



# KEMIKALIER I KÆRGÅRD

## KEMI I KÆRGÅRD

I Kærgård Klitplantage ligger en gigantisk stor generationsforurening. Region Syddanmark renser stadig op, bid for bid. Hvis pengene findes til at færdiggøre oprensningsarbejdet vil dette tage 6 år. Først herefter kan man tælle 10-15 år frem og vente badeforbuddet ophævet. Når vi ikke vil sende forureningen videre til vores børn, som går i skole nu, er det derfor vigtigt, at arbejdet i Kærgård Klitplantage fortsætter. Og her er rigtig meget at lære inden for fagene samfundsfag, historie, kemi, biologi, geologi – og ikke mindst om, hvordan fagene tværfagligt supplerer hinanden og løfter opgaven.

Hvis I ønsker at bruge ressourcepersoner nævnt i materialet, kan I kontakte Vardemuseerne ([www.vardemuseerne.dk](http://www.vardemuseerne.dk)) – eller I kan gøre brug af jeres eget lokale museum!

Ønsker I mere undervisningsmateriale om forureningen i Kærgård Klitplantage, så er følgende forløb at finde på [voyagerscience.dk](http://voyagerscience.dk):

*Kemi ved Kysten*

*Fortidens fejltagelser - Nutidens forhindringer*

# INDHOLD

## INDHOLD

Beskrivelse og materialeliste

Lek. 1: Oplæg (Historie og Samfundsfag)

Lek. 2: Ekskursion (Tværfagligt)

Lek. 3: Kemiske processer i relation til Kærgård (Kemi)

Lek. 4: Oplæg om plancheformidling (Samfundsfag og Historie)

Lek. 5: Timer med almindelig kemiundervisning (Kemi)

Lek. 6: Skiltefremstilling/Video-info (Tværfagligt)

*Projektarbejde med Produkt/Udtryk*

Lek. 7: Fremlæggelse (Tværfagligt)

Kemisk appendiks



## BESKRIVELSE OG MATERIALER

Kærgård Klitplantage er et område, der ligger mellem Vejers og Henne Strand i Vestjylland. Området er blevet kendt for at være meget forurenet. Det skyldes, at Grindstedværket – helt lovligt – udledte spildevand og kemisk affald i perioden 1956-1973. De kemiske forbindelser, Grindstedværket udledte, var især klorerede organiske forbindelser, og i dag mener man, at Grindstedværket samlet set har udledt 300.000 tons giftigt spildevand.

Gennem de sidste ca. otte år er man kommet frem til, at en kombination af to oprensningsmetoder virker godt i Kærgård Klitplantage. Kemisk metode er den ene og biologisk metode er den anden.

Ved kemisk metode tilsættes kemikalier indsatsområdet til nedbrydning af organiske forureningskomponenter, og nedbrydning sker på stedet i grundvandszonen.

Ved biologisk metode tilsættes der organisk stof og en bakteriekultur for at fremme naturlig nedbrydning. Her sker nedbrydningen også på stedet i grundvandszonen, og pH holdes neutral ved at tilsætte en buffer. Denne biologiske metode er skånsom overfor miljøet og følger i nogen grad forureningens bevægelse nedstrøms i gruberne.

Vores undervisningsprojekt om Kærgård Klitplantage vil forløbe over ca. en måneds tid. Jeres opgave bliver enten at udarbejde info-tavler, der skal informere borgere omkring giftstofferne, og hvordan man i Region Syddanmark arbejder med at fjerne forureningen, eller at producere en kort info-video i et letforståeligt sprog om forureningen. I skal altså forestille jer, at skiltene eller den info-video, I laver, skal omsætte kemisproget til et hverdagssprog, der kan forstås af folk, som aldrig har haft biologi eller kemi på højt niveau.

Info-tavlerne og video-oplæggene skal kunne indgå i et info-center ved forureningsgrunden. Her skal gæster kunne se

og forstå, hvad der foregår i Kærgård Klitplantage. Verdensmål 12 står centralt i dette forløb. Alle verdens lande har med de 17 Verdensmål besluttet at arbejde mod en bæredygtig fremtid. Arbejdet med at fjerne forurening i Kærgård Klitplantage giver anledning til at kigge nærmere på Verdensmål 12. Her er nemlig forurenningen blevet forbrugt og produceret på en ikke-bæredygtig måde, og Verdensmål 12 omfatter en fremtidig sikring af bæredygtigt forbrug og produktionsformer. Blandt andet er det beskrevet i delmålet til Verdensmål 12, at produktionen skal ændres, så skadelige kemikalier udskiftes med mindre skadelige stoffer og ikke udledes direkte i miljøet. Inden 2020 skal vi begynde at håndtere alle kemikalier og spildprodukter på en miljømæssigt forsvarlig måde.

I vores samfund producerer vi produkter med et kæmpe resourceforbrug til følge, og både produktionen og transporten kan ødelægge miljøet lokalt som globalt! I mange tilfælde kan produktionen ændres, så skadelige kemikalier udskiftes med mindre skadelige stoffer. Det konkrete mål hedder, at vi inden 2020 skal begynde at håndtere alle kemikalier og spildprodukter på en miljømæssigt forsvarlig måde. Eventuelt videre arbejde med dette kan give sammenhængsforståelse og inspirere til indfrielse af Verdensmål.

**Materialeliste:**

Projektor

Varmt tøj, gode støvler og mobilkamera til ekskursion

Karton

Tuscher

Computer

Råfotos til ideudkast til skilte/info-plancher

Kamera

MATERIALER

## LEKTION 1: OPLÆG (Historie og Samfundsfag)

Som det første skal I med naturvejlederen eller på egen hånd have undersøgt området Kærgård Klitplantage. Naturvejlederen har et oplæg, der giver en introduktion til, hvordan forureningen er endt i Kærgård, og som forklarer hvilken sårbar naturtype det er, at denne store generationsforurening er placeret midt i. Den ramme som arbejdet med forureningen og det kemiske oprensningsarbejde foregår indenfor har både en historie og nogle givne rammer nu og her. Det vil naturvejlederen gerne beskrive for jer inden I skal derud så I også har mulighed for at stille spørgsmål og bedre forstå den opgave I bliver stillet overfor.

Oplægget handler altså dels om noget historisk og samfundsfagligt, dels om naturen og hvordan den forvaltes i korte træk. Kontakt Vardemuseerne for et oplæg.

Vælger I at undersøge lokaliteten Kærgård Klitplantage og forureningens opståen på egen hånd, opfordrer vi til, at I benytter Vardemuseernes indsamlede kildemateriale sammen med alt hvad I iøvrigt selv kan finde. Kontakt [tr@vardemuseerne.dk](mailto:tr@vardemuseerne.dk).

Her kan I undersøge Verdensmål 12 om ansvarligt forbrug og produktion. Det, at vi skal sikre bæredygtigt forbrug og bæredygtige produktionsformer, er toprelevant i forhold til forureningen i Kærgård som case.



## LEKTION 2: EKSKURSION (Tværfagligt)

I andet modul besøger vi forureningsgrunden i Kærgård Klitplantage. Her møder I Vardemuseernes formidler som kan vise og forklare om forureningen, historien bag, om hvordan området fungerer som arbejdsplads samt fortælle om hvordan den nyeste forskning bliver brugt til at oprense så effektivt, billigt og miljøvenligt som muligt. Måske møder vi lederen på oprensningen, Jørgen Fjeldsø Christensen. Han er geolog og arbejder i Region Syddanmark. Og det er ham Vardemuseerne har en aftale med, så I kan blive vist forsvarligt rundt. Formidleren vil også hvis der er tid tage jer med ned på den giftige strand. Der gives undervejs mulighed for, at eleverne kan stille spørgsmål. Spørgsmålene kan gå på alt fra geologi, biologi, kemi, historisk viden om dumpningen af gift i Kærgård og til hvordan, der fortsat findes midler til at rense op.



## LEKTION 3: KEMISKE PROCESSER - I RELATION TIL KÆRGÅRD (Kemi)

I 3. lektion her skal I høre om nogle af de kemiske processer, der foregår i oprensningen. De hedder bl.a. kemisk oxidation og foregår ved tilførsel af kemiske oxidanter. Læs om dette i appendikset bagerst i materialet her og lav de tilhørende opgaver.

Såfremt I ønsker et oplæg om kemien i oprensningen, kan I gennem Vardemuseerne henvende jer til civilingeniør i kemiteknik, Jens Muff, der har arbejdet med oprensningen i Kærgård Klitplantage og som også har den kemiske oprensning som fagområde. Blandt andet arbejder civilingeniører og biokemikere i Kærgård med den forurenede jord og det, de kalder environmental engineering. Hvordan man helt specifikt arbejder med kemiske processer i oprensningen er noget oplægsholder her ved og kan fortælle om – og selvfølgelig får eleverne igen rig mulighed for at stille spørgsmål, som de kan bruge til at løse deres opgave – eller for eksempel i relation til fag og studie-/erhvervsvalg.



KEMISKE PROCESSER

## LEKTION 4: OPLÆG OM PLANCHEFORMIDLING (Samfundsfag og Historie)

Her kan I kontakte en formidler fra jeres lokale museum til at give tips og tricks til, hvordan I bedst muligt kan formidle et budskab på skilte-form.

Når et svært stof som kemiske oprensningsprocessor skal koges ned og forklares i planche-form, skal man dels tænke i, at de fleste skal kunne forstå det umiddelbart og at der er begrænset plads at skrive på. Og så må det gerne være pænt at kigge på. Et godt layout med tydelighed i illustrationer mm. giver en bedre formidling af stoffet.

Her vil museumsformidleren altså komme med et par gode ideer til, hvad I bør gennemtænke i grupperne, før I laver jeres planche.



## LEKTION 5: TIMER MED ALM. KEMIUNDERVISNING (Kemi)

Her fortsætter I arbejdet i appendikset bagerst i materialet her, med at forstå de kemiske og biologiske nedbrydnings processer som benyttes i Kærgård. Jeres undervisere arbejder, med afsæt i de processer, der er i brug i Kærgård på forureningsgrunden, videre med disse i den almindelige kemiundervisning. Vi håber, forløbets afsæt i en aktiv arbejdsplads gør kemiundervisningen endnu mere spændende og relevant! Og som ekstra bonus vil I måske undervejs blive inspireret til, hvad I har lyst til at arbejde med i jeres arbejdsliv som voksne!



## LEKTION 6: SKILTEFREMSTILLING/VIDEO-INFO (Tværfagligt)

I denne uge arbejdes der videre med projektet. I nogle af modulerne vil der være fælles undervisning – emnerne vil blive tilpasset de behov, der opstår i løbet af projektet. Søger I mere viden har Vardemuseerne samlet et sæt kildemateriale omkring Grindstedværkets produktion og dumpning af højgiftigt affald ved Kærgård. Kontakt [tr@vardemuseerne.dk](mailto:tr@vardemuseerne.dk) for at få link til materialet.

Her vil det give mening at arbejde mere ind i følgende Verdensmål:

**Verdensmål 12** om ansvarligt forbrug og produktion – dét, at vi skal sikre bæredygtigt forbrug og produktionsformer.

**Verdensmål 14** om Livet i havet har som delmål, at inden 2025 skal alle former for havforurening forhindres og væsentligt reduceres. Det gælder især forurening fra landbaserede aktiviteter.



## LEKTION 7: FREMLÆGGELSE (Tværfagligt)

Eleverne får tid til at arbejde to og to eller tre og tre med at videreformidle stoffet og sætte deres placher op som de vil have dem – eller vise deres optagelser med formidlingsklip for holdet.

Fremlæggelse af produkt. Til stede er holdets undervisere plus eventuelt en eller flere øvrige ressourcepersoner, der har været med undervejs. De vil stille spørgsmål og give kommentarer både med henblik på den kemifaglige del og formidlingsdelen af projektet.



FREMLÆGGELSE



# **NEDBRYDNING AF FORURENENDE STOFFER I KÆRGÅRDS UNDERGRUND**

## **KEMISK APPENDIKS TIL FORLØB OM FORURENING I KÆRGÅRD**

### **FORORD: TALER DU KEMISK?**

Projekt VOYAGER arbejder med det virkelighedsnære i formidling og undervisning. Den vinkel har vi valgt også at benytte i dette Kemiske appendiks.

Indholdet, tekst, kemi, opgaver og forsøg, er udarbejdet i samarbejde med undervisere og laboranter på Aalborg Universitet Esbjerg. Vi bruger derfor, igennem hele dette appendiks, det sprog, de navne og de betegnelser, som de bruger i deres daglige arbejde. Det betyder at I vil opleve at ikke alle ord og navne lever op til de IUPAC standarder, som I normalt kender fra jeres teoretiske undervisning.

Vi har valgt at fastholde virkelighedens sprog, det sprog som i det daglige benyttes på laboratorier og i virksomheder. Det er vores håb, at det vil ligge op til drøftelser imellem lærere og elever om sprogbrug i faget kemi.

### **INDHOLD**

#### **Del 1: Nedbrydning af forurenende stoffer i Kærgårds undergrund**

#### **Del 2: Oxidation i Kærgård**

*Opgave 1*

*Opgave 2*

#### **Del 3: Forsøg**

#### **Del 4: Bakteriel nedbrydning i Kærgård**

*Opgave 2*

#### **Del 5: Facit til opgaverne**

## NEDBRYDNING AF FORURENENDE STOFFER I KÆRGÅRDS UNDERGRUND

Region Syddanmark og deres samarbejdspartnere har valgt at benytte både en kemisk og en biologisk metode i oprensningen. Forsøg har vist, at de to metoder komplementerer hinanden optimalt således, at man opnår den største effekt, med det mindst mulige forbrug af resurser.

Mange af de uønskede stoffer i Kærgårds gruber kan nedbrydes ved kemisk oxidation. Oxidation er den ene halvdel af de såkaldte redoxreaktioner. Den anden kaldes reduktion. De defineres således, at en oxidation af et stof er ensbetydende med en afgivelse af elektroner, mens en reduktion af et stof er lig en optagelse af elektroner. At reduktion er lig med optagelse kan virke lidt bagvendt, men det skyldes, at afgivelse af elektroner ofte er forbundet med et stofs reaktion med ilt, hvilket har givet anledning til betegnelsen oxidation.

Du kan læse mere om redoxreaktioner i en kemibog fx *Basiskemi C* af Helge Mygind mfl. side 172-188, her findes også opgaver til emnet.

Kemisk rensning er mest effektiv ved høje mængder af forurening, så formålet er her at fjerne mest muligt af den nemmest tilgængelige del af forureningen til niveauer, hvor bakterier kan tage over. Efterfølgende benytter man sig af den biologiske oprensning til at komme helt i mål.

For at biologisk oprensning kan ske effektivt, er det vigtigt, at man først har fjernet den gruppe af stoffer, som kaldes sulfonamider. Disse er en gruppe af syntetiske antibiotika, som fortsat findes i undergrunden i Kærgård, og kan nedbrydes ved hjælp af kemisk oxidation.



Arbejdere i beskyttelsesdragter og med friskluftmasker borer ned i gruberne i Kærgård.

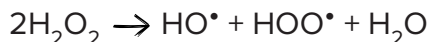
Som oxidationsmiddel bruges en modificeret udgave af Fentons reagens, som er specielt udviklet til oprensning af forurenet jord og grundvand, og som virker effektivt mod netop de stoffer og under de forhold, som findes i Kærgårds undergrund.

Fentons reagens blev oprindeligt udviklet af Henry John Horstman Fenton i 1890'erne til brug i organisk kemi, og er siden blevet videreudviklet til brug i rensningsprocesser. Reagensen består af en sur opløsning af hydrogenperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) tilsat jern(II)-ioner (fx fra jernsulfat ( $\text{FeSO}_4$ )).

Fentons processen går ud på at få dannet meget reaktive radikaler, der, som stærke oxidanter, kan nedbryde organisk forurening. Kemien i Fentons processen er opsummeret i reaktion 1 og 2. I processen katalyserer jern(II)-ioner ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dannelsen af hydroxyl-radikaler ( $\text{HO}^\bullet$ ) ved at bryde peroxid-bindingen i hydrogenperoxid (reaktion 1). Jern(II)-ionerne oxideres til jern(III) ( $\text{Fe}^{3+}$ ), og som biprodukt dannes hydroxid-ioner ( $\text{OH}^-$ ), som i sur opløsning reagerer med oxonium ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) til vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (reaktion 2). Jern(III)-ionerne kan også reagere med hydrogenperoxid, hvorved jern(II) regenereres og perhydroxyl-radikalet ( $\text{HOO}^\bullet$ ) dannes (reaktion 3).



Nettoreaktionen bliver altså:



Hydroxyl-radikalet er den primære oxidant, og et hydrogenperoxid-molekyle giver et hydroxyl-radikale. Perhydroxyl-radikalet bidrager dog også lidt til nedbrydning af forureningen.

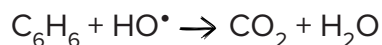
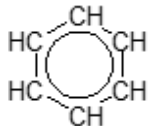
## OXIDATION I KÆRGÅRD

Da der figurerer mere end 1300 aktivstoffer i gruberne i Kærgård, giver det ikke mening at gennemgå dem alle, men nedenfor præsenteres to eksempler på oxidation af problematiske stoffer til mere uskadelige stoffer.

For begge reaktioner gælder det, at der vises den ikke-afstemte fuldstændige nedbrydning (oxidation) af stofferne til kuldioxid og uskadelige salte ved reaktion med hydroxylradikaler. Processen er analog til en fuldstændig forbrændingsreaktion, men foregår i vandig opløsning.

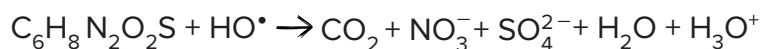
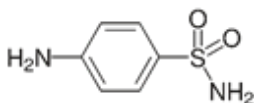
### Eksempel 1: Benzen

Benzen er en cirkulær aromatisk karbonhydrid, som vi finder i væsentlige koncentrationer i gruberne. Der findes mange andre lignende stoffer, og du kan læse mere om aromatiske karbonhydrider i en kemibog, fx *Basiskemi C* af Helge Mygind mfl. side 172-188, hvor der også findes opgaver til emnet.



### Eksempel 2: Sulfanilamid

Sulfanilamid er et sulfonamid antibiotika, som også findes i høje koncentrationer i grundvandet i gruberne i Kærgård.



# OPGAVER

## Opgave 1:

Afstem de to redox-reaktioner i sur opløsning. Du kan tage udgangspunkt i oxidationstal -1 for oxygen i hydroxyl-radikalet, -1/3 for karbon i sulfanilamid, -3 for nitrogen og +4 for svovl også i sulfanilamid.

## Opgave 2:

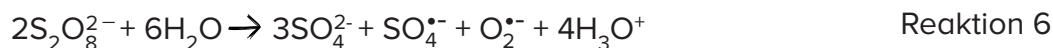
Forestil dig, at du skal rense 100 m<sup>3</sup> grundvand, som er forurenet med 5 g/L organisk forurening, repræsenteret ved benzen (35 vægt/volumen %) og sulfanilamid (65 vægt/volumen %), med den beskrevne Fentons proces.

Beregn den støkiometriske mængde af hydrogenperoxid (i ton), der skal tilsættes for at nedbryde forureningen med hydroxyl-radikaler alene.

Hydrogenperoxid tilsættes fra palletanke (1 m<sup>3</sup>) i en vægt% på 35% vandig opløsning (densitet: 1,13 kg/L). Hvor mange palletanke skal indkøbes til at nedbryde forureningen?

I dag arbejder forskerne også med andre oxidanter, som fx peroxodisulfat (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>) ioner, som kan have en endnu bedre effekt på nedbrydningen af de forurenende stoffer. Du kan finde videoer på internettet om denne forskning, fx her: [https://youtu.be/n\\_Fvt3sDs3Q](https://youtu.be/n_Fvt3sDs3Q)

Kemien ved brug af peroxodisulfat er analog med Fentons processen, da peroxid-bindingen også her skal brydes for at danne kraftigt oxiderende persulfat-radikaler. Dette kalder man aktivering, og det kan ske på tre forskellige måder. Ved temperaturer over 35 °C kan varmepåvirkningen i sig selv bryde peroxid-bindingen (reaktion 4) og danne radikaler. Reaktionshastigheden øges ved stigende temperatur ved den velkendte sammenhæng givet ved Arrhenius' lov. Jern(II)-ioner kan som i Fentons også aktivere peroxodisulfat ved selv at blive reduceret til jern(III) (reaktion 5), og endelig kan tilsætning af stærk base aktivere peroxodisulfat. Basisk aktivering er den mest anvendte i oprensning af forurenet jord og grundvand. Den præcise kemi i denne form for aktivering er ikke helt forstået, men bedste nuværende bud er opsummeret i reaktion 6 og 7 og resulterer i produktionen af en potent oxidativ blanding af både sulfat- og hydroxyl-radikaler.



## FORSØG

Dette forsøg illustrerer brug af Fentons processen til rensning af forurenede vand ved kemisk oxidation. Som model for forurenede vand bruges en opløsning af blå frugtfarve, der gradvist mister farven efterhånden som de organiske stoffer nedbrydes. Forsøget kan gennemføres med og uden brug af spektrofotometer til måling af opløsningens absorbans ved en specifik bølgelængde. Er en sådan ikke til rådighed, fremstilles en blind-opløsning uden blå farve, som der kan sammenlignes med.

### Udstyr

Erlenmeyer kolber i 100 mL, 250 mL, 1000 mL

5 mL pipette

100 mL måleglas

Magneter og 2 magnet-omrørere

Stopur

UV/VIS spektrofotometer (hvis muligt)

### Reagenser

Brintperoxid ca 1 M (Ca. 3% opløsning)

$\text{FeSO}_4$  0,1 M (2,78 g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  + 1 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , koncentreret til 100 mL demineraliseret vand)

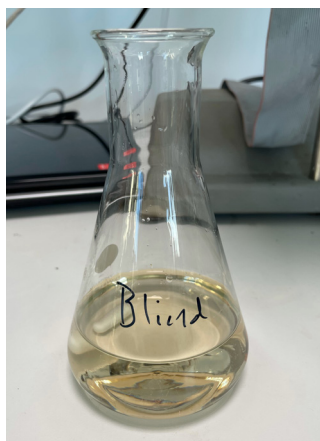
Blå frugtfarve

### Forurenede vand

Som model for forurenede vand bruges i dette forsøg blå frugtfarve.



*Forureningsopløsning*



*Blind opløsning*

FORSØG

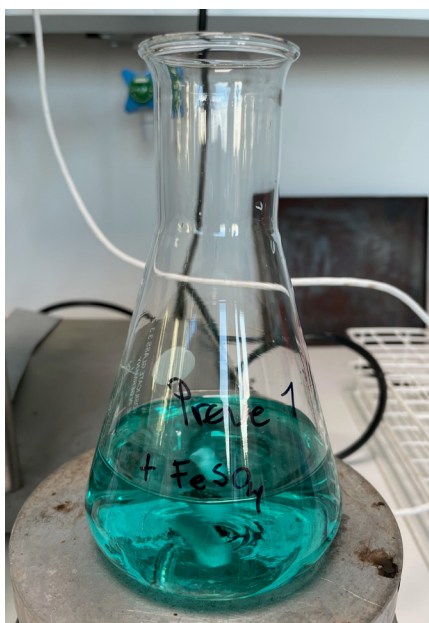
**Fremstil en opløsning** med blå frugtfarve 2 mL/ L demineraliseret vand (forureningsopløsning).

*Fremgangsmåde uden brug af spektrofotometer:*



Først fremstilles en "blind" opløsning uden forurening:  
75 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$  + 50 mL dem vand + 5 mL  $\text{FeSO}_4$ .  
Denne opløsning har en svag gulbrun farve. (Skyldes  $\text{Fe}^{3+}$ )

Dernæst fremstilles to testopløsninger i hver sin kolbe, hvor brintperoxid-reagensen og forureningsopløsningen blandes: 75 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$  opløsning + 50 mL forureningsopløsning



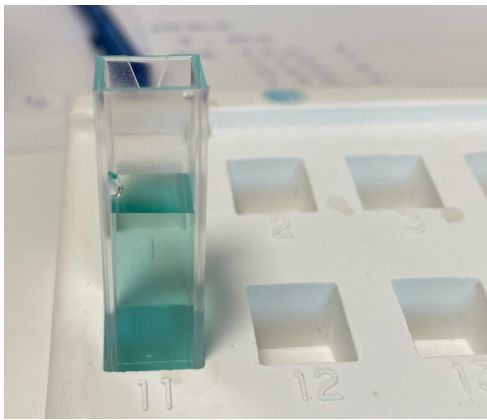
De to kolber sættes nu på hver sin omrører med en magnet. Blind-opløsningen skal ikke omrøres, men skal kun bruges som sammenligningsfarve.

Til den ene testopløsning tilsættes 5 mL  $\text{FeSO}_4$ -opløsning og stopuret startes. Rensning med Fentons processen er hermed startet, og den gradvise nedbrydning af det blå farvestof kan nu følges. Når farven er forsvundet og test-opløsningen har helt samme farve som blind-opløsningen, er forsøget færdigt. Bemærk om farven er forsvundet fra testopløsningen uden tilsætning af  $\text{FeSO}_4$ . Dette viser, at hydroxyl-radikalerne er meget kraftigere oxidanter end brintperoxid alene.

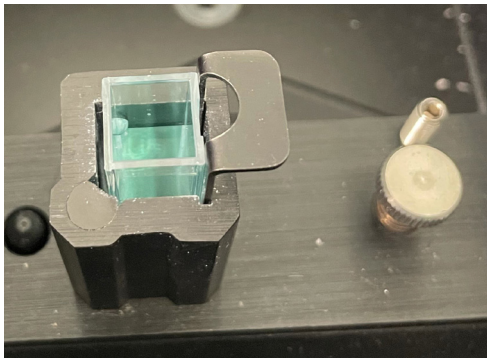
*De to forureningsopløsninger klar til tilsætning  
Prøve 1 på magnetomrøreren*

FORSØG

## Fremgangsmåde med brug af spektrofotometer:



Kuvette med prøvæske



Kuvette i spektrofotometer

Hvis spektrofotometeret kan scanne, scannes forureningsopløsningen fra 800 nm – 450 nm og målebølglængden for maks. absorbans bestemmes.

Indstil spektrofotometeret til at aflæse absorbans (Abs) ved den ønskede bølgelængde (ca. 630 nm). Der anvendes en glaskuvette eller en engangskuvette. Den skal kunne rumme ca. 3 mL

Nulstil spektrofotometeret på demineraliseret vand.

I kuvetten blandes 1,5 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 M + 1 mL forureningsopløsning, og absorbansen aflæses. Tilsæt 0,2 mL  $\text{FeSO}_4$  til test-opløsningen i kuvetten, mens den sidder i spektrofotometeret, så det blandes op. Aflæs umiddelbart efter absorbansen. Aflæs herefter absorbansen med 30 sek. interval indtil absorbansen ikke falder yderligere.

Absorbansen vil aldrig falde helt til 0, pga. tilstedeværelse af  $\text{Fe}^{3+}$ , der giver en svag gulbrun farve.

Mål evt. som sammenligning absorbansen på en prøve, hvor forureningsopløsningen er erstattet af demineraliseret vand.

Gentag hele forsøget uden tilsætning af  $\text{FeSO}_4$ .

## BAKTERIEL NEDBRYDNING I KÆRGÅRD

Trikllorethylen (TCE ;  $C_2HCl_3$ ), eller bare trikllorethen, er et af de klorerede opløsningsmidler, der er skrevet meget om i medierne i forbindelse med forureningen fra Grindstedværket. Stoffet er i kemisk forstand en organisk halogenforbindelse, hvor kloratomer har erstattet hydrogenatomer i en kulbrinte via en substitutionsreaktion.

De klorholdige opløsningsmidler som TCE, er gode til at opløse fx fedtstoffer og andre upolære stoffer, og er samtidigt ikke nær så brandbare som fx benzin eller andre alkaner/alkener. Derfor har de gennem tiden fundet vej til mange anvendelsesområder. Desværre opkoncentreres de klorerede opløsningsmidler i fedtholdigt væv, som fx findes i nervesystemet, hvor de på sigt kan medføre hjerneskader.

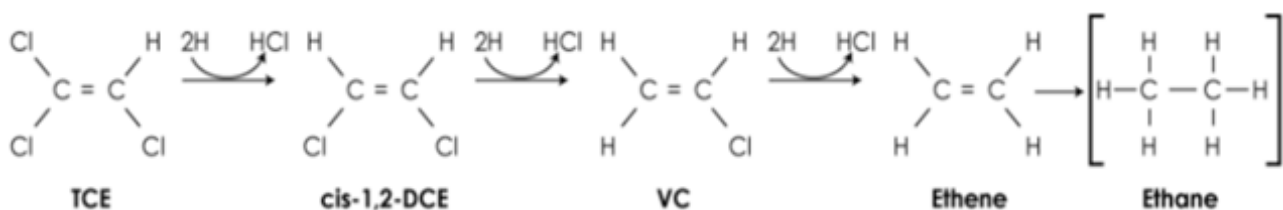
Du kan læse mere om organiske halogenforbindelser i en kemibog, fx *Basiskemi B* af Helge Mygind mfl. side 130-133. Her findes også opgaver til emnet.

Selvom stoffer som TCE kan nedbrydes ved kemisk oxidation, sker dette kun i mindre grad, fordi klorerede opløsningsmidler er meget lidt opløselige i vand og derfor primært findes i en såkaldt fri væskefase, der ikke er blandbar med vand.

Fortsættes >>



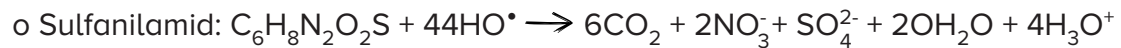
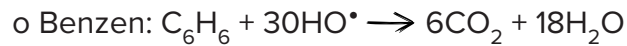
Derfor satser man på en bakteriel nedbrydning af disse stoffer, først ved at fremme den naturligt forekommende bakterielle nedbrydning af bl.a. de klorerede opløsningsmidler og sidenhen ved tilsætning af specifikke bakterier (Dehalococcoides) for at fjerne især vinylklorid (VC), som de klorerede opløsningsmidler nedbrydes til. Naturlige bakterier kan ved såkaldt reduktiv deklorering nedbryde klorerede opløsningsmidler ved at udskifte kloratomerne med hydrogen, men kun indtil der er et kloratom tilbage (vinylklorid). Her går den naturlige proces i stå, da bakterierne mangler generne, der koder for de enzymer, der skal substituere det sidste kloratom. Vinylklorid er et giftigere stof end TCE, og den endelige nedbrydning til uskadeligt ethen og ethan kræver tilstedeværelsen af bakterier af familien Dehalococcoides. Disse er ikke naturligt til stede i Kærgård i høj nok population, så de tilsættes sammen med næringsstof til undergrunden for at nå helt i mål med den biologiske efterpolering. Den reduktive deklorering er opsummeret i Figur 1:



### Opgave 3:

TCE kan også nedbrydes kemisk ved reaktion med hydroxyl-radikaler produceret ved Fentons processen. Prøv selv at opskrive den afstemte reaktion for fuldstændig nedbrydning af TCE til karbondioxid og klorid. Hvor meget hydrogenperoxid (i ton) skal der støkiometrisk bruges til at fjerne 1 ton TCE? Den tilladte grænseværdi for TCE i vand er ca. 1 µg/L. Hvor mange liter vand kan 1 kg TCE forurene?

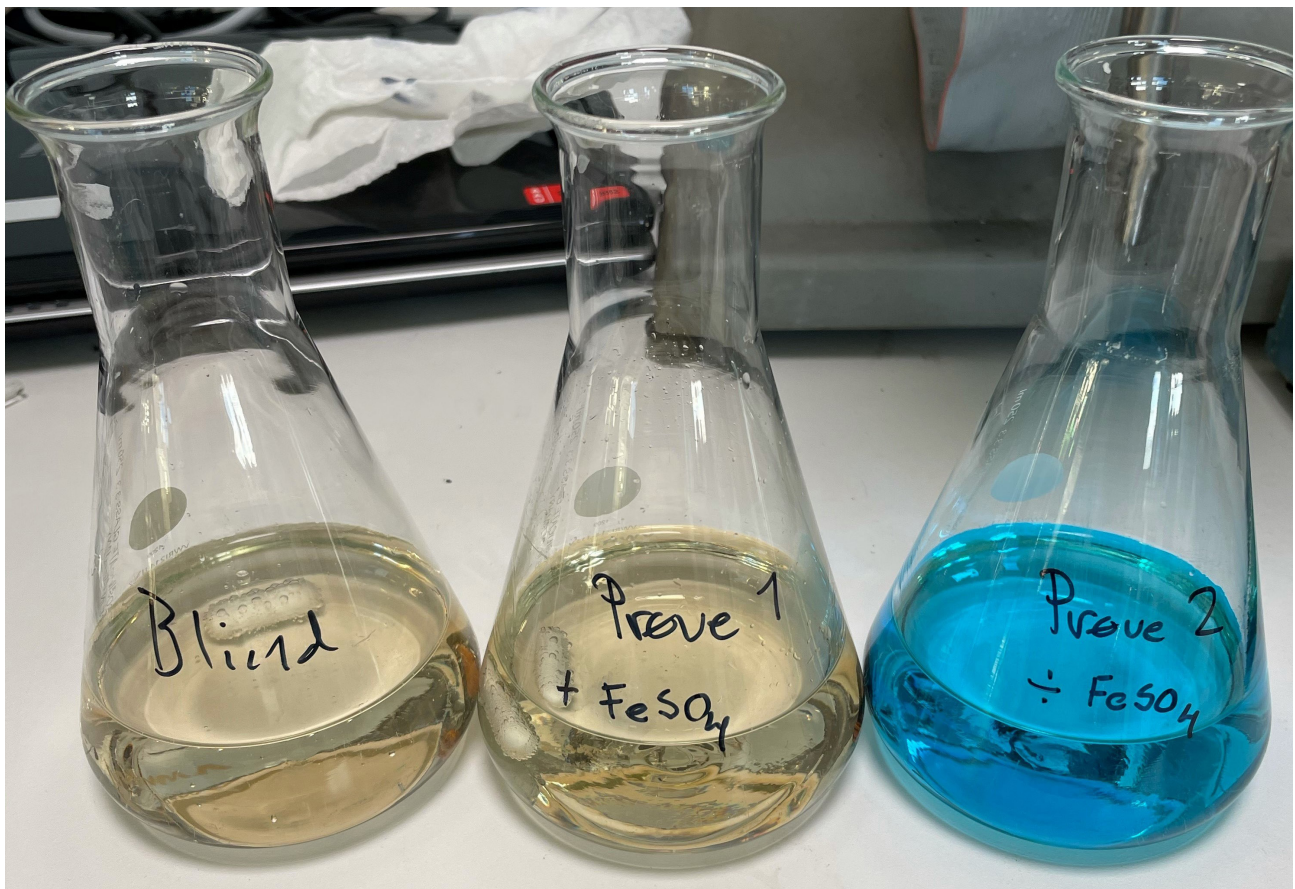
OPGAVE

**FACIT TIL OPGAVERNE:****Løsning opgave 1:****Løsning opgave 2:**

o 5,1 ton  $\text{H}_2\text{O}_2$  ; 12,9m<sup>3</sup> 35w%  $\text{H}_2\text{O}_2$  ~ 13 palletanke

**Løsning opgave 3:**

o  $\text{C}_2\text{HCl}_3 + 6\text{HO}^\bullet + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{Cl}^- + 3\text{H}_3\text{O}^+$  ; 1,55 ton  $\text{H}_2\text{O}_2$  ; 1 mia. liter vand



De tre Erlenmeyerflasker med opløsningerne efter forsøget.