magasin. Opløst kuldioxid (CO_2) i grundvandet gør vandet kemisk aggressivt og kan medføre øget korrosion af ZVI og hermed forkorte "holdbarheden" af ZVI.

Hvis den aggressive CO_2 fjernes, falder kulsyreindholdet, pH stiger, og vandet kan ikke længere holde så meget kalk i opløsning. Dette kan medføre udfældning af calciumcarbonat på ZVI og medføre en mindre reaktiv ZVI. Det bemærkes at indholdet af calcium-ioner i det terrænnære magasin er lavt (blødt vand) – så det er ikke sikkert, at der er potentiale for kalkudfældning.

Overordnet må det sammenfattes, at der kan være forhold, som er ugunstige for den kemiske reduktion pga. aggressivt grundvand, men det er på nuværende tidspunkt uvist, hvorvidt det vil have nogen negativ betydning.

› Specifikke nedbrydere (bakterier): Der er højt indhold af specifikke nedbrydere, som kan nedbryde de klorerede opløsningsmidler til ethen/ethan. Dette er gunstigt for den biologiske reduktion, idet der allerede nu sker nedbrydning af de klorerede opløsningsmidler til ethen/ethan. Det er også gunstigt for den

kemiske reduktion, idet der ved den kemiske reduktion typisk både sker abiotiske og biotisk nedbrydning af de klorerede opløsningsmidler.

- › Grindstedværkstoffer: Både den kemiske og biologiske reduktion medfører stærkt reducerende forhold, hvilket ikke er gunstigt for den naturlige nedbrydning af Grindstedværkstoffer. Disse stoffer nedbrydes bedst under mere iltede forhold.

2.2.1 Område 2

Overordnet er forholdene nogenlunde de samme i område 1 og 2. Der er dog nogle forskelle, som har betydning for valg af de mest egnede reaktanter.

Praktiske forhold	Karakteristik af område 2 er beskrevet i (Rambøll, 2024b): <i>"Område 2 er det tidligere rensningsanlæg, hvor der i dag findes en spildevandspumpestation, tre sparebassiner og et overløbsbygværk. Den sydlige del af grunden er drænet for at mindske vandtrykket på førnævnte installationer. Drænvandet ledes til udløbet fra overløbsværket og dermed til Grindsted Å via to store rør. Grunden ejes af Billund Vand & Energi. Området dækker en stor del af fanens bredde, og der er generelt gode pladsforhold på området."</i> COWI vurdering: Der er generelt færre praktiske udfordringer i område 2, herunder at der ikke opstrømmer grundvand til terræn. Det vil også være nemmere at udføre borearbejde, da der ikke er de samme våde/fugtige forhold som i område 1. Område 2 ligger også typisk i større afstand fra Grindsted Å, så der er mindre risiko for spredning af reaktanter til Grindsted Å. Den sydlige del af område 2 ligger dog ganske tæt på åen.
Geologiske forhold	De geologiske forhold i det terrænnære magasin er tilsvarende som område 1. Der er dog usikkerhed om der findes et lavpermeabelt lag af lignit (brunkul), se Bilag A.2.
Hydrogeologiske forhold	De hydrogeologiske forhold i området længst væk fra åen er mere optimale end for område 1: › <u>Hastighed af grundvandsstrømning:</u> Det vurderes at grundvandshastigheden i den centrale og østlige del af område 2 sandsynligvis vil være lavere end for område 1 pga. en længere afstand til Grindsted Å – hvilket er fordelagtig for både den kemiske og biologiske reduktion. › <u>Strømningsforhold:</u> I det terrænnære magasin vurderes det, at strømningen overvejende sker horisontalt mod åen. Dette er fordelagtig mht. etablering af en PRB. › <u>Opstrømmende grundvand til terræn:</u> Vandspejlet i større afstand fra Grindsted Å findes ca. 2,5 m u.t. Der er derfor ikke de samme udfordringer med opstrømmende grundvand til terræn som for område 1.
Forureningsforhold	Der er nogenlunde samme forureningsprofil som for område 1. Dog er andelen af cisDCE større i område 2. Dette er gunstigt for brug af sorbenter idet cisDCE adsorberes bedre end VC. I den centrale og nordlige del af forureningsfanen i

område 2 ligger forureningen noget dybere sammenlignet med område 1. Det er her usikkert hvor forureningen presses op i det terrænnære magasin.

Uorganisk kemi

Den uorganiske grundvandskemi i område 2 er nogenlunde tilsvarende område 1. Der er dog indikationer på, at sulfatindholdet er lavere i område 2. Dette er positivt for både den kemiske og biologiske reduktion. Der må forventes de samme udfordringer med pH, alkalinitet og aggressiv kuldioxid som for område 1.

2.3 Oversigt og vurdering af reaktanter

Tabel 2-2 viser en oversigt over de reaktanter, som er vurderet i dette notat. Reaktanterne er opdelt i følgende hovedgrupper:

- › A: Kemisk reduktion (ISCR)
- › B: Anaerob biologisk nedbrydning (SRD)
- › C: kombination af kemisk reduktion og biologisk nedbrydning (ISCR + SRD)
- › D: Sorption (SORB)
- › E: Kombination af sorption med kemisk reduktion og/eller anaerob biologisk nedbrydning (SORB + ISCR + SRD)
- › F: Buffere til pH regulering
- › G: Bakteriekulturer

Til biologisk reduktion tilsættes typisk også diverse næringsstoffer, vitaminer o.lign. Disse er ikke medtaget i vores beskrivelse, men skal selvfølgelig inddrages i nødvendigt omfang.

I det følgende gennemgås de enkelte reaktanter. I Bilag C er der en oversigt over kommercielle produkter efter samme opdeling som i Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Oversigt over reaktanter for kemisk reduktion, anaerob biologisk nedbrydning, sorbenter samt kombinationer af disse. Desuden oversigt over buffere og bakteriekulturer.

KATEGORI	REAKTANT	BESKRIVELSE/NUMMERERING	FORM	YDERLIGERE INFORMATION
A: KEMISK REDUKTION	ZVI	A1: ZVI.	Fast stof (granulat, mikro, kolloid, nano)	CLU-IN Technologies > Remediation > About Remediation Technologies > In Situ Chemical Reduction > Overview
	Sulfideret ZVI (S-ZVI)	A2: Sulfidiseret ZVI (S-ZVI), hvor jernpartiklerne er overfladebehandlet med jernsulfid.	Fast stof (kolloid, nano)	
	Øvrige jernreaktanter	A3: Magnetit, Grøn rust (jernhydroxider af jern(II) og jern(III)), Opløste jernreaktanter (f.eks. FeCl ₂ , FeCl ₃)	Fast stof (pulver) Fast stof (pulver, granulat) Opløst	
B: ANEROB BIOLOGISK REDUKTION	Langsomfrigivende elektrondonorer	B1: Emulgeret vegetabilsk olie (EVO).	Opløst i emulsion	CLU-IN Technologies > Remediation > About Remediation Technologies > Bioremediation > Anaerobic Bioremediation (Direct)
		B2: "Mix af kulstof-donorer" som kan opløses langsomt i grundvandszonen. Kulstof-donor kan være fede syrer, glycerol (glycerin), lecithin, kitin, cellulose m.fl.	Typisk pulverform, gel-form, suspension	

KATEGORI	REAKTANT	BESKRIVELSE/NUMMERERING	FORM	YDERLIGERE INFORMATION
		B3: Barkflis/kompost	Fast form (granulat, smuld o.lign.)	
	Letomsættelige elektrondonorer	B4: Består typisk af laktat, alkoholer (f.eks. ethanol) eller melasse.	Vandopløselige og opløst form	
C: KOMBINATION AF KEMISK og BIOLOGISK REDUKTION		C1: ZVI + kulstof-donor	ZVI (fast stof fx. mikro-, kolloid- eller nanoform) + kulstof-donor (granulat, pulver, gel, suspension, opløst i emulsion mm)	CLU-IN Technologies > Remediation > About Remediation Technologies > In Situ Chemical Reduction > Overview
		C2: S-ZVI + kulstof-donor	S-ZVI (fast stof fx. kolloid- eller nanoform) + kulstof-donor (suspension, pulver mm)	
D: SORPTION	Sorption som "stand alone" produkt	D1: Tilsætning af sorbent fx. i form af aktivt kul til grundvandszonen som adsorberer forureningsstoffer.	Fast form (GAC, PAC, kolloid)	CLU-IN Technologies > Remediation > About Remediation Technologies > Activated Carbon-Based Technology for In Situ Remediation > Overview USEPA guidance document on situ activated carbon remediation Navy In Situ Activated Carbon Case Study Review
E: KOMBINATION AF SORPTION MED KEMISK REDUKTION OG/ELLER BIOLOGISK REDUKTION	Sorption og kemisk nedbrydning	E1: Tilsætning af sorbent med integreret ZVI til grundvandszonen. Her sker der både adsorption og abiotisk (primært) nedbrydning. Vil typisk kombineres med bioaugmentation.	Fast form eller suspension	
		E2: Tilsætning af sorbent med integreret SZVI til grundvandszonen. Her sker der både adsorption og abiotisk (primært) nedbrydning. Vil typisk kombineres med bioaugmentation.	Fast form eller suspension	
	Sorption og anaerob biologisk nedbrydning	E3: Tilsætning af både sorbent og elektrondonor til grundvandszonen. Her sker der både adsorption og anaerob biologisk nedbrydning. Vil typisk kombineres med bioaugmentation.	AC + donor for SRD (PlumeStop® +AquaFix)	
	Sorption og kemisk nedbrydning og anaerob biologisk nedbrydning	E4: Tilsætning af sorbent, ZVI og elektrondonorer til grundvandszonen. Her sker der både adsorption og abiotisk og anaerob biotisk nedbrydning. Vil typisk kombineres med bioaugmentation.	AC med integreret ZVI/AC+ZVI + donor for SRD (CAT100, HRC+, PlumeStop® +AquaFix+S-Micro-ZVI)	
F: BUFFERE TIL PH REGULERING (NEUTRALE FORHOLD MELLEM CA. 6-8)	Hurtigomsættelige (opløste)	F1: Opløste og hurtigomsættelige: Bikarbonat eller karbonat.	Opløst	Bilag C
	Langsomtfrigivende buffere (langtidsholdbare)	F2: Calciumkarbonat (CaCO ₃) på fast form (kolloid).	Fast form (granulat, pulver, kolloid)	
		F3: Magnesiumhydroxid: Mg(OH) ₂ eller Magnesiumkarbonat: MgCO ₃	Fast form (granulat, pulver, kolloid)	
G: BAKTERIEKULTUR	Bakterielle kulturer, der indeholder	G1: Der findes en række kommercielle bakteriekulturer. I Danmark er der størst	Væske	Bilag C

KATEGORI	REAKTANT	BESKRIVELSE/NUMMERERING	FORM	YDERLIGERE INFORMATION
	deklorerende mikroorganismer	erfaring med KB1 kulturen fra SIREM i Canada.		

2.4 A: Kemisk reduktion

Alle reaktanter for kemisk reduktion i Tabel 2-2 er jernreaktanter.

2.4.1 Nul valent Jern (ZVI)

Det hyppigst anvendte reaktive materiale er ZVI. Ved tilsætning til grundvandszonen sker der en løbende korrosion af ZVI under dannelse af brint, hydroxylioner og divalent jern, Fe^{2+} . Under korrosion sker der et fald i redoxpotentiale som medfører, at blandt andet de klorerede opløsningsmidler kan oxidere det metalliske jern og nedbrydes ved såkaldt reduktiv deklorering (VMR, 2007). ZVI leveres i forskellige partikelstørrelse (granular, mikro, kolloid og nano), hvor de mest finkornede produkter er de mest reaktive.

Kommercielle produkter

Der findes en hel række af kommercielle produkter med forskellig partikelstørrelse, se Bilag C.

Levering til grundvandszonen

Den mest anvendte leveringsform er DPT injektion. Udbredelsen fra en injektionsboring ("Radius Of Influence" = ROI) er størst for nano- og kolloid-ZVI (typisk 1-3 m). For mikro- og granular er ROI typisk 0,5 – 2 m (Geosyntec, 2023). DPT injektion har en dybdebegrænsning, som i forureningsfanen er vurderet til ca. 15-20 m u.t. Mod terræn vil det typisk ikke være muligt at injicere i den øverste 1-1,5 m af jorden.

Nano og til dels også kolloid ZVI kan også tilsættes i filtersatte borer. ROI må her forventes at være lille, sandsynligvis maksimalt 1-2 m.

Granular ZVI leveres typisk i gravede render, men kan også injiceres med DPT eller Jet Injektion.

Holdbarhed i grundvandszonen

Holdbarheden (longevity) i grundvandszonen øges med partikelstørrelsen. Holdbarheden af mikro-ZVI i danske grundvandsmagasiner med god bufferkapacitet og stabile geokemiske forhold typisk mindst 5 år og oftest omkring 10 år eller mere. Fx. viser monitoring på 2 danske lokaliteter, hvor der er anvendt mikro-ZVI, (Region Syddanmark, 2025) og (Region Hovedstaden, 2025) en holdbarhed på mindst 8 og 10 år. Holdbarheden af nano- og kolloid ZVI vurderes at være betydeligt mindre (måneder – få år).

I forureningsfanen må der forventes en kortere levetid for alle ZVI reaktanter. Det skyldes det aggressive grundvand, som kan korrodere ZVI.

Spredning i grundvandszone

Mobiliteten af ZVI i jorden er meget begrænset, når først det er leveret til grundvandszonen, da partiklerne enten udfælder eller danner agglomerater (WSP,

2022a). For nogle kommercielle nano- og kolloid ZVI tilsættes stoffer for at holde ZVI i suspension, så de kan tilsættes fx. i filtersatte boringer. Her vil ZVI muligvis kunne spredes lidt længere, men typisk ikke mere end få meter. Det vurderes derfor ikke, at der er den store risiko for, at der spredes ZVI til Grindsted Å ved brug af ZVI i forureningsfanen.

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen

Ulemper ved anvendelse af ZVI er bl.a.:

- › Den lave alkalinitet i forureningsfanen kan medføre at pH stiger, hvilket er negativt for den naturlige biologiske nedbrydning, som sker i fanen.
- › Det aggressive kuldioxid kan korrodere ZVI, således at holdbarheden af ZVI falder.
- › Generelt er ZVI mest effektivt overfor moderstofferne PCE og TCE og mindst effektivt over for nedbrydningsprodukterne VC og cisDCE. Resultater fra Rugårdsvej i Odense (Region Syddanmark, 2025) viser dog en meget effektiv nedbrydning af både VC og cisDCE.
- › Den høje strømningshastighed er udfordrende for brug af ZVI i forureningsfanen. Det skyldes at opholdstiden i en PRB vil være relativt lav ift. en grundvandsfane med lavere strømningshastighed. De væsentligste designkriterier for en ZVI PRB er 1) opholdstid i barrieren og 2) halveringstiden for nedbrydningen af forureningsstofferne. Halveringstiden for cisDCE og VC er typisk noget højere end for moderstofferne PCE og TCE (VMR, 2007). En høj halveringstid og en samtidig høj strømningshastighed vil medføre at tykkelsen af en PRB skal være relativ stor. En samtidig lav holdbarhed af ZVI pga. det aggressive grundvand medfører relative høje etablerings- og driftsudgifter.

Fordele ved anvendelse i forureningsfanen

Fordelen ved anvendelse af ZVI er bl.a.:

- › Gunstige redoxforhold i fanen uden ilt og nitrat. Der er lidt uklarhed omkring indholdet af sulfat, men umiddelbart vurderes sulfatindholdet ikke at medføre betydelige reduktion i holdbarhed af ZVI
- › Den uorganiske grundvandskemi med lav alkalinitet og "blødt vand" (lavt indhold af calcium) kan også være gunstig for metoden, idet potentialet for udfældninger med calciumkarbonat er lille. Disse udfældninger kan være problematiske ved høj alkalinitet og højt indhold af calcium (hård vand), idet udfældninger kan reducere effektiviteten af ZVI.
- › Erfaring fra andre sager i Danmark viser god nedbrydning af cisDCE og VC.
- › ZVI er en moden og velafprøvet metode internationalt og til dels også i Danmark.
- › Metoden er velegnet til kombination med biologisk reduktion og/eller sorption.

Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE

På nuværende tidspunkt er det usikkert, om der med ZVI som "stand alone" teknik, kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af især VC.

Anvendelse i forureningsfane

Kemisk reduktion vurderes egnet til anvendelse i forureningsfane til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder VC og cisDCE. ZVI er mindre egnet som "stand alone" metode og anbefales anvendt i kombination med biologisk reduktion og/eller sorption. Vi vurderer, at mikro-ZVI og granular-ZVI er de mest egnede reaktanter. Fordelen ved granular-ZVI er, at levetiden er højere end for de andre ZVI reaktanter. Ulempen er mindre reaktivitet og at der ikke er så mange muligheder for levering til grundvandszonen. Mikro-ZVI er mere reaktiv og kan tilsættes via DPT metoder.

2.4.2 Sulfideret ZVI (S-ZVI)

Sulfideret ZVI indebærer, at jernpartiklerne er overfladebehandlet med jernsulfid. Sulfideringen kan hæmme korrosion og medføre at ZVI har længere holdbarhed og sulfideringen kan både medføre større og mindre nedbrydningseffektivitet for forureningsstoffer.

Det er generelt erfaringen at effektiviteten er større ved S-ZVI for fx. TCE og mindre for cisDCE og VC sammenlignet med traditionel ZVI (WSP, 2022a). Dette blev netop observeret ved laboratorieforsøgene på Hvedemarken i Region Hovedstaden (Geosyntec, 2019), hvor S-ZVI blev fravalgt som reaktant til en grundvandsoprensning af primært cisDCE. Erfaring fra Nordamerika (Geosyntec, 2025) er ligeledes at nedbrydningsraterne for VC og cisDCE generelt er lavere for S-ZVI sammenholdt med ZVI.

Anvendelse af S-ZVI er stadig relativt umoden og på forsøgsstadiet, hvorfor den på nuværende tidspunkt vurderes at være en mindre egnet reaktant i relation til Forureningsfane. Der sker dog en stor forskningsindsats (NAVFAC, 2025) og det er muligt, at S-ZVI på længere sigt kan være en egnet reaktant.

2.4.3 Øvrige jernreaktanter

I løbet af de senere år er der forsøgt anvendt forskellige jernminerale som reaktanter til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder:

- › Magnetit (fast stof),
- › Grøn rust (jernhydroxider af jern(II) og jern(III)),
- › Forskellige former for opløste jernreaktanter (f.eks. FeCl_2 , FeCl_4)

I forbindelse med test af jernreaktanter til anvendelse i kombination med "soil Mixing" blev der i (Region Hovedstaden, 2020) bl.a. testet følgende jernreaktanter:

- › FeCl_2 ,
- › FeCl_2 +magnetit,
- › ZVI+ FeSO_4

Testene viste, at alle reaktanter kan nedbryde TCE, men nedbrydningstiden var relativ lang. Der blev ikke lavet forsøg med nedbrydning af VC eller cisDCE.

I forbindelse med laboratorietest af reaktanter til immobilisering af arsen på Collstrup grunden i Hillerød (Region Hovedstaden, 2024b) blev der bl.a. testet på de to nedenstående jernreaktanter:

- › Opløst Fe(II) reaktant ($\text{FeSO}_4 + \text{FH}$ (ferrihydrit)): Resultaterne viste at opløste Fe(II) ikke er stabile under tilstedeværelse af ilt. Der vil derfor være store praktiske udfordringer ved feltapplikation pga. risiko for udfældninger. Desuden vil der være udfordringer med lav pH, som skal håndteres fx. med buffer.
- › Grøn rust (jernhydroxider af jern(II) og jern(III)): Resultaterne viste at grøn rust ikke er stabilt ved tilstedeværelse af atmosfærisk ilt, hvorfor det er svært at håndtere i felten. Grøn rust er desuden ikke et kommercielt produkt.

Sammenfattende vurderes "øvrige jernreaktanter" ikke at være så egnede som reaktanter i Forureningsfanen. Det skyldes dels at de ikke vurderes særlige effektive over for forureningskomponenterne VC og cisDCE og dels at de er vanskelige at håndtere i felten. Desuden er "Grøn rust" ikke et kommercielt produkt.

2.5 B: Anaerob biologisk nedbrydning (SRD)

Anaerob biologisk nedbrydning eller "Stimuleret Reduktiv Deklorering" (SRD) er en teknik, hvor man stimulerer de naturligt forekommende bakteriers nedbrydning af stoffer, der kan omdannes ved reduktion. Stimulering sker typisk ved at tilsætte kulstofkilde (elektrondonorer, i det følgende kaldt donor) og evt. næringsmedie (N og P samt B vitamin). Teknikken kan kombineres med tilsætning af specifikke bakterier (VMR, 2007). SRD er en moden teknologi og har været anvendt på tusindvis af lokaliteter verden over. Erfaringsniveauet med teknologien og kendskabet til de forskellige kommercielle produkter er samlet set højt (WSP, 2022a).

Der sker allerede betydelig anaerob biologisk nedbrydning ved reduktiv deklorering i forureningsfanen og der er et højt indhold af specifikke nedbrydere. Nedbrydningen i fanen er ikke umiddelbart begrænset mht. organisk stof/donor eller specifikke nedbrydere. Nedbrydningshastigheden er rimelig høj, men nedbrydningen kan potentielt øges ved tilsætning af en elektron donor. Elektron donorer kan dog også medføre negative følgeefferter i form af øget konkurrence fra methanogene bakterier samt sulfiddannelse, som kan virke inhiberende.

Udførte test med grundvand fra forureningsfanen peger på, at der kan være en begrænsning på baggrund af manglende næringsstoffer og/eller vitamin B12 i forhold til at opnå en mere effektiv nedbrydning. Nogle donorer kan indeholde et eller flere af disse næringsstoffer og vitaminer eller det kan tilføres for sig selv. Nogle kulturer til bioaugmentering indeholder desuden bakterier, som kan danne Vitamin B12 og leve i symbiose med de specifikke nedbrydere, hvilket formentlig er en mere holdbar løsning i forhold til eventuelle mangler.

I Tabel 2-2 har vi inddelt donor i 2 overordnede kategorier henholdsvis langsomtfrigivende og opløste/letomsættelige donorer. Desuden er de langsomtfrigivende donorer underopdelt i 3 kategorier ud fra den form, som de leveres på: Emulgerede/opløste donorer (EVO), donor på fastform (bark/flis og kompost) samt en mellemløst som typisk består af et mix af donorer (både på fast form eller i suspension).

Fælles forhold for SRD reaktanter

Fælles for ovennævnte donorer er, at forholdene i forureningsfanen generelt er gunstige for SRD, herunder redoxforholdene og høj forekomst af specifikke nedbrydere. Forekomst af ethen/ethan samt primært forekomst af nedbrydningsprodukterne VC og cisDCE dokumenterer, at der i dag allerede sker en væsentlig nedbrydning af klorerede opløsningsmidler. De kritiske forhold med lav alkalinitet og høj hastighed af grundvandsstrømning er også fælles for donorerne. Det er også fælles for reaktanterne at de alle kan kombineres med kemisk reduktion og/eller sorption.

I det følgende gennemgås de forskellige donortyper.

2.5.1 Emulgeret vegetabilsk olie (EVO), langsomfrigivende

EVO er den mest anvendte langsomfrigivende donor i Danmark. EVO bruges bl.a. til oprensningen i Kærgård Klitplantage, så erfaringsgrundlaget i Danmark er stort.

Kommercielle produkter

Der findes en hel række kommercielle produkter med forskellige dråbestørrelser og forskellige tilsætningsstoffer (fx. vitaminer, næringsstoffer, buffer), se Bilag C. De fleste EVO produkter indeholder også en opløst/letomsættelig donor, fx. laktat eller alkoholer, for at opnå en hurtig nedbrydningsproces eller hurtige ændringer i redoxforhold.

Levering til grundvandszonen

Fordelen ved EVO er, at denne kan tilsættes grundvandszonen i både filtersatte borer og ved DPT injektion. Tilsætning gennem filtersatte borer har den fordel, at det kan tilsættes til større dybde end ved DPT og at udbredelsen ved injektion (ROI) er noget større. I (Geosyntec, 2023) er der angivet ROI op til 8 m.

Levetid i grundvandszonen

Holdbarheden vil typisk være fra 1 år til mere end 5 år afhængig af de konkrete forhold. Den høje grundvandshastighed vil reducere levetiden af EVO i forureningsfanen.

Spredning i grundvandszone

Der kan ske spredning af donor i ret stor afstand fra injektionspunktet i nedstrøms retning. I Kærgård Klitplantage er der observeret forhøjet NVOC mindst ca. 30 m nedstrøms injektionsområdet. Det kan være kritisk, hvis der injiceres tæt på Grindsted Å. Det kan dog også være en fordel, hvis der injiceres i større afstand fra Grindsted Å. Her behøves der ikke så bred en PRB som for ZVI idet donor i modsætning til ZVI vil spredes i nedstrøms retning og kan danne en bred biobarriere.

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen

Ulemper ved anvendelse af EVO er bl.a.:

- › Den lave alkalinitet i forureningsfanen kan medføre pH reduktion, hvilket er negativt for den naturlige biologiske nedbrydning, som sker i fanen. I givet fald skal der tilsættes buffer for pH kontrol.
- › Den høje strømningshastighed (og evt. højt sulfatindhold) kan medføre reduceret levetid.
- › Risiko for spredning til Grindsted Å og også risiko for spredning til terræn ved højt grundvandsspejl.

Fordele ved anvendelse i forureningsfanen	Fordelen ved anvendelse af EVO er bl.a.: › EVO er en moden og velafprøvet reaktant internationalt såvel som i Danmark. › EVO kan tilsættes via filtersatte borer, som giver mere fleksibilitet ift. dybde af injektion samt ved reinjektion. Desuden er der mulighed for stor influensradius ved injektion af EVO i filtersatte borer. › Stor influensradius nedstrøms injektionsområdet hvilket kan reducere antal injektionspunkter i en PRB.
Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE	Med de gunstige forhold i forureningsfanen for SRD vurderes det med stor sandsynlighed, at der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE ved brug af EVO som donor.
Anvendelse i forureningsfanen	Det vurderes at EVO er velegnet til anvendelse i forureningsfanen til stimulering af nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder VC og cisDCE (forudsat at det er donor der begrænser nedbrydningen).
Kommercielle produkter	2.5.2 Mix af kulstof-donorer, langsomtfrigivende Udover EVO findes der en lang række af kommercielle langsomtfrigivende kulstof-donorer, se oversigt over kommercielle produkter i Bilag C. Fælles for dem er, at de alle kan anvendes som donor til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler. Derimod kan der være store forskelle i sammensætning og i hvilken form de leveres (fast form fx. pulver, emulsion, gel mm.). Desuden er der forskelle i tilsætningsstoffer (vitaminer, buffer, methanhæmmere, letomsættelige/opløste donorer mm.). Den langsomtfrigivende kulstof-donor kan være langkædede fede syrer, glycerol (glycerin), cellulose, lecithin og kitin, stivelse og lignende. Det er det der nedbrydes til/opløses fra disse donorer, som videre omsættes til brint og anvendes til den reductive deklorering. Selve den faste donor bliver i barrieren og forsætter med at frigive ved opløsning, mens det også har effekt nedstrøms da det der opløses videre nedbrydes til brint nedstrøms. I modsætning til f.eks. laktat som er helt opløst og strømmer med grundvandet.
Levering til grundvandszonen	De fleste produkter tilsættes bedst ved DPT eller lignende (fx. Jet Injektion). Produkter på kolloid/gel-form kan tilsættes i traditionelle filtersatte borer, men ift. EVO er ROI betydeligt mindre (typisk få meter).
Levetid i grundvandszonen	Holdbarheden vil typisk være fra 1 år til mere end 5 år afhængig af de konkrete forhold. Den høje grundvandshastighed og evt. højt indhold af sulfat vil reducere levetiden af EVO i forureningsfanen. Da mange af produkterne indeholder donor på fast form, hvor der sker en langsom frigivelse til grundvandet, vurderes det, at levetiden kan være længere sammenlignet med EVO.
Spredning i grundvandszone	Som for EVO kan der ske spredning af donor nedstrøms behandlingsområdet. På Hvedemarken i Farum (Region Hovedstaden, 2025b) er der påvist spredning af donor mindst 10 m nedstrøms behandlingsområdet.

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen

Ulemper er de samme som for EVO. Herudover er der følgende ulemper:

- › Det er typisk ikke muligt at tilsætte donor gennem filtersatte borer.

Fordele ved anvendelse i forureningsfanen

Fordele er de samme som for EVO. Herudover er der følgende fordele.:

- › Nogle kommercielle produkter indeholder methanhæmmere, hvilket kan være hensigtsmæssigt, hvis donor anvendes tæt på bygninger eller lignende (minimere eksplosionsfare). Methanhæmmere vil reducere antallet af methanogene bakterier. Dette kan være en fordel for væksten af de specifikke nedbrydere (Dhc) idet disse bakterier får mindre konkurrence fra methanogene bakterier.
- › Muligvis længere holdbarhed for nogle af produkterne sammenlignet med EVO.

Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE

Som for EVO vurderes det med stor sandsynlighed, at der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE ved brug af denne type med et mix af donorer.

Anvendelse i forureningsfanen

Som for EVO vurderes denne donortype velegnet til anvendelse i forureningsfanen til stimulering af nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder VC og cisDCE (forudat at det er donor som er begrænsende).

2.5.3 Barkflis/kompost, langsomtfrigivende

Brug af barkflis/kompost (eller andet lignende organisk materiale) som PRB løsning er velafprøvet i Nordamerika og betragtes her som en moden metode (Geosyntec, 2025). Så vidt vi har kendskab til, er der ikke erfaring med metoden i Danmark. Metoden er bl.a. beskrevet i (AFCEE, 2008, ITRC, 2011).

Disse biobarrierer bruges ofte i Nordamerika i situationer, hvor biologisk reduktion skal anvendes over en længere årrække i områder med terrænnær grundvandsforurening. Dette skyldes, at disse typer af donorer er billige og langtidsholdbare, og kan kombineres med andre reaktanter fx. ZVI og næringsstoffer. De har også sorptionskapacitet, hvilket kan øge opholdstiden for behandling. Der sker også typisk spredning af donor i nedstrøms retning, så der også er potentiale for nedbrydning nedstrøms PRB'en.

Installationsteknikken kan være med gravemaskine/rendegraver eller en kontinuerlig kædegraver. Ved brug af gravemaskine bruges typisk en bioslurry til at holde graverenden åben. Denne bioslurry vil også virke som donor. Bredde af PRB varierer typisk mellem 0,5 og 1 meter. Afhængig af behov kan der laves flere rækker af PRB'er i strømningsretningen. Donortype kan være træflis, savsmuld, kompost eller lignende (f.eks. restprodukter fra landbrug/industri). Næringsstoffer og buffer tilsættes også hvis behov herfor. Reaktanter blandes med fx. sand, grus, kalksten eller lignende for at opretholde jorden stabilitet og porøsitet. Kalksten kan bruges som buffermateriale.

Kommercielle produkter	Typisk sammensættes donor af lokale materialer (kompost, barkflis eller lignende). COWI er ikke bekendt med kommercielle produkter som er målrettet anvendelse ved forureningsoprensning.
Levering til grundvandszonen	Barkflis etableres som biobarriere fx. ved simpel nedgravning, samtidig afgravning/tilsætning, brug af spunse, kædegraver. Etableringsmetoder kan ses i (AFCEE, 2008, ITRC, 2011). I Nordamerika er den maksimale dybde for PRB installation omkring 10-13 m u.t.
Levetid i grundvandszonen	Holdbarheden vil typisk være noget længere end andre kulstofreaktanter (sandsynligvis omkring 10 år eller mere).
Spredning i grundvandszone	Der er kun lille risiko for spredning af donor til Grindsted Å eller til vådområdet ved høj grundvandsstand. Såfremt PRB placeres meget tæt på Grindsted Å skal det dog sikres, at der ikke sker nogen uhensigtsmæssig spredning af donor til åen.
Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen	Ulemper er bl.a.: › Ikke afprøvet tidligere i Danmark › Dybdebegrænsninger, kan ikke nå til bund af det terrænnære magasin. › Sandsynligvis samme udfordringer med den lave alkalinitet i forureningsfanen som de øvrige donorer, så muligvis nødvendigt med tilsætning af buffer for pH kontrol › Risiko for geotekniske ændringer i jorden, herunder ændring af permeabilitet
Fordele ved anvendelse i forureningsfanen	Fordelen er bl.a.: › Metoden er simpel og billig både ved etablering og ved indkøb af donor › Lang levetid i grundvandszonen › Der er mindre risiko for spredning af donor til Grindsted Å eller til vådområdet ved høj grundvandsstand. › Homogen tilsætning af donor. Der sker ligeledes en mere homogen spredning af donor i nedstrøms retning. › Kan anvendes tæt på terræn og tæt på Grindsted Å › Der sker også en vis sorption til donormaterialet › Kan kombineres med andre reaktanter fx. mikro/granular ZVI, sorbenter og pH buffer. Kan også kombineres med andre PRB strategier, fx. med EVO i bund af indsatsområdet og barkflis/kompost i den øverste del af indsatsområdet.
Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE	Da der ikke er erfaring med metoden i Danmark, er det usikkert, om der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE. Med det rette design vurderes potentialet for en tilstrækkelig nedbrydning dog at være god.

Anvendelse i forureningsfanen

Det vurderes ikke at metoden kan anvendes som en stand alone metode for hele forureningsfanen. Derimod vurderes det at en PRB med barkflis/kompost kunne være egnet i dele af indsatsområdet i område 1 f.eks.:

- › Områder hvor grundvandet står tæt på terræn og hvor det er vanskeligt at anvende andre in-situ reaktanter. DPT injektion er fx. ikke muligt i de øverste jordlag (1-1,5 m u.t.).
- › Områder hvor der er risiko for spredning af in-situ reaktanter til terræn (typisk samme områder som ovenstående med højt grundvandsspejl).
- › Områder i forureningsfanen med lavere indhold af VC. Her er behovet for donormængder måske mindre.
- › Generelt anvendelse i den øverste del af det terrænnære magasin.

2.5.4 Opløste/letomsættelige donorer

Opløste/letomsættelige donorer bruges oftest i forbindelse med aktive systemer dvs. oppumpning og recirkulation. Opløste donorer bruges ikke som "stand alone" donor i PRB løsninger. Derimod indgår opløste donor typisk som en del af de kommercielle langsomfrigivende donorer fx. EVO.

Der er stor erfaring med denne type donor både i Danmark og Internationalt. I Kærgård Klitplantage anvendes der laktat som donor i recirkulationsløsning. I Kærgård Klitplantage anvendes laktat også i kombination med brug af EVO.

Kommercielle produkter

Produkterne (fx. laktat og ethanol) kan købes hos almindelige kemikaliefirmaer.

Levering til grundvandszonen

Tilsættes typisk gennem filtersatte borer.

Levetid i grundvandszonen

Kort holdbarhed - typisk få måneder.

Spredning i grundvandszone

Der kan ske spredning af donor nedstrøms behandlingsområdet sammen med grundvandet. Da der typisk sker en hurtig omsætning, vil spredningen dog være begrænset ift. hvor hurtigt donor nedbrydes (fx. 2 måneder).

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen

Ulemper er bl.a.:

- › Kort holdbarhed, så der skal ske hyppig injektion
- › En hurtigt omsættelig donor kan medføre en kraftig reduktion af miljøet med methanogene forhold til følge og øge konkurrencen fra methanogene bakterier i forhold til Dhc hvilket kan føre til reduktion af den nuværende reductive deklorering.

Fordele ved anvendelse i forureningsfanen

Fordelen er bl.a.:

- › Nem at tilsætte i filtersatte boringer.
- › Kan recirkuleres så muligt at sprede over stor afstand
- › Kan kombineres med andre donortyper (fx. EVO) samt andre reaktanter fx. ZVI.

Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE

Det vurderes med stor sandsynlighed, at der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE ved brug af opløste donorer.

Anvendelse i forureningsfanen

Det vurderes ikke, at den opløste donor kan anvendes som primær donor i en PRB løsning. Kan evt. anvendes som sekundær donor for hurtigere at opnå gunstige forhold for den biologiske nedbrydning (fx. gunstige redoxforhold).

2.6 C: kombination af kemisk reduktion og biologisk nedbrydning

Kombination af ZVI reaktanter og kulstof-donorer er blevet almindeligt de senere år. I Tabel 2-2 har vi underopdelt reaktanterne i to underkategorier:

C1: ZVI + kulstof-donor og

C2: S-ZVI + kulstof-donor.

Som beskrevet i afsnit 2.4.2 vurderer vi på nuværende tidspunkt S-ZVI som mindre egnet. Kombination af S-ZVI og kulstof-donor fravælges derfor og beskrives ikke yderligere i dette notat. I det følgende beskrives kombination med ZVI og kulstof-donor.

Kommercielle produkter

I Bilag C er der givet en oversigt over de kommercielle produkter, som COWI har kendskab til i dette projekt (8 produkter). Der findes sandsynligvis flere, idet der i dag sker en rivende udvikling med salg af nye produkter. Typisk er produkterne en kombination af basisprodukter for kemisk reduktion og biologisk reduktion.

Levering til grundvandszonen

Alle produkter som indeholder Mikro-ZVI skal tilsættes grundvandszonen med DPT eller lignende. Enkelte kommercielle produkter kan tilsættes til grundvandszonen i filtersatte borer, men det kræver, at ZVI er på kolloid/nano form og at kulstof-donoren er i emulsion. ROI vurderes at være lille ved tilsætning i filtersatte borer eller DPT (1-2 m). ROI kan øges ved brug af DPT Jetinjektion (Geosyntec, 2023) typisk med ROI på ca. 5 m.

Levetid i grundvandszonen

Holdbarheden vil variere afhængig af produkt.

Det anbefales at vælge et produkt, som indeholder Mikro-ZVI, idet nano- eller kolloid ZVI vurderes at have kort levetid pga. det aggressive grundvand.

For kulstof-donor anbefales at anvende et langsomfrigivende produkt fx. på fast form, hvor der sker en langsom frigivelse af kulstof til grundvandet fx. med indhold af cellulose, kitin, stivelse eller lignende.

På Hvedemarken i Farum blev der anvendt en kombination af mZVI og kulstofdonor (Provect-IR®, se Bilag C). Monitoring efter 5 år viser, at produktet stadig er reaktivt (Region Hovedstaden, 2025b). Der er tegn på, at donoren er ved at være opbrugt, så her er det ZVI, som har den længste levetid.

Provect-IR® indeholder en kombination af kulstof-donorer (kort, mellem og langtidsholdbar donor). Desuden indeholder produktet også vitaminer og methanhæmmere. Dette viser at kombinationsprodukter er komplekse og nogle kan være mere velegnede end andre på en specifik lokalitet. Bl.a. blev der i laboratorieforsøg i forbindelse med Hvedemarken også testet for det kommercielle produkt EHC®, se Bilag C. Dette viste også nogenlunde effekt ift. at nedbryde klorerede opløsningsmidler, men der blev dannet væsentligt mere methan sammenlignet med Provect-IR®.

Spredning i grundvandszone

ZVI spredes ikke, men der kan ske spredning af kulstof-donoren i nedstrøms retning, se vurdering i afsnit 2.5.1 og 2.5.2.

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen

Ulemper er principielt de samme, som er beskrevet for ZVI og de langsomfrigivende kulstof-donorer. Herudover er der følgende ulemper:

- › Bortset fra produkter med nano/kolloid ZVI er det typisk ikke muligt at tilsætte produktet gennem filtersatte boringer.
- › Det er vanskeligt at gennemskue indholdet i de forskellige produkter (grundet patenter). Det kan derfor også være vanskeligt at udpege de mest egnede produkter til forureningsfanen. På baggrund heraf kan det være nødvendigt indledningsvist at teste flere lignende produkter for at udpege de mest egnede.
- › Der er kun få erfaringer med kombination af ZVI og kulstof-donorer i Danmark.

Fordele ved anvendelse i forureningsfanen

Fordele er principielt de samme som er beskrevet for ZVI og de langsomfrigivende kulstof-donorer. Herudover er der følgende fordele:

Fordelen er bl.a.:

- › Kombination af ZVI og kulstof-donorer giver en mere robust nedbrydning.
- › Det er muligt at ZVI og kulstof-donorer neutraliserer pH ændringer, så der ikke er behov for tilsætning af en buffer til pH regulering eller at behovet for at tilsætte buffer er mindre ift. de rene reaktanter med ZVI eller donor.

Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE

Det vurderes med stor sandsynlighed, at der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE ved brug af kombination med ZVI og kulstof-donorer.

Anvendelse i forureningsfanen

Det vurderes at kombination af ZVI og kulstof-donor er egnet til anvendelse i forureningsfanen til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder VC og cisDCE.

Der findes produkter, der, i stedet for ZVI, indeholder opløst Fe(II). Som beskrevet i afsnit 2.4.3 kan opløste jernreaktanter ikke anbefales.

2.7 D: Sorption

Ved denne metode tilsættes sorbent i form af aktivt kul til grundvandszonen, som adsorberer forureningsstoffer. Sorptionskapaciteten er begrænset, specielt for VC, og det kræves derfor at sorptionskapaciteten regenereres ved nedbrydning af stofferne. Der foregår en ret effektiv nedbrydning i forureningsfanen, hvorfor anvendelse af sorbent potentielt kan stimulere den naturlige nedbrydning i fanen ved at øge opholdstiden. Metoden forventes imidlertid ikke egnet som "stand alone" overfor forurening i fanen, da sorptionen af specielt VC ikke umiddelbart forventes at give tilstrækkeligt øget opholdstid. Metoden bør derfor kombineres med stimulering af nedbrydningen enten ved kemisk nedbrydning eller anden supplerende stimulering af den biologiske nedbrydning.

Kommercielle produkter

COWI har kun kendskab til ét kommercielt produkt som "stand alone" produkt, nemlig Plumestop® fra Regenesis. Plumestop® indeholder en kolloid suspension af aktivt kul, se link i Bilag C. Dette produkt kan kombineres med kemisk reduktion og/eller biologisk reduktion.

Der sker i øjeblikket en rivende udvikling bl.a. med sorption af PFAS grundvandsfane, så der er sandsynligvis andre kommercielle produkter på vej eller produkter som allerede forhandles, men som COWI ikke har fået kendskab til i nærværende litteratursøgning.

2.8 E: Kombination af sorption med kemisk reduktion og/eller anaerob biologisk nedbrydning

2.8.1 Kombination af sorption og kemisk reduktion

Kombination af sorption med kemisk reduktion kan ske ved tilsætning af sorbent med integreret ZVI eller sorbent + ZVI (ikke integreret) til grundvandszonen. Her sker der både adsorption og abiotisk (primært) nedbrydning. cisDCE sorberer rimeligt, især når der ikke er konkurrence med TCE eller PCE, og nedbrydes abiotisk omtrent uden dannelse af VC. Ikke alle ZVI typer nedbryder VC effektivt, men produkter med integrering af ZVI i aktivt kul giver en større reaktivitet af ZVI, så der kan være potentiale for abiotisk nedbrydning VC.

I Tabel 2-2 er der angivet 2 kategorier af kombinationer: henholdsvis sorbent med ZVI og sorbent med S-ZVI. Som beskrevet i afsnit 2.4.2 vurderer vi, at S-ZVI er mindre egnet så denne kombination fravælges og beskrives ikke yderligere i dette notat.

I det følgende beskrives sorbent med ZVI.

Kommercielle produkter

Vi har i vores litteraturstudie fundet to kommercielle produkter med ZVI og sorbent, se også Bilag C

- › BOS-100®: Granular aktivt kul (GAC) som er imprægneret med ZVI.
- › Carbo-Iron®: Kolloid aktivt kul som er imprægneret med nZVI.

Tilsætning til grundvandszonen	De to produkter adskiller sig ved forskellig partikelstørrelse (granular og kolloid). BOS-100® leveres som granulært materiale. Injektion sker mest ofte med DPT rig, men kan også injiceres med andre metoder fx. DPT Jetinjektion, frakturering, so-ilmixing o. lign. Filtersatte borer kan ikke anvendes. Det danske firma Ejlskov har et samarbejde med leverandøren af produktet (RPR inc) og Ejlskov har stor erfaring med injektion af BOS-100® med Geoprobe-udstyr. Carbo-Iron® leveres som en væske suspension med kolloidt aktivt kul imprægneret med nZVI. Produktet kan jf. producenten tilsættes i filtersatte borer, men kan også tilsættes ved brug af DPT udstyr. Vi har ikke kendskab til feltapplikationer, men ifølge producenten kan produktet spredes i større afstand fra behandlingsområde da produktet er i suspension.
Levetid i grundvandszonen	ZVI vil ikke mindst i det aggressive grundvand i forureningsfanen være udsat for korrosion, som kan begrænse holdbarheden betydeligt. Integreringen af ZVI i aktivt kul kan muligvis beskytte ZVI mod korrosion, hvilket kan give en længere holdbarhed. En større partikelstørrelse af ZVI (granulært eller mikroskala) giver bedre holdbarhed end mindre partikelstørrelser. Det er vores vurdering at BOS-100® sandsynligvis vil have en længere levetid end Carbo-Iron® pga. den større partikelstørrelse. Selve det aktive kul forventes at have meget lang levetid (>10 år).
Spredning i grundvandszone	Mobiliteten af BOS-100® er meget begrænset når først det er leveret til grundvandszonen. Mobiliteten af Carbo-Iron® er ifølge (Mackenzie et al, 2012) mobilt i grundvandszonen pga. den lille partikelstørrelse og en tilsat stabilisator. Hvor langt produktet kan spredes i grundvandszonen, er usikkert og vil være lokalitetsspecifikt.
Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen	Ulemper er bl.a.: › Generelt de samme ulemper som for brug af ZVI, se afsnit 2.4.1 › Generelt større usikkerhed på effekt af produkterne da der er begrænset erfaring med produkterne til nedbrydning af VC og cisDCE. › Lille evne af det aktive kul til tilbageholdelse af VC.
Fordele ved anvendelse i forureningsfanen	Fordelen ved anvendelse er bl.a.: › Generelt de samme fordele som for brug af ZVI, se afsnit 2.4.1 › Integrering af ZVI i det aktive kul kan give en længere holdbarhed for ZVI › Potentiel større opholdstid for cisDCE (og evt. VC) til nedbrydning pga. sorption.

Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE

På nuværende tidspunkt er det usikkert om der med ZVI + sorbent, kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af især VC.

Der vurderes at være gode muligheder for en tilstrækkelig nedbrydning af cisDCE, idet cisDCE sorberes til det aktive kul, som giver en øget opholdstid for både abiotiske og biotiske nedbrydning.

Der er mere usikkerhed omkring nedbrydning af VC. Ikke alle ZVI typer nedbryder VC effektivt, men integreringen af ZVI i aktivt kul giver en større reaktivitet af ZVI, så der kan være potentiale for abiotisk VC nedbrydning.

Anvendelse i forureningsfanen

Det vurderes, at kombination af ZVI og aktivt kul kan være en egnet metode i forureningsfanen. Vi vurderer dog, at metoden vil være mere robust hvis den også kombineres med biologisk reduktion samt bakterietilsætning.

Produkter, hvor ZVI ikke er integreret i aktivt kul forventes udfordret på holdbarhed og effektivitet i Grinstedfanen.

2.8.2 Sorption kombineret med anaerob biologisk nedbrydning

Kombination af sorption og anaerob biologisk nedbrydning omfatter tilsætning af både sorbent og kulstof-donor til grundvandszonen og vil typisk kombineres med bioaugmentation. Her sker der både adsorption og anaerob biologisk nedbrydning.

Opløste donorer udvaskes og forbruges hurtigt, mens langsomfrigivende donorer (EVO og fast fase) har længere holdbarhed. Desuden er opløste donorer og EVO mobile ved injektion, mens faste donorer bliver sammen med sorbenten. De faste donorer vil deraf formentligt i mindre grad end de opløste blive opbrugt af grundvandssystemet til redox reduktioner og methandannelse og i højere grad blive forbrugt i relation til nedbrydning af klorerede opløsningsmidler.

Kommercielle produkter

Vi har i vores vidensopsamling kun fundet ét kommercielt produkt med sorbent og kulstof-donor til anaerobe biologisk reduktion (PlumeStop® + Aquifix), se også Bilag C. Produktet er en kombination af 2 kommercielle "stand alone" produkter til henholdsvis sorption og anaerob biologisk reduktion.

De 2 produkter forhandles af Regenesys. Kombination af de 2 produkter er testet i et udviklingsprojekt af Region Hovedstaden (Rambøll, 2023a).

Plumestop® består af kolloid aktivt kul ($< 2\mu\text{m}$) i suspension.

Aquifix består bl.a. af en langsomfrigivende plantebaseret donor (små partikler, $< 0,5\mu\text{m}$) i suspension.

Levering til grundvandszonen

De 2 produkter kan tilsættes gennem filtersatte borer eller ved DPT. I projektet i Region Hovedstaden blev begge injektionsmetoder anvendt.

Levetid i grundvandszonen

I ovennævnte projekt (Rambøll 2023a) var donoren dimensioneret til at holde i 5 år. Forureningsbilledet med komplet deklorering i grundvandsmagasinet nedstrøms barrieren lader til fortsat at være aktiv her efter >5 år.

Spredning i grundvandszone	Ved injektion i forbindelse med ovenfor nævnte projekt blev Plumestop® spredt i strømningsretning og med et tæt net af injektioner (få meter) blev der opnået en sammenhængende barriere nedstrøms injektionerne. Fan et al. (2017) angiver en forventet spredning i strømningsretning på op til 5 m. Det er usikkert, om de høje strømningshastigheder nær Grindsted Å kan føre til større spredning nedstrøms.
Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen	Ulemper er bl.a.: › Generelt de samme ulemper som for anaerob biologisk nedbrydning, se afsnit 2.5 › Generelt større usikkerhed på effekt af produkterne da der er begrænset erfaring med produkterne til nedbrydning af VC og cisDCE. › Lille evne af det aktive kul til tilbageholdelse af VC.
Fordele ved anvendelse i forureningsfanen	Fordelen er bl.a.: › Generelt de samme fordele som for anaerob biologisk nedbrydning, se afsnit 2.5 › Potentiel større opholdstid for cisDCE (og evt. VC) til nedbrydning pga. sorption.
Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE	Det vurderes med stor sandsynlighed, at der kan opnås tilstrækkelig nedbrydning af VC og cisDCE ved brug af kombination med sorption og donor. Jf. amerikanske erfaringer (Geosyntec, 2025) indikerer studier, at det aktive kul evt. kan forbedre nedbrydningen, mens andre studier indikerer, at det aktive kul kan inhibere methan-produktionen.
Anvendelse i forureningsfanen	Det vurderes, at kombination af tilsætning af kulstof-donor og aktivt kul er velegnet metode i forureningsfanen. Der bør samtidig tilsættes bakteriekultur, samt næringsstoffer og vitamin B12 og evt. buffer. Det er muligt, at metoden vil have en længere levetid og være mere robust mod pH ændringer, hvis den også kombineres med tilsætning af ZVI.

2.8.3 Sorption kombineret med kemisk nedbrydning og anaerob biologisk nedbrydning

Kombination af sorption, kemisk nedbrydning og anaerob biologisk nedbrydning omfatter tilsætning af sorbent (aktivt kul), ZVI samt elektrondonor til grundvandszonen. Der kombineres typisk med bioaugmentation. Her sker der både adsorption, abiotisk nedbrydning og anaerob biotisk nedbrydning.

Kommercielle produkter	Vi har i vores litteratursøgning fundet tre kommercielle produkter, se Tabel 2-3.
------------------------	---

Tabel 2-3 Oversigt over kommercielle produkter der kombinerer sorption og kemisk- og biologisk reduktion

PRODUKT	BESKRIVELSE *	FORM
PLUMESTOP® + AQUIFIX + S-MICRO-ZVI:	- Plumestop® består af kolloid aktivt kul (< 2µm) i dispersion. - AquiFix består bl.a. af en langsomfrigivende plantebaseret kulstofdonor (< 0,5 µm) i suspension. - S-Micro-ZVI består af kolloid SZVI i suspension (< 5 µm).	Suspension (kolloid)
CAT-100® (BOS-100® + SPECIFIKKE NEDBRYDERE)	- BOS-100® består af aktivt kul (GAC) som er imprægneret med ZVI. - Langsom-frigivende donor på fast form med bl.a. kitin og stivelse. Herudover næringsstoffer (gærekstrakt) - Bakteriekultur.	Fast form (granulær)
EHC-PLUS®	- Mikro-ZVI - Langsomfrigivende kulstof-donor med næringsstoffer - Aktivt kul på pulverform (PAC).	Fast form (pulver, mikroskala)

*: Se yderligere beskrivelse i Bilag C

Levering til grundvandszonen

Plumestop® leveres som kolloid væske og kan injiceres gennem filtersatte borer og DPT injektion eller lignende.

CAT-100® og EHC-PLUS® leveres på fast form og kan injiceres med DPT eller lignende. Kan ikke tilsættes via filtersatte borer.

Levetid i grundvandszonen

For Plumestop® forventes levetiden at være begrænset af korrosion af S-ZVI og forbruget af donor (op til 5 år).

Da ZVI i CAT-100® regenereres mikrobielt er holdbarheden væsentlig længere end for andre ZVI produkter, herunder BOS-100®, som af producenten angives som typisk 10 år. Levetiden af donor og næringsstoffer vil sandsynligvis blive opbrugt før ZVI'en og kan derfor blive derfor den begrænsende faktor.

For BOS-100® forventes kulstof at have en beskyttende effekt af ZVI mod oxidation med vand.

For EHC forventes en kortere levetid, pga. korrosion af ZVI i det aggressive grundvand (sandsynligvis < 5 år, men dette vides ikke på nuværende tidspunkt).

Spredning i grundvandszone

Spredning i grundvandszonen af Plumestop® er som beskrevet i foregående afsnit. For de andre produkter forventes ikke spredning udover ved selve injektionen.

Ulemper ved anvendelse i forureningsfanen	Ulemper er generelt de samme som for kombination af kemisk- og biologisk reduktion samt kombinationer med sorption/kemisk reduktion og sorption/biologisk reduktion, se afsnit 0, 2.8.1 og 2.8.2. Herudover er ulempen at omkostninger til indkøb og tilsætning af reaktanter sandsynligvis vil være dyrere sammenholdt med de andre løsninger.
Fordele ved anvendelse i forureningsfanen	Fordele er generelt de samme som for kombination af kemisk- og biologisk reduktion samt kombinationer med sorption/kemisk reduktion og sorption/biologisk reduktion, se afsnit 0, 2.8.1 og 2.8.2. Herudover er fordelene at kombination af sorption med både kemisk- og biologisk reduktion er en mere robust løsning. Desuden kan der være synergier ved at anvende disse kombinationer fx. længere holdbarhed af reaktanter i grundvandszonen og mindre følsomhed overfor pH ændringer.
Effektivitet af nedbrydning af VC og cisDCE	Det vurderes at denne kombination af reaktanter vil kunne nedbryde forureningen.
Anvendelse i forureningsfanen	Det vurderes, at kombination af kulstof-donor, ZVI og aktivt kul er en velegnet metode i forureningsfanen. En mulighed kunne være at anvende ZVI integreret i aktivt kul, tilsat donor samt biokultur (CAT-100®). Ved denne tilgang vil det primære formål være at regenerere ZVI for øget holdbarhed, og have en donor på fast from samt næringsstof i barrieren som over tid opløses. Hertil kan være tilsat biokultur for at stimulere den reduktiv deklorering og biotisk nedbrydning. Herved opnås en mere langtidsholdbar løsning, som desuden giver øget mulighed for at stimulere nedbrydningen af VC. Det er muligvis den mest egnede metode overfor forureningsfanen. For produkter (Plumestop®, EHC) som ikke er integrerede, forventes der at være en større følsomhed overfor grundvandsaggressivitet og utilsigtede effekter på eksisterende naturlig nedbrydning. Kombination af flere forskellige typer processer er ikke velafprøvet. Den store usikkerhed er, om anvendelse af sorption kan resultere i en mere effektiv nedbrydning af VC ift. en kombination af kemisk- og biologisk reduktion uden brug af sorbent.
2.9 F: buffere til pH regulering (neutrale forhold mellem ca. 6-8)	
Det er muligt, at det vil være nødvendigt at tilsætte buffer for at kunne opnå neutrale pH forhold under in-situ oprensning. Tabel 2-2 viser mulige typer af buffer, som overordnet er opdelt i opløste og langsomfrigivende buffere.	
Hurtigomsættelige (opløste)	Som opløste buffere vil vi anbefale karbonater/bikarbonater afhængig af hvor meget buffer, der er behov for. Normalt vil opløste buffere kun anvendes ved opstart af en in-situ oprensning, idet de opløste buffere hurtigt omsættes.

Langsomfrigivende
buffere (langtids-
holdbare)

Ved behov for pH regulering ved en PRB vil vi foreslå at anvende en langtidsholdbar buffer. Der findes forskellige typer f.eks.:

- › Calciumkarbonat (CaCO_3)
- › Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)
- › Magnesiumkarbonat (MgCO_3)

I Kærgård Klitplantage anvendes en kolloid suspension af calciumkarbonat (kalk). Den har vist sig nem at tilsætte til grundvandszonen og med en relativ lang holdbarhed (år). Magnesiumbaserede buffere er typisk dyrere og har en korte holdbarhed. Derfor anbefaler vi, at der anvendes en calciumkarbonat buffer, hvis der er opstår et behov.

2.10 G: Bakteriekulturer

Der findes en række kommercielle bakteriekulturer, se oversigt i Bilag C.

Ud fra vores litteraturstudie og drøftelse med Leah Mckinnon (Geosyntec, 2025) er det vores opfattelse at alle bortset fra kulturerne fra SIREM er fra samme laboratorie i New Jersey.

KB1 kulturene fra SIREM er den kultur som klart har været anvendt mest i Danmark. Kulturen anvendes bl.a. i Kærgård Plantage. Her anvendes KB1Plus® som er mere robust ved lavere pH forhold. KB1 kulturen indeholder også en bakteriekultur som kan danne B12 vitamin.

I vores vidensopsamling har vi ikke fået kendskab til, om de øvrige bakteriekulturer indeholder bakterier kan danne B12 vitamin eller er robuste overfor lave pH forhold.

I forureningsfanen anbefales det at anvende bakteriekultur som kan danne B12 vitaminer og som er robuste overfor lave pH forhold.

2.11 Effekt af in-situ afværgelse for farmaceutiske stoffer

Både ZVI reaktanter og SRD donorer kan føre til mere reducerede forhold i grundvandet, hvilket kan resultere i en langsommere nedbrydning af Grindstedværkstoffer (Ottosen et al. 2024). Ligeledes vil en påvirkning af forholdene i den hyporheiske zone (overgangszon mellem grundvand og overfladevand), kunne føre til større påvirkning af åen med sulfonamider og sulfanilsyre.

Potentialet for nedbrydning af barbiturater er beskedent selv under aerobe forhold. Dog kan barbitursyre nedbrydes aerobt i den hyporheiske zone (Bilic 2024) og derfor vil påvirkning redoxforholdene og ikke mindst ændringer i den hyporheiske zone kunne medføre en større påvirkning af åen med barbitursyre og muligvis barbiturater.

Sorption af sulfonamider og barbiturater er beskeden, som for VC og ligeledes vil sulfanilsyre og barbitursyre formentlig ikke sorberes. Tilbageholdelse ved

anvendelse af kulstof-reaktanter kan måske modvirke begrænsningen i nedbrydningshastighederne, men det er uvist, hvor store positive effekter der kan opnås herved.

2.12 Dannelse af uønskede stoffer ved in-situ oprensning som kan udgøre en risiko mod overfladevand

De mere reducerede forhold kan potentielt øge udvaskning af jern og dermed naturligt forekommende tungmetaller. Da udvaskning allerede forekommer, er den resulterende effekt nok begrænset. Omvendt vil mere reducerede forhold kunne omdanne sulfat til sulfid, som kan resultere i udfældning af jernsulfid, hvilket vil nedbringe belastningen. Nedbrydningsprodukterne af VC, ethen og ethan, er harmløse og nedbrydningsprodukter af Grindstedværkstoffer forventes mindre toksiske end moderstofferne.

2.13 anbefaling til brug af in-situ reaktanter

Tabel 2-4 viser vores forslag/anbefalinger til laboratorieforsøg. Tabellen giver en prioritering af hvilke reaktanter vi anbefaler til test, de vigtigste test af reaktanter.

Test anbefales i første omgang at omfatte simple Batch test. Herudfra kan de mest lovende reaktanter udvælges til efterfølgende mere omfattende forsøg, herunder kolonneforsøg. Der bør laves både forsøg med og uden bioaugmentation. Desuden bør der i nødvendigt omfang tilsættes buffer, næringsstoffer og vitaminer.

Vores anbefalinger til hvilke reaktanter som bør testes tager udgangspunkt i følgende argumenter:

- › Vidensniveau: Vidensniveauet for effekt af reaktanter i forureningsfanen er lille. Der er således ikke tidligere publiceret resultater af laboratorie/feltforsøg med reaktanter i forureningsfanen i område 1 og 2. Der er ligeledes lille erfaring i Danmark med at kombinere sorbenter med kemisk og biologisk reduktion. Desuden kan den særlige uorganiske kemi med lav alkalinitet og indhold af aggressiv kuldioxid i forureningsfanen, være problematisk for nogle af reaktanterne.
- › Indsatsområde: Der er flere forskellige typer af indsatsområder for afværge i område 1 og 2. Det er derfor vores vurdering, at der kan være behov for at anvende forskellige typer/kombinationer af reaktanter i forskellige områder. Forhold som har betydning for valg af de mest lovende reaktanter er fx.:
 - › Dybde: Dybde af indsatsområde varierer fra tæt på terræn og ned til 15 m u.t.
 - › Forurening: Forureningssammensætning varierer i område 1 og 2 både med dybden men også i selve den horisontale udbredelse af forureningsfanen. Fx. er der i område 2 højere andel af cisDCE.
 - › Uorganisk kemi: den uorganiske kemi varierer også i område 1 og 2 i forureningsfanen.
 - › Afstand til Grindsted Å: For nogle af reaktanterne vil der være risiko for spredning til Grindsted Å. Disse reaktanter kan dog være velegnede i større afstand fra åen.
 - › Leveringsmetoder af reaktanter: Nogle reaktanter kan være effektiv til at behandle forureningen i område 1 og 2, men samtidig kan der være udfordringer med levering af disse reaktanter til forureningsfanen (ROI, dybde, økonomi for injektion mm.)

På baggrund af ovenstående forhold er det vores vurdering, at der er behov for at have flere potentielle reaktanter, som kan anvendes i område 1 og 2. Det er derfor vores anbefaling, at der indledningsvist testes for en bred vifte af reaktanter i laboratoriet.

Tabel 2-4 Anbefaling af reaktanter til laboratorieforsøg

KATEGORI	REAKTANT #		UDPEGET TIL LABORATORIEFORSØG	PRIORITERING
KEMISK REDUKTION (ISCR)	Nul valent Jern	ZVI	Ja – Vurderes mindre egnet som "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: At opnå basisviden om ZVI ved brug i forureningsfanen. Vigtig at forstå basis reaktion af ZVI i forureningsfanen mhp. anvendelse af ZVI i kombination med andre reaktanter.	Høj
	Sulfideret ZVI (SZVI)	S-ZVI	Vurderes mindre egnet med nuværende vidensniveau	Lille
	Øvrige jernreaktanter	Magnetit, Grøn rust, Opløst Fe(II)	Vurderes ikke egnet	Lille
ANEROB BIOLOGISK REDUKTION (SRD)	Langsomfrigivende elektrondonorer	EVO	Ja - Mulig kandidat til "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant : Udpege den reaktant som har den største ROI ved tilsætning i filtersatte borer fx. i dybere områder eller andre dele af indsatsområde, hvor denne reaktant er mest kost effektiv. Potentiel anvendelse som "stand alone" metode.	Høj
		Mix af donorer	Ja - Vurderes mindre egnet som "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: At opnå basisviden om mix af donorer ved brug i forureningsfanen.	Middel
		Barkflis/kompost	Ja - Mulig kandidat som metode i dele af indsatsområde fx. tæt på Grindsted Å eller i det øverste grundvand i område 1. Argument for udpegning af reaktant: Potentiel kandidat til terrænnær biobarriere, som kan være en billig, langtidsholdbar og simpel løsning fx. i områder med relativt lave forureningsindhold.	Høj
	Letomsættelige elektrondonorer	Laktat, alkoholer, melsse m.fl.	Vurderes mindre egnet som "stand alone", men kan anvendes i kombination med langsomtfrigivende donorer.	Lille
KOMBINATION AF KEMISK REDUKTION OG BIOLOGISK REDUKTION	ZVI/S-ZVI + langsomfrigivende donor	ZVI + Donor	Ja - Mulig kandidat til "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: Belyse evt. god synergi mellem brug af ZVI og donor. Anbefaling om relativ stor partikelstørrelse af ZVI (mZVI). For donor anbefaling om indhold af fast stof donor med langsom frigivelse af kulstof (Ikke EVO).	Høj
		S-ZVI + Donor	Vurderes mindre egnet med nuværende vidensniveau	Lille

KATEGORI	REAKTANT #		UDPEGET TIL LABORATORIEFORSØG	PRIORITERING
SORPTION	Sorption ("stand alone")	Aktivt kul	Nej (som "stand alone")	Lille
KOMBINATION AF SORPTION MED KEMISK REDUKTION OG/ELLER BIOLOGISK REDUKTION	Sorption + kemisk reduktion	Aktivt kul + ZVI	Ja - Vurderes mindre egnet som "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: Opnå basisviden om ZVI kombineret med sorption ved brug i forureningsfane. Vigtig at forstå basis reaktion af ZVI og sorption i forureningsfane mhp. anvendelse af ZVI i kombination med andre reaktanter.	Mellem-høj
		Aktivt kul + S-ZVI	Vurderes mindre egnet med nuværende vidensniveau	Lille
	Sorption + biologisk reduktion	Aktivt kul + Donor	Ja - Mulig kandidat til "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: Opnå basisviden af kombination af sorption og donor. For donor anbefaling om indhold af fast stof donor med langsom frigivelse af kulstof (Ikke EVO).	Høj
	Sorption + kemisk reduktion + biologisk reduktion	Aktivt kul + ZVI + Donor	Ja - Mulig kandidat til "stand alone" metode. Argument for udpegning af reaktant: Test af kombination af sorption, ZVI og donor. Anbefaling om relativ stor partikelstørrelse af ZVI (mZVI). For donor anbefaling om indhold af fast stof donor med langsom frigivelse af kulstof (Ikke EVO).	Høj

#: næringsstoffer / bioaugmentationskultur / buffer vil blive tilføjet til udvalgte studier efter behov for at evaluere om de forbedrer behandlingen

3 AOP og andre potentielle on-site behandlingsmetoder

Dette afsnit giver forslag til at udpege den bedst egnede AOP-metode til on-site rensning af oppumpet grundvand fra forureningsfanen jf. formålet, som er beskrevet i afsnit 1.2.

Justeringer/præciseringer ift. formålet med opgave

Opgaven er efter aftale med regionen suppleret med vidensopsamling om andre brancher med avanceret vandbehandling: Her er der indhentet viden om avanceret rensning af byspildevand (det 4. rensetrin) samt erfaringer med rensning af hospitalsspildevand som også indeholder Grindstedværkstoffer, bl.a. fra det nye OUH i Odense.

3.1 Metode for vidensopsamling/litteratursøgning

Vidensopsamling/litteratursøgning har bl.a. omfattet:

- › Sparring, interview, input fra Flemming Dahl, COWI. Flemming er en af Danmarks førende eksperter inden for avanceret vandbehandling. Har bl.a. arbejdet med rensning af hospitalsspildevand for Herlev Hospital og har været COWI's tekniske ekspert ifm. vurdering og test af muligheder for on-site rensning af grundvand fra forureningsfanen (COWI, 2019 og COWI, 2020)
- › Gennemgang og vurderinger af tidligere afværgeprogram for bl.a. on-site rensning af grundvand fra forureningsfanen (COWI m.fl., 2019).
- › Gennemgang og vurdering af tidligere forsøg med rensning af grundvand fra forureningsfanen (COWI m.fl., 2020)
- › Gennemgang af rapport om erfaringer fra udlandet med det 4. rensetrin for byspildevand (Teknologisk Institut og Envidan, 2024)
- › Gennemgang af rapport om Spildevandsteknisk beskrivelse for Nyt OUH (EKJ og DHI, 2021)
- › Erfaringer fra rensning af hospitalsspildevand for Herlev Hospital
- › Opsøgning af materiale på hjemmesider hos Envidan, Krüger, Eurofins, Danva og Miljøstyrelsen
- › Samtale med Martin Dau, Suez Water og Ole Dalgaard, COWI, eksperter inden for spildevandsrensning og avanceret rensning af vand (4. rensetrin)

3.2 Erfaring fra andre brancher

3.2.1 Rensning af byspildevand

Flere forsyningerne er i gang med at forberede det såkaldte 4. rensetrin, hvor der skal renses for medicinrester og miljøfremmede stoffer (MFS). De gængse metoder omfatter ozon og/eller aktivt kul. I (Teknologisk Institut og Envidan, 2024) fokuseres der på disse 4 rensemetoder:

- › Ozonering og sandfilter (O3+SF)
- › Ozonering + granulært aktivt kul (O3+GAC)
- › Granulært aktivt kul (GAC)
- › Pulveriseret aktivt kul og sandfilter (PAC+SF)

Hvor SF = sandfilter, O3 = ozon, GAC = granuleret aktivt kul, PAC = pulveriseret aktivt kul.

Ifølge byspildevandsdirektivet skal man ved rensningen kunne reducere medicinrester og MFS med mindst 80%. I praksis skal man vælge og måle på mindst 6 indikatorstoffer fra Tabel 3-1 (mindst 4 A/gruppe1-stoffer og 2 B/gruppe2-stoffer). Ingen af stofferne i tabellen tilhører Grindstedværkstofferne, så her må lægges andre kriterier til grund for renseeffektiviteten. A-stoffer kan forholdsvis let nedbrydes.

Tabel 3-1 Indikatorstoffer for byspildevand

Gruppe 1	Gruppe 2
Amisulprid (lægemiddel)	Benzotriazol (korrosionsbeskyttelse)
Carbamazepin (lægemiddel)	Candesartan (lægemiddel)
Citalopram (lægemiddel)	Irbesartan (lægemiddel)
Clarithromycin (lægemiddel)	Blanding af 4-methylbenzotriazol og 6-methyl-benzotriazol (korrosionsbeskyttelse)
Diclofenac (lægemiddel)	
Hydrochlorothiazid (lægemiddel)	
Metoprolol (lægemiddel)	
Venlafaxin (lægemiddel)	

Den mest effektive af de 4 nævnte metoder er ozonbehandling efterfulgt af et aktivt kulfilter, der fjerner nedbrydningsprodukter fra ozonrensningen samt visse stoffer, som ikke kan nedbrydes fuldstændigt med ozon. Et af problemerne ved denne metode er, at der forbruges meget aktivt kul til at fjerne alle mulige organiske forbindelser, som ikke er blevet komplet oxideret med ozon. Derfor arbejder man i øjeblikket på at forbedre metoden ved at anvende et forholdsvis stort kulfilter, hvor der efterhånden opbygges en biologisk aktivitet. Mikroorganismer kan på den måde omdanne en del af det svært nedbrydelige organiske stof og således reducere belastningen af det aktive kul og derved reducere omkostningerne betydeligt. Det giver kullene længere levetid, før de skal udskiftes, hvilket reducerer driftsudgifter såvel som CO₂-aftrykket.

Andre AOP-metoder anvendes i øjeblikket ikke i Danmark til det 4. rensetrin, og det har flere forklaringer. Ozonbehandling har vist sig ganske effektiv og robust til at rense medicinrester og MFS i byspildevand, og sammen med aktivt kul kan det leve op til rensekravet på 80% og typisk endnu bedre. Andre AOP-metoder kan næppe konkurrere prismæssigt med ozon + GAC, og der kan forudses problemer med at bruge UV-lys på det urensede vand, hvor UV-transmittansen er lav.

3.2.2 Hospitalsspildevand med medicinrester

Flere hospitaler herhjemme er i gang med at bygge renseanlæg til spildevand, hvor man skal fjerne medicinrester. Det første anlæg blev etableret på Herlev Hospital i 2014. Det omfatter følgende rensetrin: Rist – MBR (Bioreaktor og Membranfiltrering) – ozon – GAC – UV-desinfektion. Rensemetsoden minder meget om den metode, som man vil anvende på det kommende OUH (EKJ og Teknologisk Institut, 2021). Som nævnt er ozon + GAC nøgleprocesser i renseanlægget ligesom ved 4. rensetrin på de offentlige renseanlæg. I (COWI, 2017) står der meget mere om resemetsoden på Herlev Hospital samt om andre mulige resemetsoder til hospitalsspildevand.

3.2.3 Sammenligning med forureningen i forureningsfanen

Når man skal vælge resemetsode til grundvandet i forureningsfanen, er forudsætningerne imidlertid noget anderledes, end når det gælder rensning af byspildevand. I forureningsfanen findes en række Grindstedværkstoffer, som ikke normalt forekommer i byspildevand og hospitalsspildevand i større mængder. Desuden findes også en række andre MFS i forureningsfanen – specielt klorerede opløsningsmidler. Samtidig indeholder grundvandet relativt høje koncentrationer af bromid og forholdsvis lidt organisk stof (målt som COD). Alle disse faktorer har betydning for valg af resemetsode.

Ved laboratorietest i 2020 (COWI, 2020) fandt man ud af, at 7 Grindstedværkstoffer: barbitat, butobarbitat, 5-ethyl-5-sec-butylbarbituryre, ethylurethan, meproamat, pentobarbitat og amobarbitat blev nedbrudt meget dårligt, eller slet ikke nedbrudt med ozon. Meproamat blev slet ikke nedbrudt, men det blev derimod dannet i betydelig mængde ved oxidation med ozon. Alle de 7 stoffer fandtes i forholdsvis høje koncentrationen i forureningsfanen (15-315 µg/l). Ved forsøgene blev der anvendt varierende ozondosering fra 7,6 til 22,6 mg/l. I praksis doseres typisk fra 2 til 5 mg ozon pr. liter vand på anlæg ved ozonrensning, men det er tilsyneladende langt fra nok til at opnå en acceptabel nedbrydning af Grindstedværkstoffer i forureningsfanen, hvor man selv ved en 5 gange højere ozondosering ikke kunne opnå tilstrækkelig fjernelse af Grindstedværkstoffer.

Ved laboratorietest i 2020 (COWI, 2020) blev det konstateret, at ozondoseringen bør holdes under 20 mg/l for at minimere dannelse af bromat, som er et meget problematisk stof i vand, der skal udledes til recipient. Bromat-problematikken er særlig udtalt for grundvandet i forureningsfanen, der indeholder ca. 10 gange mere bromid end almindeligt byspildevand.

I (COWI, 2020) fandt man, at 6 af de 7 nævnte Grindstedværkstoffer kunne nedbrydes ganske effektivt med UV + brintperoxid, mens ethylurethan kun blev nedbrudt 93%. Nedbrydningen af ethylurethan vil med stor sandsynlighed kunne forøges ved en lidt højere UV-dosis. Det bemærkes, at ethylurethan ikke udgør nogen risiko for Grindsted Å.

I starten af denne resemetsode, var UV-transmittansen lav, men det blev forøget i takt med, at mange stoffer blev nedbrudt. Derfor kan metoden udmærket anvendes til forurenat grundvand, mens den næppe vil vinde større udbredelse til rensning af byspildevand.

3.2.4 Sammenfatning

Ozonbehandling er den mest almindelige rensemetode, der anvendes til rensning på 4. trin på de offentlige renseanlæg. Her anvendes oftest ozon i kombination med aktivt kul. Med denne kombination kan man let fjerne mere end 80% af de indikatorstoffer (medicinrester mv.), der er nævnt i EU's byspildevandsdirektiv. Der anvendes også ozon til rensning af hospitalsspildevand i kombination med aktivt kul og andre renseprocesser.

Ved laboratorietest i 2020 af vand fra forureningsfanen gav ozonbehandling en effektiv fjernelse af organiske opløsningsmidler, men fjernelsen af Grindstedværk-stoffer var ikke særlig god. Man fandt, at syv stoffer: barbital, butobarbital, 5-ethyl-5-sec-butylbarbituryre, ethylurethan, pentobarbital og amobarbital blev nedbrudt meget dårligt med ozon eller slet ikke. 6 af de 7 stoffer kunne let nedbrydes med UV + brintperoxid, men ethylurethan blev kun nedbrudt 93% ved UV-forsøgene, hvilket med stor sandsynlighed kan forbedres betydelig med en større UV-dosis.

3.3 Indsatsområde for on-site rensning

I (Rambøll, 2024b) er indsatsområdet for on-site behandling angivet som område 1 og 2 (Indsats 4a og 4b på side 68).

3.4 Oversigt og vurdering af on-site rensning herunder "Treatment Train"

Her gives en kort vurdering af potentielle rensemetoder. Alle er AOP metoder, bortset fra traditionel rensning gennem aktivt kul.

- 1 Filtrering i aktivt kul (GAC)
- 2 Oxidation med ozon
- 3 Oxidation med ozon + brintperoxid
- 4 Oxidation med UV + brintperoxid
- 5 Oxidation med faststof katalysator + brintperoxid
- 6 Oxidation med ferrat
- 7 Oxidation med SCWO (Super Critical Water Oxidation)

Alle 7 rensemetoder forudsætter, at det forurenede grundvand først filtreres i et beluftet sandfilter eller et grønsandfilter (se COWI, 2019 og/eller COWI, 2020). Desuden skal det rensede vand fra metode 2-6 efterrenses i et kulfilter. For SCWO gælder desuden, at metoden kombineres med en RO-proces (omvendt osmose), hvor forureningskomponenter opkoncentreres, før de destrueres i et SCWO-anlæg.

I det følgende gennemgås de enkelte rensemetoder. I Bilag D er metoderne sammenstillet i en tabel og vurderet ud fra følgende forhold:

› Renseeffektivitet

- › Er metoden en "stand alone" teknik eller kræver det kombination med andre metoder ("Treatment Train")
- › Erfaring og modenhed af metoden
- › Fordele og ulemper
- › Vurdering af metodens potentiale for anvendes til on-site rensning af vand fra forureningsfanen
- › Behov for yderligere forsøg

I det følgende gennemgås de enkelte metoder hver for sig med baggrund i vurderinger i Bilag D.

3.4.1 Aktivt kul

I (COWI, 2020) blev der lavet flere forsøg med rensning med aktivt kul af vand fra forureningsfanen. Der blev dels lavet et forsøg, hvor råvandet blev rensset med aktivt kul, og dels en række forsøg, hvor rensset vand fra de fire AOP-metoder blev efterrenset med aktivt kul. Ved rensning af råvandet med aktivt kul fjernes ca. 96% af de analyserede forureningskomponenter i vandet, men kun ca. 88% af Grindstedværkstofferne fjernes. Rensning med aktivt kul er således ikke tilstrækkelig som eneste rensproces, hvis der kræves en fuldstændig fjernelse af Grindstedværkstoffer.

Renset vand fra metoderne 2-5 blev i 2020 testet ved efterrensning med aktivt kul. Det gav for alle 4 AOP-metoder en betydelig reduktion af restkoncentrationen af forurenende stoffer. For de to ozon-metoder (nr. 2 og 3) blev restkoncentrationen reduceret med ca. 50%. For UV+H₂O₂ (nr. 4) blev rest-koncentrationen reduceret med ca. 90%, og for katalysator+H₂O₂ (nr. 5) blev restkoncentrationen reduceret med ca. 82%.

Ved forsøgene blev der anvendt traditionel aktivt kul. På markedet findes der forskellige typer aktivt kul, som er coated (overfladebehandlet) med forskellige materialer, og det kan ikke udelukkes, at der kan opnås bedre tilbageholdelse af forurenende stoffer i andre typer aktivt kul.

3.4.2 Ozon-metoder

De to ozon-metoder (nr. 2 og 3) gav ikke nogen særlig effektiv rensning (COWI, 2020). Klorerede opløsningsmidler (især VC og cisDCE) blev dog fjernet nogenlunde effektivt med ozon (83-98% afhængig af metode og ozondosering), men forsøgsmålestændigheder var således, at ca. halvdelen af det fjernede VC skyldtes stripping til luften og ikke nogen kemisk nedbrydning. Grindstedværkstofferne blev dog fjernet med ca. 88% ved den største ozondosering, hvilket gælder både ved ozondosering alene og ved dosering af ozon sammen med brintperoxid.

Der kan opnås større renseseffektivitet, hvis man øger doseringen af ozon, men så omdannes der mere bromid til bromat, hvilket er uønsket. Man ønsker at holde bromatkoncentrationen under 10 µg/l, hvilket man kan gøre. Hvis ozonkoncentrationen

i vandet holdes under 13 mg/l. Testene (COWI, 2020) viste, at en ozonkoncentration i vandet større end 20 mg/l, ville medføre, at bromatkoncentrationen ville stige til over 60 µg/l, hvilket er uacceptabelt. Denne problematik betyder, at man ikke kan opnå en fuldstændig nedbrydning af Grindstedværkstofferne med ozon, hvis man ikke finder en måde at fjerne bromat fra vandet.

3.4.3 UV + H₂O₂

Denne metode gav nogle lovende resultater (COWI, 2020), hvor der blev fjernet ca. 99% af de klorerede opløsningsmidler og ca. 98,5% af Grindstedværkstofferne. En nærmere vurdering af forsøgene viser, at man kunne have opnået en betydelig større fjernelse af de klorerede opløsningsmidler og sandsynligvis også en tilsvarende større fjernelse af Grindstedværkstofferne. Ved efterrensning med aktivt kul, blev restkoncentrationen af de forurenende stoffer reduceret yderligere med ca. 90%, hvilket indikerer, at man ved denne kombinerede rensningsmetode kan opnå en endnu bedre fjernelse af Grindstedværkstofferne, hvis UV-metoden optimeres med en højere UV-dosis (længere opholdstid med UV-belysning). Det danske firma Ultraaqua har lavet nogle teoretiske beregninger på nedbrydningen af VC og cis-DCE, og de stemmer udmærket overens med laboratorietestene (COWI, 2020). De viser desuden, at nedbrydningen kan forøges betydeligt ved længere opholdstid i UV-reaktoren, hvorved man opnår større UV-dosis.

3.4.4 Katalysator + H₂O₂

Laboratorietestene i 2020 (COWI, 2020) gav de bedste resultater for denne metode, men det krævede nogle indkøringsforsøg at finde frem til rette dosering af brintperoxid og den rette opholdstid i reaktoren. Bedste resultat blev opnået med stor overdosering af brintperoxid, lang opholdstid og tilsætning af flydende katalysator med jernsalt. Her blev ca. 99,92% af Grindstedværkstofferne og 99,98 % af klorerede opløsningsmidler nedbrudt ved en optimal dosering af H₂O₂ samt en optimal opholdstid. Det var dog muligt at opnå næsten lige så godt resultat ved lavere dosering af brintperoxid uden dosering af flydende katalysator.

Metoden er udviklet af det hollandske firma WaterIQ. Der er meget 'know-how' forbundet med metoden – herunder anlægsdesign og driftsrutiner. Metoden har været i brug i adskillige år i Holland til rensning af drænvand fra gartnerier, hvor hovedopgaven er at fjerne/nedbryde pesticider.

3.4.5 Ferrat oxidation

Denne metode er forholdsvis ny og tilbydes som en kommerciel løsning af det tyske firma Watch Water. Metoden blev ikke testet i 2020. Ved metoden dannes det aktive ferrat ud fra dosering af to separate kemikalier til vandet. Efter reaktionen filtreres vandet først gennem et mangan coated filtermedium (Katalox Light) og derefter gennem et jernoxid coated kulfilter (Catalytic Carbon). Ifølge leverandøren kan man med den metode fjerne både organiske og uorganiske forureningskomponenter i vand som f.eks. fenoler, klorerede fenoler, klorerede aromatiske kulbrinter, TCE, PAH, pesticider, ftalater, alkoholer, nonylfenoler, aminer samt visse medicinrester. Der er tilsyneladende ingen erfaringer med fjernelse af Grindstedværkstoffer, og der findes heller ingen oplysninger og rensegrader.

Et anlæg med ferrat oxidation er meget simpel i sin opbygning. Metoden kan let testes i laboratoriet, og det vil være nødvendigt, hvis metoden skal afprøves og optimeres.

3.4.6 SCWO

SCWO står for Super Critical Water Oxidation. Det er den ultimative avancerede kemiske oxidations-proces, som kan destruere alle organiske stoffer. I reaktoren oxideres organiske stoffer med ilt ved ca. 500° C og 250 bar. Et SCWO-anlæg er ganske dyrt, og derfor er kapaciteten begrænset, for at holde prisen på et rimeligt lavt niveau. Derfor vil det i praksis være nødvendigt at opkoncentrere forureningskomponenter, før de behandles i et SCWO-anlæg, så man kun skal behandle en lille vandmængde. Her vil omvendt osmose (RO) være den mest oplagte løsning at anvende til opkoncentrering. Man vil med stor sandsynlighed kunne få meget rent vand uden Grindstedværkstoffer og kulbrinter ved RO-processen, men RO kan ikke effektivt tilbageholde VC og flere andre organiske opløsningsmidler, og derfor har man brug for en anden proces, der først kan fjerne de klorerede opløsningsmidler.

Selv om SCWO kan destruere både klorerede opløsningsmidler, kulbrinter og Grindstedværkstoffer, så bliver en total løsning med SCWO meget kompliceret og dyr, og den vil derfor ikke være relevant at anvende som en fuldskala løsning, og derfor giver det heller ikke nogen mening at teste metoden i laboratoriet eller i pilotforsøg.

3.5 Anbefaling til brug af AOP

Tabel 3-2 viser en samlet vurdering af metoderne samt anbefalinger til yderligere test.

Renset grundvand fra laboratorietest (COWI, 2020) blev undersøgt ved økotoksikologisk tests. Det viste sig, at råvandet ikke havde nogen negativ effekt ved disse tests, men det rensede vand fra de fire forskellige AOP-metoder viste en vis toxicitet ved disse tests. Derfor er der et behov for at undersøge nærmere, hvorfor de økotoksikologiske forsøg viste større toksicitet efter AOP behandling.

Tabel 3-2 Samlet vurdering af metoder samt anbefaling af supplerende test

METODE	VURDERING	SUPPLERENDE TEST (LABORATORIEFORSØG)
1 FILTRERING I AKTIVT KUL (GAC)	Metoden kan ikke stå alene, da den langt fra kan fjerne alle Grindstedværkstoffer. Med aktivt kul kan man fjerne organiske opløsningsmidler, men det er vanskeligt at fjerne VC og cis-DCE fuldstændigt.	Bør indgå sammen med nye laboratorie/-pilotforsøg med primære metoder.
2. OXIDATION MED OZON	Ozon kan ikke anbefales, da man skal bruge en meget høj koncentration for at få en god destruktion. Desuden er det langt fra sikkert, om der kan opnås en tilstrækkelig god rensning for Grindstedværkstoffer med en højere dosering af ozon. Ozonforsøgene hos Suez	Nej
3. OXIDATION MED OZON + BRINTPEROXID		Metoden vurderes ikke at kunne nedbryde alle Grindstedværkstoffer. COWI vil ikke

METODE	VURDERING	SUPPLERENDE TEST (LABORATORIEFORSØG)
	(COWI, 2020) viste, at bromatdannelsen blev kraftigt forøget, hvis man doserede mere end 13 mg/l ozon. Hvis renseeffektiviteten for ozon-metoderne skal forbedres, vil det kræve en noget højere ozondosering, hvilket næppe kan ske, uden at der dannes for høje koncentrationer af bromat.	anbefale, at der laves yderlige tests med de to ozonmetoder.
4. OXIDATION MED UV + BRINTPEROXID	UV + H ₂ O ₂ har i 2020 givet betydeligt bedre resultater end de to ozon-metoder. Denne rensemetode er generelt kendt og anvendt over hele verden, og der findes adskillige firmaer, der kan levere udstyr og 'know-how' til metoden. Testene i 2020 (COWI, 2020) viste, at metoden kunne destruere stor set alle Grindstedværkstoffere i vandet	Ja: COWI foreslår, at der skal laves flere laboratorieforsøg med UV+brintperoxid, fordi teoretiske beregninger med de gamle forsøgsresultater viser, at man med større UV-dosis kan destruere de klorerede opløsningsmidler helt, og vi formoder, at det også vil give en mere fuldstændig nedbrydning af Grindstedværkstoffer, men det kan man ikke regne teoretisk på, fordi der ikke eksisterer teoretiske beregningsmodeller for dem.
5. OXIDATION MED FASTSTOF KATALYSATOR + BRINTPEROXID	Den katalytiske proces med brintperoxid gav de bedste resultater ved undersøgelsen i 2020. Ulempen ved metoden er, at der er for meget ukendt 'know-how' knyttet til metoden, og der er tilsyneladende kun én leverandør, hvilket giver en usikker situation med levering af reservedele og service på et fuld-skala-anlæg.	Nej
6. OXIDATION MED FERRAT	Hvad angår ferrat oxidationen er det en simpel og lovende proces til oxidation af mange organiske stoffer. Det er dog usikkert, om metoden kan fjerne Grindstedværkstoffer og andre organiske stoffer tilstrækkelig effektivt. Metoden er umiddelbart kun knyttet til én virksomhed, hvilket er problematisk, når man i et fuld-skala-anlæg skal anvende råstoffer og kemikalier fra dette firma. Metoden er sandsynligvis den billigste af de præsenterede metoder i både investering og drift. Derfor skulle man måske undersøge metoden i et par simple laboratorieforsøg, der skal vise, om metoden kan anvendes i sin simple udformning. Denne undersøgelse skulle i så fald være en lille tillægsundersøgelse ud over en hovedundersøgelse med UV + brintperoxid.	Ja: Vi foreslår at lave en indledende test med ferrat oxidation i et laboratorieforsøg. Formålet er at vurdere om man skal/bør satse på den metode, som efter COWIs vurdering sandsynligvis er den billigste i investering og drift.
7. OXIDATION MED SCWO (SUPER CRITICAL WATER OXIDATION)	SCWO er nok den metode, som kan give den mest effektive destruktion af de organiske forureninger i vandet fra forureningsfanen, men hvis metoden skal anvendes i praksis, bliver det en meget kompliceret og dyr totalløsning, da metoden nødvendigvis skal kobles	Nej

METODE	VURDERING	SUPPLERENDE TEST (LABORATORIEFORSØG)
	sammen med flere hjælpeprocesser til for-rensning, opkoncentrering og eventuel efterrensning. Derfor kan vi ikke anbefale, at metoden skal testes i laboratoriet eller som pilotforsøg.	

4 Litteraturliste

4.1 Referencer ift. In-situ reaktanter

4.1.1 Generelle referencer

- AFCEE, 2008 Air Force Center for Engineering and the Environment (AFCEE). 2008. Technical Protocol for Enhanced Anaerobic Bioremediation Using Permeable Mulch Biowalls and Bioreactors. Prepared by Parsons Infrastructure & Technology Group, Inc., Denver, Colorado. Final, May 2008.
- COWI (2019) Afværgeprogram for afværgeforanstaltninger overfor forureningsfanen fra det tidligere Grindstedværkets fabriksgrund. Rapport udført for Region Syddanmark, maj 2019.
- COWI, 2020 Indsats overfor jordforurening. Laboratorieforsøg til test af AOP metoder overfor forureningsfanen fra det tidligere Grindstedværkets fabriksgrund. Rapport udført for Region Syddanmark, oktober 2020.
- Curzio , 2025 Di Curzio, D., 2025 (ikke publiceret).
- Fan et al, 2017 Dimin Fan, Edward J. Gilbert¹ og Tom Fox, 2017. Current State of In Situ Subsurface Remediation by Activated Carbon-Based Amendments. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717301184>. Manuscript_6d7bbe2b742a09b116113f91f884cada
- ITRC, 2011 Technical/Regulatory Guidance Permeable Reactive Barrier: Technology Update. June 2011. Prepared by The Interstate Technology & Regulatory Council PRB: Technology Update Team.
- Geosyntec, 2019 Results of Bench Treatability Study for ZVI Plume Treatment at Hvedemarken 3-5, Farum Site. Geosyntec og COWI for Region Hovedstaden, 27. august 2019.
- Geosyntec Consultants, 2023 Direct Push Technology Injection of Solid Amendments - Practitioners' Guide. Prepared for Capital Region, Denmark, May 5, 2022.
- Geosyntec Consultants, 2025 Korrespondance/interview med eksperter fra Geosyntec (Leah McKinnon og Neal D Durant).
- K. Mackenzie et al, 2012 Carbo-Iron – An Fe/AC composite – As alternative to nano-iron for groundwater treatment. Water Research Volume 46, Issue 12, August 2012, Pages 3817-3826.
- Mosthaf, 2025 Mosthaf, K, 2025 (ikke publiceret)

Muff et al, 2014	Muff J and Rugge K, Test of ZVI/AC composites for remediation of chlorinated organics, Memo January 2014
NAVFAC, 2019	Technical Report. In Situ Activated Carbon Case Study Review. Deepti Nair and Steve Rosansky, Battelle. NAVFAC EXWC. 30-9-2019.
NAVFAC, 2025	Sulfidated Zerovalent Iron: An Innovative ISCR Technology for Discrete Source Remediation. Anthony Danko, Ph.D. Principal Investigator. NAVFAC EXWC. Project Completion – 2025. Sulfidated Zerovalent Iron: An Innovative ISCR Technology for Discrete Source Remediation
Ottesen et al, 2020	Ottosen, C.B., Rønde, V., McKnight, U.S., Annable, M.D., Broholm, M.M., Devlin, J.F., Bjerg, P.L., 2020. Natural attenuation of a chlorinated ethene plume discharging to a stream: Integrated assessment of hydrogeological, chemical and microbial interactions, Water Res., 186, 116332.
Ottesen et al, 2021a	Ottosen, C.B., Bjerg, P.L., Hunkeler, D., Zimmermann, J., Tuxen, N., Harrekilde, D., Bennedsen, L., Leonard, G., Brabæk, L., Kristensen, I.L., Broholm, M.M., 2021. Assessment of chlorinated ethenes degradation after field scale injection of activated carbon and bioamendments: Application of isotopic and microbial analyses, J. Contam. Hydrol., 240, 103794.
Ottesen et al, 2021b	Ottosen, C.B., Skou, M., Sammal, E., Zimmermann, J., Hunkeler, D., Bjerg, P.L., Broholm, M.M., 2021. Dataset for laboratory treatability experiment with activated carbon and bioamendments to enhance biodegradation of chlorinated ethenes, Data in Brief, 38, 107291.
Lemaire et al, 2024	Lemaire, G.G., Broholm, M.M., Wunsch, U., Hirsch, M., Ottosen, C.F., Thrane, B.B., Pedersen, J.K., Dissing, L., Bjerg, P.L., 2024. Contaminant mass discharge estimation of a sulfonamide plume by use of hydraulic profiling tool (HPT) and fluorescence techniques. J.Contam.Hydrol., 267, 104422, Doi: 10.1016/j.jconhyd.2024 104422.
Ottesen et al, 2024	Ottosen, C.F., Bjerg, P.L., Kümmel, S., Richnow, H.H., Middeldorp, P., Draborg, H., Lemaire, G.G., Broholm, M.M., 2024. Natural attenuation of sulfonamides and metabolites in contaminated groundwater – Review, advantages and challenges of current documentation techniques. Water Res., 254, 121416.
Ottesen 2025	Ottosen, C.F., 2025 (ikke publiceret).
Rambøll (2023a)	Documentation Report - Remediation of chlorinated solvents in groundwater plumes. Technology development project.

	Remediation of chlorinated solvents in groundwater plumes. Rapport udarbejdet for Region Hovedstaden af Rambøll, 30. maj 2023.
Rambøll (2023b)	Grindsted Å – Screening for in situ afværge- og oprensningsmuligheder. Rapport udført for Region Syddanmark, oktober 2023.
Rambøll (2024a)	Undersøgelser Grindsted - pulje 30. Fase I, II og III. Rapport udført for Region Syddanmark, april 2024.
Rambøll (2024b)	Videregående undersøgelser Pulje 30. Undersøgelser i Grindsted Forslag til afværgeindsatser. Rapport udført for Region Syddanmark, oktober 2024.
Region Hovedstaden, 2020	Interreg-projektet. Hållbar soil mixing. Utveckling av recept för reaktant och bindemedel för nedbrytning av TCE och stabilisering. Teknisk rapport om laboratorieförsök. Region Hovedstaden, SGU, SGI. 3. november 2020.
Region Hovedstaden, 2024a	Afslutningsrapport udviklingsprojekt vedr. oprensning af forureningsfane med klorerede opløsningsmidler. Rapport. Udført af COWI den 5. februar 2024 for Region Hovedstaden.
Region Hovedstaden, 2024b	Investigation and Evaluation of the binding of arsenic in soil and groundwater by different Immobilization Methods. Development project in relation to the Collstrop site, Hillerød, Denmark. COWI, Geosyntec, GEUS, Københavns Universitet og Colombia University for Region Hovedstaden, Juni 2024.
Region Hovedstaden, 2025a	Direct Push Technology High-Pressure Jet Injection 2025 Performance Monitoring Report (Year 10). Geosyntec og COWI for Region Hovedstaden, Marts 2025.
Region Hovedstaden, 2025b	Hvedemarken 3-5, Farum, Innovative ZVI Applications for Plume Remediation Monitoring Longevity of PRB 63 months after creation (48 months after reinjection). COWI for Region Hovedstaden, 4. april 2025.
Region Syddanmark, 2018	Detailprojekt for grundvandsoprensningen under grube 1, 2 og 4 i Kærgård Plantage. COWI, Rambøll og Geosyntec for Region Syddanmark, december 2018.
Region Syddanmark, 2020	Kærgård Plantage – Demonstrationsanlæg i grube 3 – effekt af afværge i grube 3 samt forslag til videre afværge. COWI, Rambøll og Geosyntec for Region Syddanmark, oktober 2020
Region Syddanmark, 2021	Kærgård Plantage – Demonstrationsanlæg i grube 3 – Effekt af ISCO og forslag til videre afværge. COWI, Rambøll og Geosyntec for Region Syddanmark, juli 2021

Region Syddanmark, 2025	Rugårdsvej 234, 5270 Odense nv 13. Monitoringsrunde for afværgede med ZVI reaktiv væg – 8 års drift, COWI for Region Syddanmark, Januar 2025
SIREM, 2016	Treatability Study Report Column Study to Evaluate Remediation of Chlorinated Solvents in Groundwater Using Micro-scale Zero Valent Iron. Rugårdsvej 234, Odense, Denmark. SIREM, Geosyntec and COWI for Regions Syddanmark, May 3, 2016.
USEPA, 2018	Remedial Technology Fact Sheet – Activated Carbon Based Technology for In Situ Remediation. EPA 542-F-18-001 April 2018.
US EPA, 2023	Long-term performance evaluation of zero-valent iron amended permeable reactive barriers for groundwater remediation – A mechanistic approach. EPA Public Access Author manuscript. Geosci Front. Author manuscript; available in PMC 2023 March 01.
VMR, 2011	Afværgekatalog. https://www.miljoeogressourcer.dk/afvaergekatalog.php
WSP (2022a)	Region Hovedstaden (2022b): Litteraturopsamling af reaktanter og tilsætninger til in situ afværgede. Rapport Udarbejdet af WSP, version 2, 14. juni 2022
WSP (2022b)	Region Hovedstaden. Dokumentationsmetoder for in situ reaktanter. Litteraturreview. Rapport Udarbejdet af WSP, version 2, 22. december 2022

4.1.2 DTU referencer ift. Grindstedforureningen

Di Curzio, D., Broholm, M.M., Ottosen, C.F., Bjerg, P.L., Lemaire, G.G., Van Bommel, M.D., Laurenzi, M., Weissbrodt, D., Van Breukelen, B., 2024. Advancing reductive dechlorination modeling by jointly simulating chemical and biomarker patterns at a field site. In prep.

Ottosen, C.F., Lemaire, G.G., Bjerg, P.L., Hunkeler, D., Zimmermann, J., Thrane, B.B., Klaus and Broholm, M.M., 2025. Integrated assessment of microbiology, chemistry and flow to evaluate chlorinated ethenes fate in a large-scale plume. In prep. For J. Contam. Hydrol.

Lemaire, G.G., Broholm, M.M., Wunsch, U., Hirsch, M., Ottosen, C.F., Thrane, B.B., Pedersen, J.K., Dissing, L., Bjerg, P.L., 2024. Contaminant mass discharge estimation of a sulfonamide plume by use of hydraulic profiling tool (HPT) and fluorescence techniques. J. Contam. Hydrol., 267, 104422, Doi: 10.1016/j.jconhyd.2024.104422.

Ottosen, C.F., Bjerg, P.L., Kümmel, S., Richnow, H.H., Middeldorp, P., Draborg, H., Lemaire, G.G., Broholm, M.M., 2024. Natural attenuation of sulfonamides and metabolites in contaminated groundwater – Review, advantages and challenges of current documentation techniques. Water Res., 254, 121416.

Ottosen, C.B., Bjerg, P.L., Hunkeler, D., Zimmermann, J., Tuxen, N., Harrekilde, D., Bennedsen, L., Leonard, G., Brabæk, L., Kristensen, I.L., Broholm, M.M., 2021. Assessment of chlorinated ethenes degradation after field scale injection of activated carbon and bioamendments: Application of isotopic and microbial analyses, *J. Contam. Hydrol.*, 240, 103794.

Ottosen, C.B., Skou, M., Sammali, E., Zimmermann, J., Hunkeler, D., Bjerg, P.L., Broholm, M.M., 2021. Dataset for laboratory treatability experiment with activated carbon and bioamendments to enhance biodegradation of chlorinated ethenes, *Data in Brief*, 38, 107291.

Ottosen, C.B., Rønde, V., McKnight, U.S., Annable, M.D., Broholm, M.M., Devlin, J.F., Bjerg, P.L., 2020. Natural attenuation of a chlorinated ethene plume discharging to a stream: Integrated assessment of hydrogeological, chemical and microbial interactions, *Water Res.*, 186, 116332.

4.1.3 DTU Notater ift. Grindstedforureningen

Ottosen, Poul L. Bjerg, Grégory Lemaire, Josefine Hansen og Mette M. Broholm, 2023. Undersøgelse af kloreredeethener's nedbrydning i fanen fra Grindstedværkets fabriksgrund. Notat 8+pp, DTU.

Grégory G. Lemaire, Mette M. Broholm, Josefine G. Hansen, Cecilie B. Ottosen og Poul L. Bjerg, 2023. Bestemmelse af forureningsfluxen i Grindsted Å. Notat 7+pp, DTU.

Cecilie Ottosen, Poul L. Bjerg, Josefine Hansen, Grégory Lemaire og Mette M. Broholm, 2023. Vurdering af farmaceutiske stoffers nedbrydning i fanen fra Grindstedværkets fabriksgrund Notat 9+pp, DTU.

Fjordbøge, A.S., Ottosen, C.B., Bjerg, P.L., and Broholm, M.M. (2019) : Exploring the possibility of a sorption based method for assessment of the PlumeStop® Distribution. DTU Environment, February 2019

4.1.4 DTU referencer ift. vurdering af Grindstedværkstoffer

Cecilie F. Ottosen, Poul L. Bjerg, Steffen Kümmel, Hans H. Richnow, Peter Middeldorp, Helene Draborg, Gregory G. Lemaire, Mette M. Broholm, 2024. Natural attenuation of sulfonamides and metabolites in contaminated groundwater – Review, advantages and challenges of current documentation techniques. *Water Research*, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121416>.

Cecilie Ottosen, Poul L. Bjerg, Josefine Hansen, Grégory Lemaire og Mette M. Broholm, 2023. Vurdering af farmaceutiske stoffers nedbrydning i fanen fra Grindstedværkets fabriksgrund. DTU Notat.

Josefine Gram Hansen, Poul L. Bjerg og Mette M. Broholm, 2023. Nedbrydningsforsøg af sulfonamider fra forureningsfanen i Grindsted Å. DTU Notat.

Therese E. Lyng Petersen og Laura Morsing, 2022. Vurdering af nedbrydning af farmaceutiske stoffer i hyporheisk zone ved anvendelse af dybdediskretiseret vandprøvetagning. BSc-projektrapport. DTU.

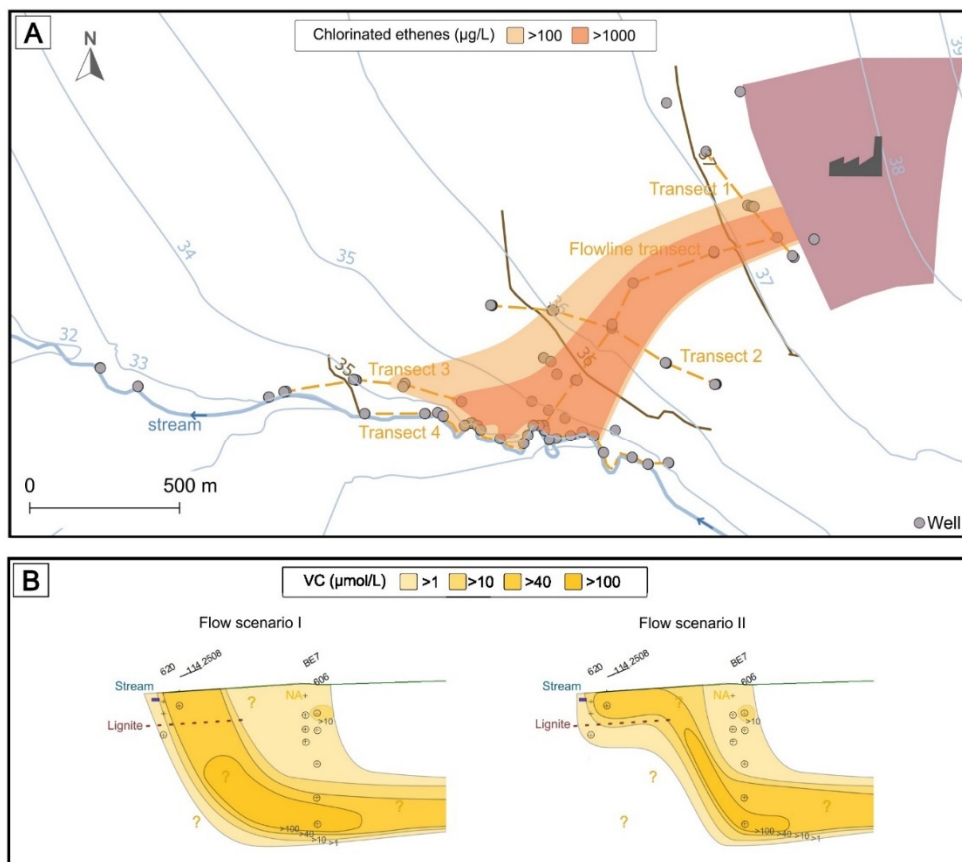
Nika Bilić, 2024. Degradation experiments to assess the fate of barbiturates discharging to a stream. MSc-Thesis. DTU.

4.2 Referencer ift. AOP løsninger

COWI, 2017	COWI-rapport for Region Nordjylland: FORELØBIGE BAT REDEGØRELSE FOR 8 SYGEHUSMATRIKLERES KLOAKSYSTEM inkl. Bilag 1.1-1.5 vedr. rensemetoder for spildevand på hospitaler. Februar 2017.
COWI, 2019	Indsats overfor jordforurening. Afværgeprogram for afværgeforanstaltninger overfor forureningsfanen fra det tidligere Grindstedværkets fabriksgrund. COWI og Geosyntec for Region Syddanmark, maj 2019.
COWI, 2020	Indsats overfor jordforurening. Laboratorieforsøg til test af AOP metoder overfor forureningsfanen fra det tidligere Grindstedværkets fabriksgrund. Rapport udført for Region Syddanmark, oktober 2020.
Teknologisk Institut og Envidan, 2024	Teknologisk Institut og Envidan: 4. rensetrin – Erfaringer fra udlandet, 13.12.2024
Suez, 2017	Suez præsentation for Region Nordjylland: <i>Demonstration of sustainable Micropollutants removal from hospital and municipal wastewater</i> , 27.03.2017
EKJ og DHI, 2025	Spildevandsteknisk beskrivelse for Nyt OUH. PO - Nyt OUH, Region Syddanmark. Rapport udarbejdet af EKJ Rådgivende Ingeniører og DHI for Region Syddanmark, Rapport Februar 2021

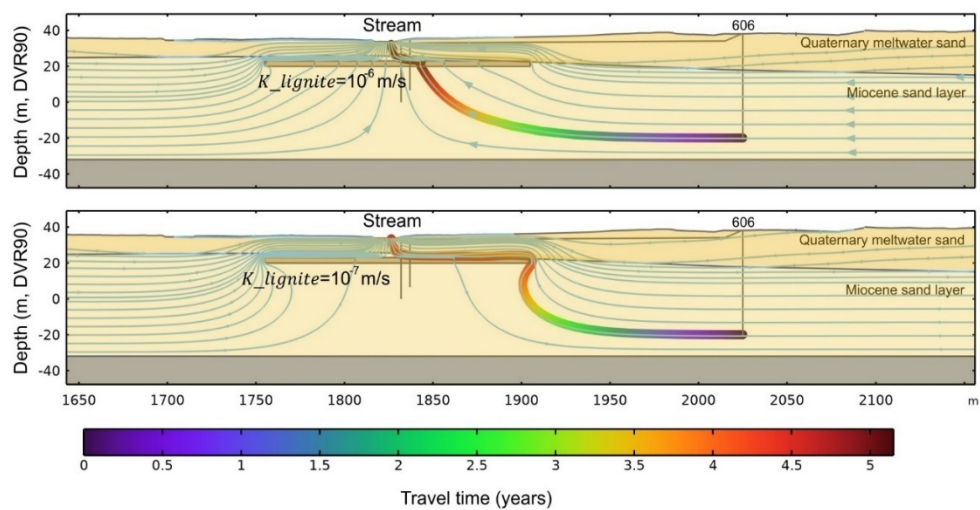
Bilag A Tegninger

A.1 Oversigtskort med forureningsudbredelse af klorerede opløsningsmidler



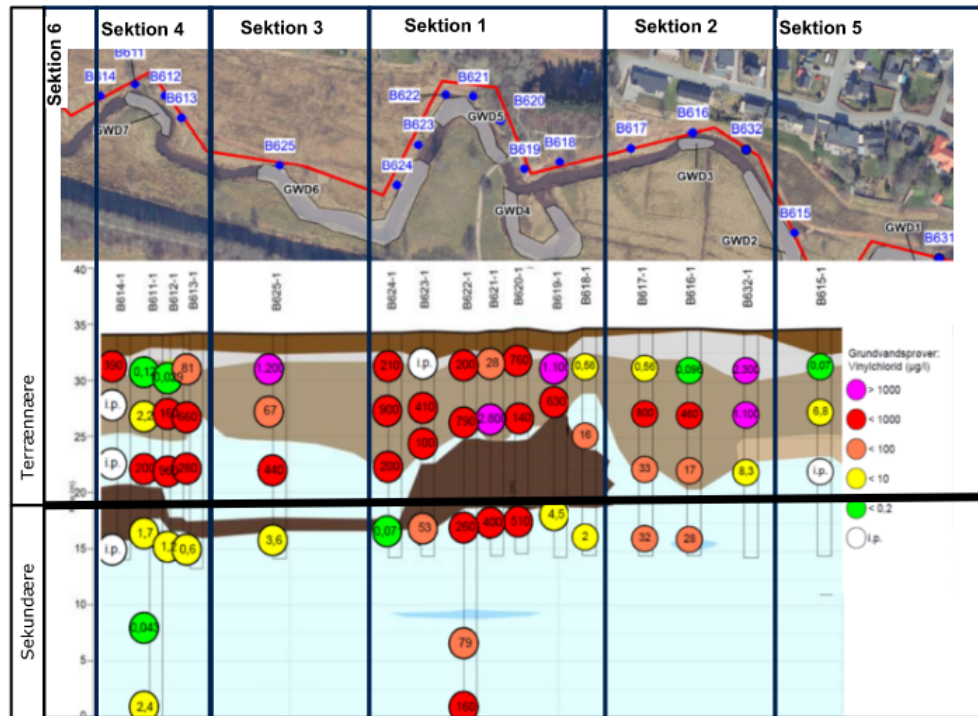
Konceptuelle modelscenarier for forureningsudbredelse fra fabriksgrunden og spredningsveje i indsatsområde 1 og 2 nær åen ved forskellig udbredelse og hydrauliske egenskaber af brunkulslag, fra Ottosen, 2025 (ikke publiceret).

A.2 Tværsnit, opstrømning til Grindsted Å



Modelscenarier for strømning mod åen i indsatsområde 1 og 2 ved 2 forskellige hydrauliske ledningsevner for brunkulslag, fra Mosthaf, 2025 (ikke publiceret).

A.3 Tværsnit med vinylklorid langs Grindsted Å (Rambøll, 2024b)



A.4 Uorganisk kemi ved Grindsted Å, Terrænnære magasin

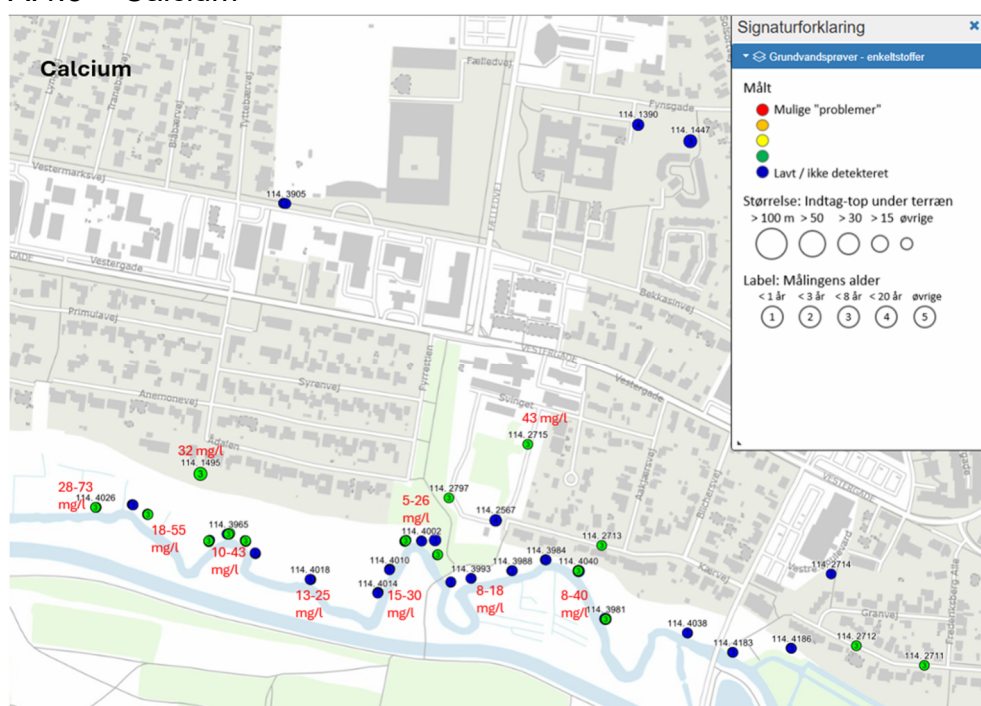
A.4.1 Nitrat (0-15 m u.t.)



A.4.2 Jern(II) (0-15 m u.t.)



A.4.5 Calcium



Bilag B Oplysning om indsatsområde 1 og 2

B.1 Indsatsområde 1

Område 1. Oplysninger og geologi, hydrogeologi, forurening, uorganisk kemi, terrænnære magasin				
Parameter	Enhed	Terrænnære magasin		Reference
Dybdeniveau, afværg	m u.t.	0-15		
Geologi i TA	F.eks., Sand) fin, mellem,grov), grus, silt, ler, brunkul	kvartært smeltevandssand /Glacialt smeltevandssand/mest mellemkornet		Rambøll, 2024a
Hydrogeologi	K-værdi	m/s	2,00E-04	(Rambøll 2024b)
	Gradient	Promille	Beregnet til 0,006-0,01 m/m (150-250 m/år med effektiv porøsitet på 0,25)	Regnet på baggrund af Rambøll pejlinger fra 2022
	Porevandshastighed (Ikke Darcy)	m/år	Størrelsesorden på 50-250 m/år med effektiv porøsitet på 0,25, men usikkert	
	Strømning (horizontal, vertikal)		horizontal og både horisontal og vertikal tæt på åen	DTU modelberegning
	Grundvandspotentiale ift. terræn	m	Frit	
	Frit, spændt, artesis magasin		Frit	
Forurening	PCE (gns. + max)	µg/l	sektion 1: 0-50, øvrige 0	Flux-note fra DTU, optegninger langs brinken
	TCE (gns. + max)	µg/l	sektion 1: 0-40, øvrige 0	Rambøll, 2024a
	cDCE (gns. + max)	µg/l	sektion 1: 500-4000, sektion 2: 100-500, sektion 3-4: 0-100, øvrige 0	Rambøll, 2024a
	VC (gns. + max)	µg/l	sektion 1: 1000-10000, sektion 2-4: 500-2000, øvrige: <100	Rambøll, 2024a
	Ethen/ethan	µg/l	Sektion 1: 300-1200, sektion 2: 30-300, sektion 3-4: 300-1200, øvrige: <30	Cecilies paper 2025
	Sulfonamider (gns. + max)	µg/l	Sektion 1: 250-2000, sektion 2-4: 100-1000, sektion 5-6: 50-250	Flux-note fra DTU, optegninger langs brinken
	Sulfanilsyre	µg/l	sektion 1: 500-4000, sektion 2: 100-1000, sektion 3-4: 2000-12000, sektion 5: 100-1000, sektion 6: 500-4000	Rambøll, 2024a
	Barbiturater (gns. + max)	µg/l	sektion 1: 250-2000, sektion 2: 250-4000, sektion 3-4: 50-250, sektion 5: 250-4000, sektion 6: 0-250	Rambøll, 2024a
	Benzen	µg/l	sektion 1: 100-500, sektion 2-4: 50-100, øvrige: 0	Rambøll, 2024a
	Inhiberende stof (f.eks. CM og TeCM som kan hæmme SRD)	ja/nej	nej	Rambøll, 2024a
Specifikke nedbrydere	Dhc	count/l	sektion 1: 10e6-10e7, sektion 2: 10e5, Sektion 3-4 5000-50000: øvrige nd	
	vcr og bvc	count/l	sektion 1: 10e6-10e7, øvrige: ?	
	sulfatreducerende		til stede	
	Vitamin B12 producerende		ubekendt	
Uorganisk kemi	pH		Typisk 6-7 men også værdier mellem 5,5-6	
	Nitrat	mg/l	Typisk <1, dog flere steder mellem 5 og 20 Maks: 19 (114.3990)	Jupiter
	Sulfat	mg/l	Typisk mellem 20-150 Maks: 200	Jupiter
	Methan	mg/l	Typisk mellem 0,1-8 Maks: 12	Jupiter
	Fe(2)	mg/l	Typisk 2-30 Maks: 88 (114.4025)	Jupiter
	Calcium	mg/l	5-30 mg/l (dog lokalt højere indhold)	
	Aggr. Carbondioxid	mg/l	Typisk 30-130 Maks: 144 (114.3974)	Jupiter
	Alkalinitet (HC03)	mg/l	Typisk <50 men flere steder op til 200 Maks: 280 (114.4040)	Jupiter
	NVOC	mg/l	Typisk 1-15 Maks: 36 (114.4021)	Jupiter
	Redoxforhold		jernreducerende-sulfatreducerende	

B.2 Indsatsområde 2

Område 2. Oplysninger og geologi, hydrogeologi, forurening, uorganisk kemi, terrænnære magasin				
	Parameter	Enhed	Terrænnære magasin	Reference
Dybdeniveau, afværg		m u.t.	0-15	
Geologi i TA	F.eks. Sand) fin, mellem.grov), grus, silt, ler, brunkul		kvartært smeltevandssand /Glacialt smeltevandssand/mest mellemkornet	Rambøll, 2024a
Hydrogeologi	K-værdi	m/s	2,00E-04	(Rambøll, 2024b) og Cecilies artikkeludkast 2025
	Gradient	Promille	Usikkert?	Svært at regne, hvis vi ikke ved, hvorvidt det er vertikalt eller horisontalt?
	Porevandshastighed (Ikke Darcy)	m/år	Usikkert?	
	Strømning (horizontal, vertikal)		Afhænger af brunkul, hvis udbredelse er ukendt i området	DTU modelberegning
	Grundvandspotentiale ift. terræn	m.u.t	0,49-1,89 (114.2566 + 114.2567 + 114.2797)	Rambøll
Forurening	Frit, spændt, artesis magasin		Frit	
	PCE (gns. + max)	µg/l	0	Cecilies artikkeludkast 2025 og DTU notater
	TCE (gns. + max)	µg/l	0	Rambøll, 2024a
	cDCE (gns. + max)	µg/l	500-4000	Rambøll, 2024a
	VC (gns. + max)	µg/l	1000-10000	Rambøll, 2024a
	Ethen/ethan	µg/l	300-1200	Rambøll, 2024a
	sulfanilsyre	µg/l	50-5000	Rambøll, 2024a
	Sulfonamider (gns. + max)	µg/l	100-2000	Rambøll, 2024a
	Barbiturater (gns. + max)	µg/l	50-2000	Rambøll, 2024a
	Inhiberende stof (f.eks. CM og TeCM som kan hæmme SRD)	Ja-nej	ubetydelig	Rambøll, 2024a
	Dhc	count/l	10e6-10e7	
	vcr og bvc	count/l	10e6-10e7	
	sulfatreducerende		til stede	
	Vitamin B12 producerende		ubekendt	
Uorganisk kemi	pH		Typisk 6-7 men også værdier mellem 5,5-6	Jupiter
	Nitrat	mg/l	Under DL til 1,6	Jupiter
	Sulfat	mg/l	Mellem 25-55	Jupiter
	Methan	mg/l	5,2	Jupiter
	Fe(2)	mg/l	2-20	Jupiter
	Calcium	mg/l	5-30 mg/l (dog lokalt højere indhold)	Jupiter
	Aggr. Carbondioxid	mg/l	30-120	Jupiter
	Alkalinitet (HCO3)	mg/l	30-230	Jupiter
	NVOC	mg/l	3-7	Jupiter
	Redoxforhold		jernreducerende-sulfatreducerende	

Bilag C Oversigt over kommercielle produkter til in-situ oprensning

Oversigt overkommercielle produkter til in-situ oprensning i Grindsted fanen i område 1 og 2

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
A: Kemisk reduktion	Ferox PRB	Granular ZVI	Hepure	https://hepure.com/products/ferox-prb/	
	ATOMET 57	Granular ZVI	Rio Tinto, Metal Powders	https://qmp-powders.com/wp-content/uploads/rt-metal-powders-product-brochure.pdf	
	QM-ZviER-PRB (granular).	Granular ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	ATOMET 56	Granular ZVI + Mikro ZVI	Rio Tinto, Metal Powders	https://qmp-powders.com/wp-content/uploads/rt-metal-powders-product-brochure.pdf	
	QM-ZviER-250 (mikro/granular)	Granular + Mikro ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	Ferox Flow	Mikro ZVI	Hepure	https://hepure.com/products/ferox-flow-zero-valent-iron-powder/	Anvendt på Rugårdsvej, Odense (Region Syddanmark, 2025) og Møllevej, Nivå (Region Hovedstaden, 2025a)
	Ferox Target	Mikro ZVI	Hepure	https://hepure.com/products/ferox-target/	
	ATOMET 86	Mikro ZVI	Rio Tinto, Metal Powders	https://qmp-powders.com/wp-content/uploads/rt-metal-powders-product-brochure.pdf	
	CleanER-10	Kolloid ZVI	Höganäs AB / Höganäs Sweden AB	https://www.environmental-expert.com/products/cleaner-10-remediation-media-757795	
	CleanER-45, CleanER-25, CleanER-5	Mikro ZVI (CleanEr-5 = mindste partikelstørrelse)	Höganäs AB / Höganäs Sweden AB	https://www.environmental-expert.com/products/cleaner-10-remediation-media-757795	
	ZVI Powders, D50	Mikro ZVI	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheet_s/Tersus/24_ZVI_-10_Powder_Spec_Sheet.pdf	
	ZVI Powders, D90	Mikro ZVI	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheet_s/Tersus/24_ZVI_-10_Powder_Spec_Sheet.pdf	
	QM-ZviER-40 µm (mikro)	Mikro ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	QM-ZviER-75 µm (mikro)	Mikro ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	Ferox microns	Kolloid ZVI	Hepure	https://hepure.com/products/ferox-micron-nano-zvi/	
	ZVI-ironGEL™	Kolloid ZVI	NANO IRON	https://nanoiron.cz/en/products/zero-valent-iron-nanoparticles/nanofer-star	
	ZVI Powders, D10	Kolloid ZVI	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheet_s/Tersus/24_ZVI_-10_Powder_Spec_Sheet.pdf	
	QM-ZviER-5µm	Kolloid ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	QM-ZviER-20 µm	Kolloid + Mikro ZVI	QM Environmental International B.V.	https://qmes.eu/product/soil-groundwater-contamination/	
	Ferox Nano	Nano ZVI	Hepure	https://hepure.com/products/ferox-micron-nano-zvi/	
	NANO FER 25P	Nano ZVI (uden overflademodifikation)	NANO IRON	https://nanoiron.cz/en/products/zero-valent-iron-nanoparticles/nanofer-25p	

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
A: Kemisk reduktion	NANO FER 25S	Nano ZVI (med nedbrydeligt organisk overfladede modifikation)	NANO IRON	https://nanoiron.cz/en/products/zero-valent-iron-nanoparticles/nanofer-25s	
	NANO FER STAR	Nano ZVI (overfladebehandlet for større stabilitet ved håndtering)	NANO IRON	https://nanoiron.cz/en/products/zero-valent-iron-nanoparticles/nanofer-star	
	S-MicroZVI®	Sulfidized-Micro ZVI (<5-micron colloidal suspension??)	Regenesis	https://regenesiis.com/en/technology/zero-valent-iron-new/	
	NANO FER 25DS	Sulfidized Nano ZVI	NANO IRON	anoparticles coated by inorganic sulphur-based structures	
	ISR-CI	Fe(II) (danner jersulfider)	Tersus		

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
B: Biologisk reduktion	EOS PRO	SRD - langsomtfrigivende = EVO (med Vitamin B12, lille dåbstørrelse)	Redox Tech.	https://www.redox-tech.com/eos-pro/	
	EOS 100	SRD - langsomtfrigivende = EVO (med Vitamin B12, lille dåbstørrelse)	Redox Tech.	https://www.redox-tech.com/wp-content/uploads/2025/02/EOS100-Product-Sheet.pdf	Anvendt i Kærgård Plantage til kildeoprensning (f.eks. Region Syddanmark, 2021)
	EDS-ER™	SRD - langsomtfrigivende = EVO (lille dråbestørrelse)	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheet_s/Tersus/01a_EDS-ER_Tech_Brief.pdf	
	Newman Zone®	SRD - langsomtfrigivende = EVO (lille dråbestørrelse med laktat)	RNAS	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/Newman-Zone.pdf	Anvendt i Kærgård Plantage til kildeoprensning (f.eks. Region Syddanmark, 2021)
	Newman Zone 55™	SRD - langsomtfrigivende = EVO (lille dråbestørrelse, med laktat, lidt større indhold af EVO)	RNAS	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/Newman-Zone-55.pdf	Anvendt i Kærgård Plantage til kildeoprensning (f.eks. Region Syddanmark, 2021)
	Newman Zone® 50E	SRD - langsomtfrigivende (EVO) (etanol i stedet for laktat)	RNAS	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/NewmanZone50E.pdf	
	Newman Zone HRO™	SRD - langsomtfrigivende = EVO (Større dråbestørrelse)	RNAS	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/Newman-Zone-HRO.pdf	
	Renewal-FRL	SRD - langsomtfrigivende = EVO (Stor dråbestørrelse)	Hepure	https://hepure.com/products/emulsified-vegetable-oil/	
	Renewal-SD	SRD - langsomtfrigivende = EVO (Lille dråbestørrelse)	Hepure	https://hepure.com/products/emulsified-vegetable-oil/	
	ABC®	SRD - langsomtfrigivende = Mix opløst (med fede syrer, alkoholer, laktat og fosfat buffer)	Redox Tech	https://www.redox-tech.com/wp-content/uploads/2025/02/ABC-Product-Sheet.pdf	
	Model ABC-Olé	SRD - langsomtfrigivende = Mix opløst (med glycerol, fede syrer og fosfat buffer)	Redox Tech	https://www.redox-tech.com/abc-ole/	
	AquiFix®	SRD - langsomtfrigivende = Mix - kolloid (med glycerol, fede syrer og fosfat buffer)	Regenesis	https://regenesis.com/en/technology/aquifix/	
	3-D Microemulsion	SRD - langsomtfrigivende = Mix opløst (donorindhold ikke opløst)	Regenesis	https://regenesis.com/en/technology/3-d-microemulsion/	
	ELS®	SRD - langsomtfrigivende = Mix opløst? (lichitin baseret donor)	Evonik	https://active-oxygens.evonik.com/en/products-and-services/soil-and-groundwater-remediation/els-	
	Provect-ERD™ and ERD-CH4™ Liquid,	SRD - langsomtfrigivende = Mix opløst (med glycerol, EVO, gær/hvidløg-ekstrakt, methan hæmmer)	Provectus Environmental Products, Inc.	https://provectusenvironmental.com/erd-ch4/	
	Laktat, etanol, melasse	SRD (Letomsættelig donor) - opløst	Ikke patenterede produkter. Flere forhandlere i Danmark f.eks. Brenntag.		

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
C: Kombination af kemisk reduktion og biologisk reduktion	EZVI	Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende (EVO)	Provectus Environmental Products, Inc	https://provectusenvironmental.com/ezvi/EZVI_Tech_Sheet_FINAL.pdf	Målrettet til kildeoprensning
	Ferox Plus Emulsified Zero Valent Iron (eZVI)	Nano + Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende (EVO)	Hepure	Ferox Plus Emulsified ZVI (eZVI) - Hepure	
	Provect-IR®	Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende = Mix (mikro-pulver) (SRD = med methanhæmmer, cellulose kulstof-donor, næringsstoffer)	Provectus Environmental Products, Inc	https://provectusenvironmental.com/p-ir/Provect-IR_Tech_Sheet_FINAL.pdf	Anvendt på Hvedemarken, Farum (Region Hovedstaden, 2025b)
	EHC®	Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende = Mix (mikro-pulver). (SRD = karbondonor indeholder cellulose og hemi-cellulose forbindelser (polysaccharider))	Evonik	https://active-oxygens.evonik.com/en/products-and-services/soil-and-groundwater-remediation/ehc-reagent	
	Anaerobic BioChem Plus (ABC®+)	Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende = Mix (mikro) (SRD = EVO og/eller langkædede fede syrer, laktat, glycerol, fosforholdige næringsstoffer)	Redox Tech	https://www.redox-tech.com/abc-2/	
	EDS-ZVI™	Sulfidized-Micro ZVI + SRD - langsomtfrigivende = Mix (SRD = glycerol i emulsion med S-mZVI + EVO) (S-mZVI = <5-micron colloidal iron)	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheet_s/Tersus/42a_EDS-ZVI_Tech_Brief.pdf	
	EHC® Liquid	Fe(II) + SRD - langsomtfrigivende = Mix (SRD = lichenin baseret donor = ELS® Microemulsion)	Evonik	https://active-oxygens.evonik.com/en/products-and-services/soil-and-groundwater-remediation/ehc-liquid	
	Provect-ERD™ + DVI	Fe(II) + SRD - langsomtfrigivende = Mix (SRD, se Provect-ERD™ (med glycerol, EVO, gær/hvidløg-ekstrakt, methan hæmmer)	Provectus Environmental Products, Inc	https://www.provectusenvironmental.com/erd/Provect-ERD+DVI_Tech_Sheet.pdf	

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
D+E: Kombination af sorption med kemisk reduktion og/eller anaerob biologisk nedbrydning	BOS-100®	AC (GAC) + Mikro ZVI	RPI Inc	https://www.trapandtreat.com/products/bos-100/	
	Carbo-Iron® C	AC (kolloid) + Nano ZVI	Intrapore	https://intrapore.com/en/products/carboiron/	
	CAT-100®	AC (GAC) + Mikro ZVI + specifikke nedbrydere (BOS100+specifikke nedbrydere)	RPI Inc	CAT 100 - Remediation Products, Inc	
	PlumeStop®	AC (kolloid). Kan kombineres med AQUIFix (SRD) og eller S-MicroZVI (Sulfidized-Micro ZVI) På kolloidform.	Regenesis	https://regenesiscorp.com/en/technology/plumestop-liquid-activated-carbon/	
	EHC® Plus	AC (PAC) + Mikro ZVI + SRD - langsomtfrigivende = Mix (mikro-pulver). (SRD = karbondonor indeholder cellulose og hemi-cellulose forbindelser (polysaccharider)) EHC® Plus er en kombination af EHC® og AC (PAC)	Evonik	https://active-oxygens.evonik.com/en/product/PR_52053725?name=EHCPlus	

Kategori af produkt	Navn på produkt	Underkategori	Firma	Firmaoplysninger om produktet	Bemærkning
F: pH kontrol (Buffer)	Neutral Zone	Langsomtfrigivende bufer	RNAS Remediation Products	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/2014/07/NeutralZone.pdf	Anvendt i Kærgård Plantage til kildeoprensning (f.eks. Region Syddanmark, 2021)
	Magnesium hydroxide	Langsomtfrigivende bufer	Tersus	https://www.tersusenv.com/images/documents/spec_sheets/Tersus/07_Buffers.pdf	Best suited for short-term treatment, or situations where the budget will allow multiple repeat injection (burns out quickly)
G: Bakteriekultur	BDI Plus	All of the non-SIREM cultures are produced by one common production facility in New Jersey, prepared and marketed under various other vendor branding labels. Therefore, the capabilities of these cultures (with the exception of the TCA one, which adds DHB to the DHC culture) should be similar.	Regenesis	https://regenesis.com/en/technology/bio-dechlor-inoculum-plus/	
	TSI DC®		Terra systems	https://www.terrasystems.net/remediation-products/anaerobic-products/bioaugmentation-cultures/	Contains >1 x 10 ¹¹ Dehalococcoides cells/L. Produced at production facility in New Jersey, USA
	TSI TCA-DC		Terra systems	https://www.terrasystems.net/remediation-products/anaerobic-products/bioaugmentation-cultures/	Contains >5x10 ¹⁰ Dehalococcoides cells/L and >5 x 10 ¹⁰ Dehalobacter. Produced at production facility in New Jersey. USA
	RTB-1		Redox tech LLC	https://www.redox-tech.com/rtb-1/	No information provided on cell counts. Scaled up from fermenters ranging from 7-750 L. Produced at production facility in New Jersey, USA
	KB-1®, KB1Plus ®		SIREM	https://www.siremlab.com/wp-content/uploads/2016/02/kb1-kb1-plus.pdf	KB-1 and KB-1 Plus are custom prepared based on site contaminants, and can be optimized for VC and cDCE treatment based on this. Have capacity for B12 and option to use low pH culture to enhance treatment when pH <6.5. Contains >1 x 10 ¹¹ Dehalococcoides cells/L (KB-1), and >1 x 10 ¹¹ Dehalococcoides cells/L, >5 x10 ¹⁰ Dehalobacter and >5 x10 ¹⁰ Dehalogenimonas (KB-1 Plus [formulation specific]). Produced at production facility in Ontario, Canada
	SDC-9TM		RNAS Remediation Product	https://rnasinc.com/wp-content/uploads/SDC-9_LowRes.pdf	Contains >1 x 10 ¹¹ Dehalococcoides cells/L. Produced at production facility in New Jersey, USA
	BAC-9		EOS Remediation	https://fieldtech.tech/wp-content/uploads/2017/04/Bac9_productinfosheet.pdf	EOS Remediation is now a Redox Tech LLC company. See RTB-1 above.

Firmaliste	
Ejlskov	Ejlskov A/S - Jens Olsens Vej 3, DK-8200 Aarhus N. Direktør Palle Ejlskov
Evonik, Europe: Mike	Evonik, Europe: Mike Mueller, Sales & Technical Contact. Phone: +43 5238 53262 mike.mueller@evonik.com
Hepure	Hepure Technologies, USA, P.O. Box 5784 Hillsborough, NJ 08844-5784 Bob Kelley, Ph.D. +1 866.727.4776 x2 bob.kelley@hepure.com
Höganäs	Höganäs AB / Höganäs Sweden AB SE-263 83, Höganäs, +46 42 33 80 00 info@hoganas.com
QM	QM Environmental International B.V. Henricuskade 123A, 2497 NB The Hague The Netherlands, Tel: +31 (0)858 768 862 E-mail: info@qmes.nl
NANO IRON	NANO IRON, s.r.o., Topolová 933 Židlochovice 667 01, Czech Republic, info@nanoiron.cz Ing. Jan Slunský Managing Director +420 731 552 044
Provectus	Provectus Environmental Products, Inc. PO Box 332, Dixon, IL 61021 USA tel: (815) 650-2230, email: info@provectusenv.com
Redox Tech	Redox Tech, 200 Quade Drive, Cary NC 27513, US, phone +1 919-678-0140
Regenesis	Regenesis, 1011 Calle Sombra San Clemente, CA 92673 Ph:(949) 366-8000
Rio Tinto	Rio Tinto, Metal Powders 1655 Marie-Victorin, Sorel-Tracy, QC J3R 4R4 Canada T: +1-450-746-5050
RNAS	RNAS, Bill Newman, 6712 West River Road, Brooklyn Center, MN 55430 USA, By Email: info@RNASinc.com By Phone:+1 (763) 585.6191
RPI Inc.	Kontaktperson i DK: Ejlskov A/S, Palle Ejlskov, Phone: +45 87 31 00 61, Jens Olsens Vej 3, 8200 Aarhus, Denmark, www.ejlskov.com
Tersus	Tersus Enviromental, 1116 Colonial Club Road, Wake Forest, NC 27587 United States, +1 919.453.5577 info@tersusenv.com

Bilag D Oversigt over AOP og andre potentielle on-site behandlingsmetoder

Bilag D: Oversigt over AOP processer og andre potentielle on-site behandlingsmetoder

01-12-2025

PRIMÆR METODE TIL RENSNING AF OPPUMPET GRUNDVAND		KORT METODEBESKRIVELSE	RENSEEFFEKTIVITET				Kan metode anvendes som "standalone" eller kræver det kombination med andre metoder (Treatment train) Beskrives	Erfaring med metoden (laboratorie/pilot/fuldskala ["2020" henviser til resultater fra laboratorieundersøgelser i 2020 med vand fra Grindstedværket]	FORDELE	ULEMPER	VURDERING
			Klorerede opløsningsmidle (PCE, TCE)	Klorerede opløsningsmidle (DCE, VC)	nedbryde Grindsted-værkstoffer (barbiturater og sulfonamider og nedbrydningsprodukter heraf	Øvrige org. stoffer sm kan være problematiske?					
AKTIVT KUL (GAC)	GAC	De organiske forureningskomponenter adsorberes med aktivt kul. Drift inkluderer periodevis udskiftning af kul.	God	Delvis	Kan adsorbere men ikke nedbryde stofferne		Aktivt kul kan kun rense vandet delvist. Derfor skal metoden kombineres med andre rensemetoder. GAC vil med fordel kunne anvendes til efterrensning af vand, der er rensat ved AOP. Det blev testet med en vis succes i 2020. Forrensning i et sandfilter vil være påkrævet.	I 2020 blev det påvist, at ca. 88% af pharmastofferne i vand fra Grindstedværket kunne fjernes med GAC.	Simpel løsning med stor erfaring fra andre projekter	Kan ikke tilbageholde alle pharmastoffer og kan ikke effektivt fjerne VC og DCE. Ikke en cost effektiv metode til rensning for VC og DCE	GAC er ikke cost-effektiv til rensning af VC og DCE. Kan fjerne ca. 88% af pharmastofferne og kan derfor bruges i kombination med andre rensemetoder. GAC er ikke anbefalet som rensenmode til VC af den Amerikanske Miljøstyrelse (US-EPA).
	Ozon	De organiske forureningskomponenter fjernes ved kemisk oxidation med ozon. Rester af ozon skal "fjernes" inden udledning til recipient eller reinfiltration til grundvandet. Drift inkluderer vedligehold af ozongenerator.	God	God	I 2020 blev ca. 88% af pharmastofferne nedbrudt ved en maximal ozondosering	I 2020 fandt man, at kulbrinter nedbrydes dårligt ved moderat ozon dosering. Det gælder især benzen	Metoden kan ikke anvendes alene som rensenmetode. I 2020 blev der opnået en forbedret rensning ved at efterrense med GAC. Dog blev der kun fjernet ca. 91% af pharmastoffer ved denne metode. Forrensning i et sandfilter vil være påkrævet.	Der er generelt mange erfaringer med ozonrensning af vand med organisk forurening. I 2020 blev der høstet en del erfaringer med metoden. Renseeffekten blev bedre, når ozondoseringen blev øget, men bliver doseringen for høj, dannes der bromat. Der kunne ikke opnås tilstrækkelig god rensning med en ozondosering, som ikke medførte dannelse af bromat. I 2020 blev der opnået en god fjernelse af VC og DCE, men det gode resultat kan måske skyldes, at en del af disse stoffer er blevet strippet bort ved forsøget.	Relativ simpel løsning med stor kommerciel anvendelse. Ofte brugt i Europa til fjernelse af pharmastoffer i spildevand.	Den svageste af AOP-processerne. Stor sandsynlighed for en ukomplet nedbrydning, så der vil være organiske nedbrydningsprodukter i vandet efter rensning. O3-generatorer er dyre; kræver kontrol af O3-lab til atmosfæren/indexklima. I 2020 blev der målt stigende bromat-koncentrationer i vandet, når ozon-doseringen blev øget.	Metoden er generelt effektiv til at fjerne mange organiske stoffer. Ved metoden dannes hydroxylradikaler, og derfor bør man med denne metode kunneoxidere organiske forureningskomponenter mere effektiv end med ozon alene. I 2020 konstaterede man kun en lille forbedring i forhold til ozon alene. Metoden bør dog suppleres med kulfilter som ekstra sikkerhed, men selv ikke der kombination giver tilfredsstillende rensning for pharmastofferne i vandet fra Grindstedværket.
AVANCEREDE OXIDATION PROCESSER (AOP)	O3 + H2O2	De organiske forureningskomponenter fjernes ved avanceret kemisk oxidation med ozon og brintperoxid, hvorved der dannes hydroxylradikaler. Rester af ozon og brintperoxid skal "fjernes" inden udledning til recipient eller reinfiltration til grundvandet. Drift inkluderer generering af ozon + tilsætning af brintperoxid. Desuden skal overskydende ozon/brintperoxid fjernes fra vandet inden slutfældning.	God	God	I 2020 blev ca. 88% af pharmastofferne nedbrudt ved en maximal ozondosering. Det var stort set det samme, som blev opnået med ozon alene	I 2020 fandt man, at kulbrinter nedbrydes dårligt ved moderat ozon dosering. Det gælder især benzen.	Metoden kan ikke anvendes alene som rensenmetode. I 2020 blev der opnået en forbedret rensning ved at efterrense med GAC. Dog blev der kun fjernet ca. 93% af pharmastoffer ved denne metode. Forrensning i et sandfilter vil være påkrævet.	Der er generelt ikke så mange erfaringer med denne AOP-metode i praksis. I 2020 blev den undersøgt grundigt, og det var ventet, at metoden ville være meget mere effektiv end ozon alene. Det blev ikke verificeret. Det mest positive resultat var, at der blev dannet mindre bromat ved denne metode, end ved den rene ozon oxidation.	Er et stærkere oxidationsmiddel end ozon alene, så man skulle forventes at alle organiske stoffer kan nedbrydes. I 2020 konstaterede man, at renseseffekten kun var en smule bedre end for ozon alene	O3-generatorer er dyre; kræver kontrol af O3-lab til atmosfæren/indexklima. UV medfører stort elforbrug. Uden brug af GAC er der risiko for at overskydende ozon og brintperoxid ikke fjernes inden slutfældning.	Metoden er generelt effektiv til at fjerne mange organiske stoffer. Metoden bør dog suppleres med kulfilter som ekstra sikkerhed, men selv ikke den kombination giver tilfredsstillende rensning for pharmastofferne i vandet fra Grindstedværket.

PRIMÆR METODE TIL RENSNING AF OPPUMPET GRUNDVAND		KORT METODEBESKRIVELSE	RENSEEFFEKTIVITET				Kan metode anvendes som "standalone" eller kræver det kombination med andre metoder (Treatment train) Beskrives	Erfaring med metoden (laboratorie/pilot/fuldskala ["2020" henviser til resultater fra laboratorieunder-søgelser i 2020 med vand fra Grindstedværket])	FORDELE	ULEMPER	VURDERING
			Klorerede opløsningsmidle (PCE, TCE)	Klorerede opløsningsmidle (DCE, VC)	nedbryde Grindsted- værkstoffor (barbiturater og sulfonamider og nedbrydningsprodukter heraf)	Øvrige org. stoffer sm kan være problematiske ?					
AVANCEREDE OXIDATION PROCESSER (AOP)	UV + H2O2	De organiske forureningskomponenter fjernes med avanceret kemisk oxidation med UV + brintperoxid, hvorved der dannes. Rester af brintperoxid skal "fjernes" inden udledning til recipient eller reinfiltration til grundvandet. Drift inkluderer vedligehold af UV-lamper + tilsætning af brintperoxid.	Delvis	Delvis	I 2020 blev ca. 98,5% af pharmastofferne nedbrudt ved en maximal dosering af H2O2 og UV.		Renseeffektiviteten kan forbedres, hvis det rensede vand efterrenses med GAC. I 2020 blev der med denne metode opnået en fjernelse på 99,4% af pharmastofferne. Samtidig blev der fjernet ca. 99,95% af de chlorerede opløsningsmidler. Forrensning i et sandfilter vil være påkrævet.	Metoden er ikke særlig udbredt. Den blev første gang med succes anvendt i Danmark til rensning af forurenat grundvand med TCE i 1992. I 2020 blev der høstet gode erfaringer med metoden, idet man afprøvede forskellige doseringer af H2O2 og UV-lys.	Er et stærkere oxidationsmiddel end H2O2 alene, fordi UV-lys genererer hydroxylradikalerud fra H2O2. Derfor forventes at de fleste organiske forureningsstoffer kan ned-brydes med denne metode. Det er simplere og mere sikkert at håndtere brintperoxid end f.eks. ozon. Der dannes ikke bromat.	UV har et forholdsvis stort strømfobrug. Der kan dannes be-lægninger på lampeglasset, som svækker lysgen-nemgangen. Lampernes lys-styrke reduceres med alderen. Vandet skal være transparent for UV-lys.	Metoden er velkendt og generelt effektiv til at fjerne mange organiske stoffer. Kulfilteret vil sikre at overskydende brintperoxid nedbrydes inden slutfledning. Metoden gav i 2020 en forholdsvis god nedbrydning af både chlorerede opløsningsmidler og pharmastoffer. En gennemgang af forsøgsdata fra 2020 viser, at man kan forvente endnu bedre nedbrydning, hvis man øger UV-doseringen. Det gøres bedst ved at anvende et passende antal UV-anlæg i serie. Det bør afprøves i et lab-forsøg samt evt. senere i et pilotforsøg.
	Katalytisk H2O2 filter	De organiske forureningskomponenter fjernes med avanceret kemisk oxidation med brintperoxid som aktiveres på specielt keramisk filter. Rester af brintperoxid skal "fjernes" inden udledning til recipient eller reinfiltration til grundvandet. Drift inkluderer tilsætning af brintperoxid og periodevis regenerering af keramisk filter.	God	God	I 2020 blev ca. 99,92% af pharmastofferne nedbrudt ved en optimal dosering af H2O2 samt en optimal opholdstid		Renseeffektiviteten kan forbedres, hvis det rensede vand efterrenses med GAC. I 2020 blev der med denne metode opnået en fjernelse på 99,92% af pharmastofferne. Samtidig blev der fjernet ca. 99,98% af de chlorerede opløsningsmidler. Forrensning i et sandfilter vil være påkrævet.	Metoden anvendes en del i Holland til rensning af vand med pesticider fra gartnerier. Metoden blev grundig testet ved forsøgene i 2020.	Metoden giver en meget kraftigere oxidation end H2O2 alene. Forsøgene i 2020 viser, at stort set alle forurenende organiske stoffer kan nedbrydes effektivt. Det er simplere og mere sikkert at håndtere brintperoxid end f.eks. ozon. Der dannes ikke bromat.	Relevat ny metode med begrænset erfaring. Metoden er ikke tidligere anvendt til rensning af stofferne som findes i Grindsted-fanen. Katalysatoren forbruges og skal fornyes ca. én gang halvårligt.	Metoden er generelt effektiv til at fjerne mange organiske stoffer. Ved efterrensning med aktivt kul, vil kulfilteret vil sikre, at overskydende brintperoxid nedbrydes inden slutfledning.
	RED-OXY proces (Ferrate oxidation)	Det tyske firma "Watch Water har udviklet en særdeles effektiv oxidationsmetode, som er baseret på, at jern i iltningsstrinnet 6 (ferrat) kan kan oxidere de fleste organiske stoffer, når jern omdannes fra iltningsstrinnet 6 til 3. Herved dannes Fe ³⁺ , der udfældes som Fe(OH) ₃	Kan destruere mange chlorerede opløsningsmidler, f.eks. TCE	Kan destruere DCE. Ingen oplysninger om VC.	Ingen oplysninger		Den kemiske rensemetode bør ifølge leverandøren suppleres med et katalytisk kulfilter. Forrensning i et sandfilter vil nok være påkrævet.	Leverandøren har i brochuren oplyst om erfaringer med over 50 kemiske forbindelser, der kan destrueres - både organiske og uorganiske. Her skal nævnes pheoler, chlorerede phenoler, chlorerede aromatiske kulbrinter, PAH, TCE, nonylphenoler, pesticider, phthalater, alkoholer og aminer.	Anlægget er meget simpelt i sin opbygning. Der doseres to forskellige kemikalier til vandet, som efterfølgende skal reagere i 3-6 minutter. Vandet efterbehandles i et mangan coated partikelfilter samt et katalytisk kulfilter, som leverandøren har udviklet.	Der dannes et jernhydroxid affaldsprodukt, der indeholder visse restprodukter fra oxidationsprocessen. Det skal bortskaffes.	Metoden er ukendt i Danmark, og der foreligger ikke meget detaljerede oplysninger om processen - herunder den forvende renseeffektivitet. Metoden er meget simpel og billig i både investering og drift, og den er let at teste i laboratoriet. Derfor foreslås en simpel laboratorietest for at finde ud af, hvor godt metoden fungerer. Hvis de indledende tests giver gode resultater, kan det anbefales at lave yderligere optimerings-forsøg.

PRIMÆR METODE TIL RENSNING AF OPPUMPET GRUNDVAND	KORT METODEBESKRIVELSE	RENSEEFFEKTIVITET				Kan metode anvendes som "standalone" eller kræver det kombination med andre metoder (Treatment train) Beskrives	Erfarings med metoden (laboratorie/pilot/fuldskala ["2020" henviser til resultater fra laboratorieundersøgelser i 2020 med vand fra Grindstedværket])	FORDELE	ULEMPER	VURDERING
		Klorerede opløsningsmidle (PCE, TCE)	Klorerede opløsningsmidle (DCE, VC)	nedbryde Grindsted- værkstoffet (barbiturater og sulfonamider og nedbrydningsprodukter heraf	Øvrige org. stoffer sm kan være problematiske?					
Andre metoder	Membran filtrering + SCWO	Både organiske og uorganiske stoffer opkoncentreres ved membranfiltrering. Det opkoncentrerede koncentrat renses med SCWO, som kan nedbryde organiske stoffer til vand og kuldioxid.	God	God		Membranprocesser kan anvendes til rensning af vand, samtidig med at de forurenende stoffer opkoncentreres i en lille vandigt volumen. Herefter kan det opkoncentrerede affald destrueres ved SCWO. De chlorerede opløsningsmidler skal fjernes før membran-filtrering. Det kan evt. foregå ved ozonbehandling eller stripping med luft. Det rensede vand fra membranfiltrering bør efterrenses med aktivt kul. Treatment Train: 1. Fjernelse af chlorerede opl. 2. Rensning af vand i membranfilter. 3. Efterrensning af vand i GAC 4. Destruktion af forurenende stoffer i SCWO	Metoden er ikke afprøvet på vand med pharmastoffer, men der forventes en effektiv tilbageholdelse af de organiske stoffer i et membranfilter. F.eks. kan PFAS tilbageholdes ned til en restkoncentration på 1-2 ng/l i et membranfilter SCWO er testet på nedbrydning af medicin-rester i spildevand. Mere en 50 almindelige medicinrester fjernes til under 10 ng/l (den analytiske detektions- grænse) for samtlige medicinrester. Samme gode resultat er opnået med PFAS- fobindelser.	Ved metoden opnås en fuldstændig destruktion af mere en 90% af pharmastoffer.	Både membran-filtrering og SCWO er nogle komplekse og dyre metoder, der kræver en del vedligehold.	I princippet kan nedbryde alle organiske stoffer og dermed også Grindsted- stofferne. SCWO vurderes at være den ultimate løsning til oxidering af organiske stoffer. Med denne metode oxideres stoffer, som evt. ikke kan oxideres ved den bedste AOP-metode. Metoden er imidlertid en kompleks og forholdsvis dyr metode. Det er derfor ikke økonomisk realistisk at køre alt vandet igennem en SCWO-reaktor, da en sådan reaktor skal være meget stor. En stor opkoncentreringen kan typisk opnås ved membranfiltrering (RO – omvendt osmose eller NF – nanofiltrering). Det vides ikke, om membran-filteret kan fjerne alle Grind-stedstoffer tilstrækkelig effektivt. Derfor bør det rensede vand fra membranfilteret renses med GAC inden udledning til overfladevand eller reinfiltration til grundvandet.