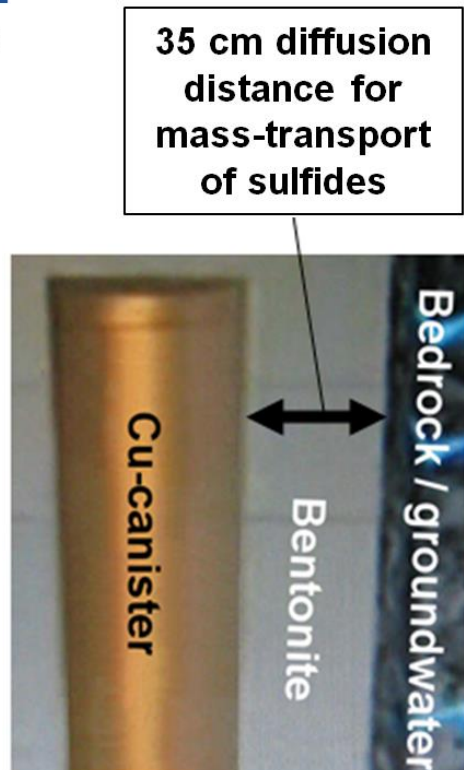


**MKG webbseminarium 9 juni 2020:
“Kärnbränsleförvaret, kopparkorrosion och
LOT-upptagets betydelse”**

VARFÖR FUNGERAR INTE KOPPAR SOM KAPSELMATERIAL I KÄRNBRÄNSLEFÖRVARET?

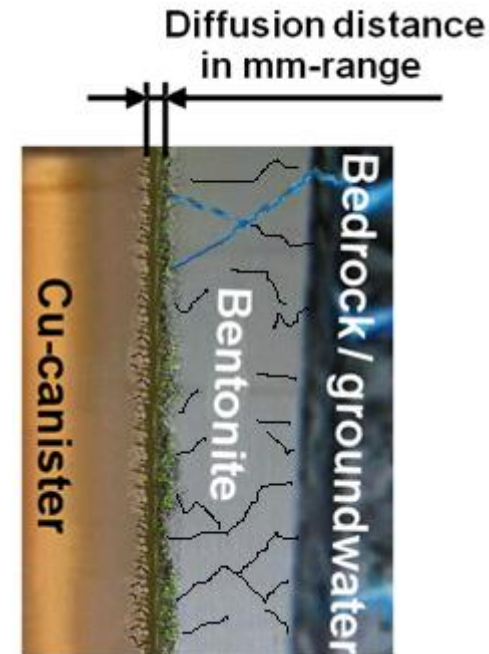
Tekn. Dr. Peter Szakálos, KTH

SKB's KBS-3 modell:



KBS-3 är en idealiserad modell där kopparkapseln är "skyddad" mot svavelsalter, vilket är det enda som förväntas angripa kopparmetallen i den syrgasfria miljön enligt SKB. "Skyddet" består av sprickfri och tät bentonitlera (kattsand).

Verkligheten:



Verkligheten är mycket värre, koppar reagerar inte bara med svavelsalter utan även med klor-, karbonat-, samt hydroxidsalter och med vattenmolekylerna som grundvattnet består av.

Reaktionen med vatten möjliggör lokala korrosionsprocesser såsom spänningskorrosion, gropfrätning samt väteförsprödning.

Dessutom kommer leran inte att vara sprickfri i Forsmarks slutförvarsmiljö vilket ytterligare ökar kopparkorrosionshastigheten.

”Saunaeffekten”; upphettad kopparkapsel i kall vattenläckande gruvmiljö

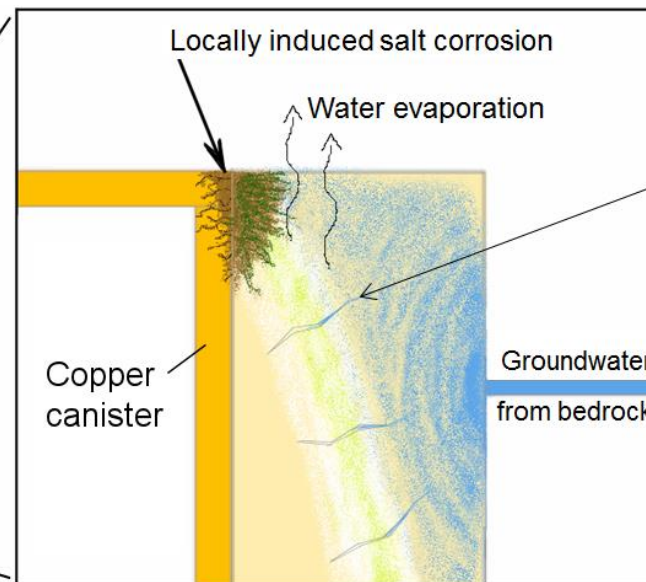
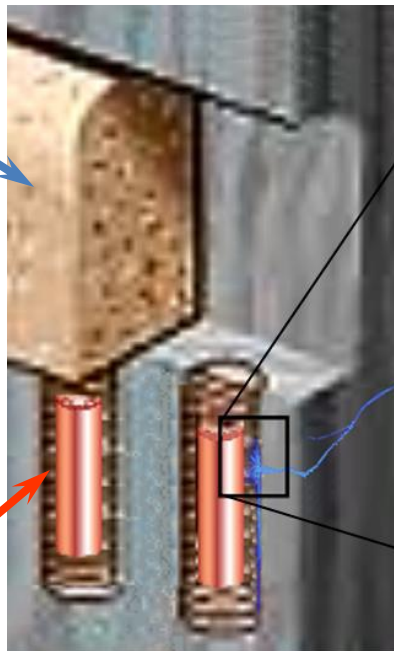
Varje kapsel utvecklar 1700W värme pga kärnavfalllets radioaktivitet

Med normalt långsamt inflöde av grundvatten i Forsmark så kommer ca 16 kg salt att anrikas per kapselhål per år vilket i sig är tillräckligt för att lokalt kraftig korrosion skall uppstå, detta inkluderar även spänningskorrosion (sprickbildning)

12-15°C

Det finns en termodynamisk kraft som vill driva fukt och ånga från de varma deponeringshålen till den kallare tunneln, därmed är det omöjligt att undvika olika grader av saltindunstning

50-100°C



Cracks and channels in the buffer due to heating, dehydration, mineralisation and salt embrittlement

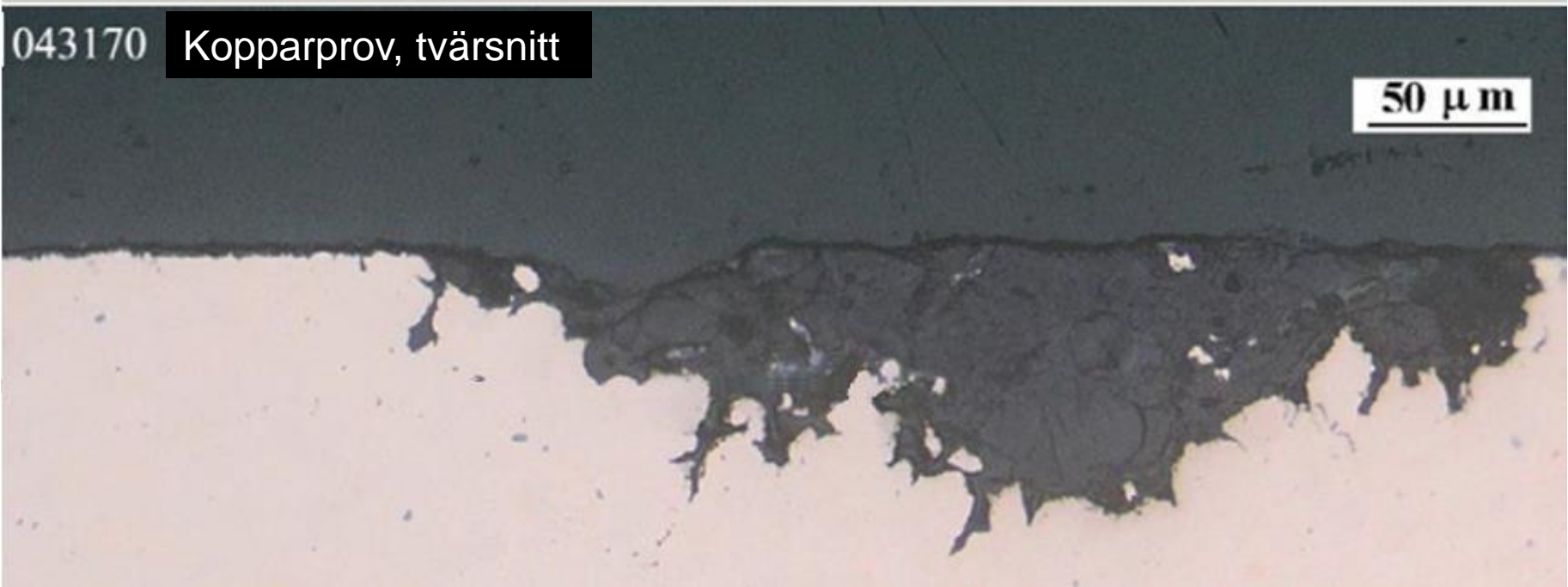
Zone with salt precipitation in the bentonite

Endast ett fåtal metaller klarar indunstningskorrosion med klor- och svavelsalter vid förhöjda temperaturer. Inom industrin används palladiumlegerat titan eller tantal-legeringar för sådana miljöer, absolut inte koppar!

***FEBEX: Schweiziskt syrgasfritt slutförvarsförsök under
18 år med olika metallprover inbäddade i bentonitlera
(Jfr. SKB:s LOT-försök eller Prototypförvaret)***

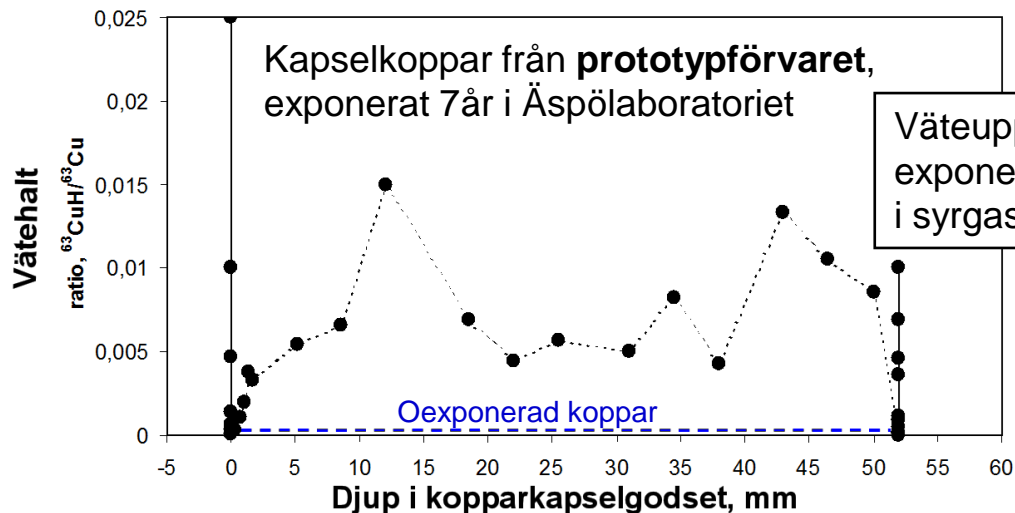
043170 Kopparprov, tvärsnitt

50 μ m



Testet visade att olegerad SKB-koppar var sämst i klassen! Gropfrätning med korngränsangrepp uppstod på hela kopparytan. Enligt SKB och deras anlidade konsulter skall detta inte vara möjligt i en syrgasfri miljö. Sanningen är att frånvaron av löst syrgas inte alls skyddar mot lokala korrosionsprocesser såsom gropfrätning och spänningskorrosion eftersom koppar då i stället reagerar direkt med vattenmolekyler och/eller vätesulfid.

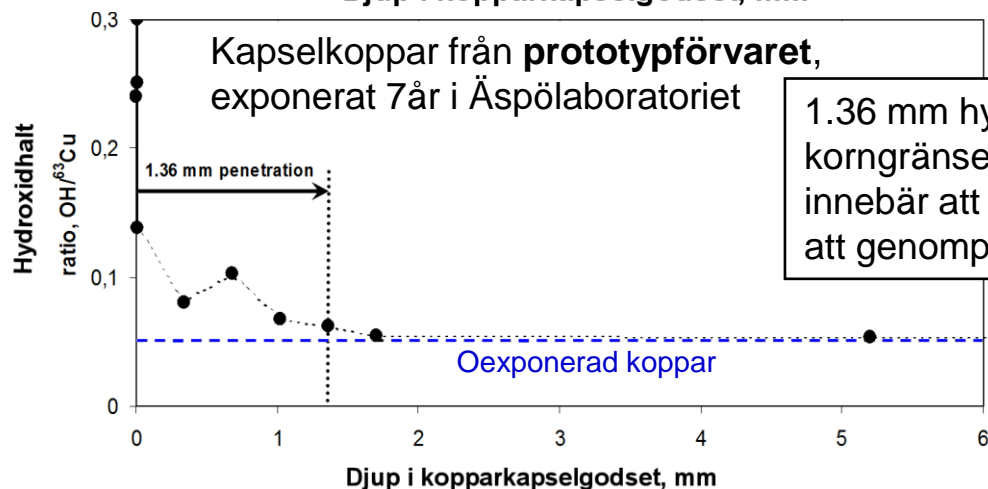
Vattenmolekyler reagerar med kapselkoppar: Vätefösprödning samt korngränskorrosion



Både H och OH halter ökar inuti kopparmetallen,
detta bekräftas av Ab-Initio beräkningar:



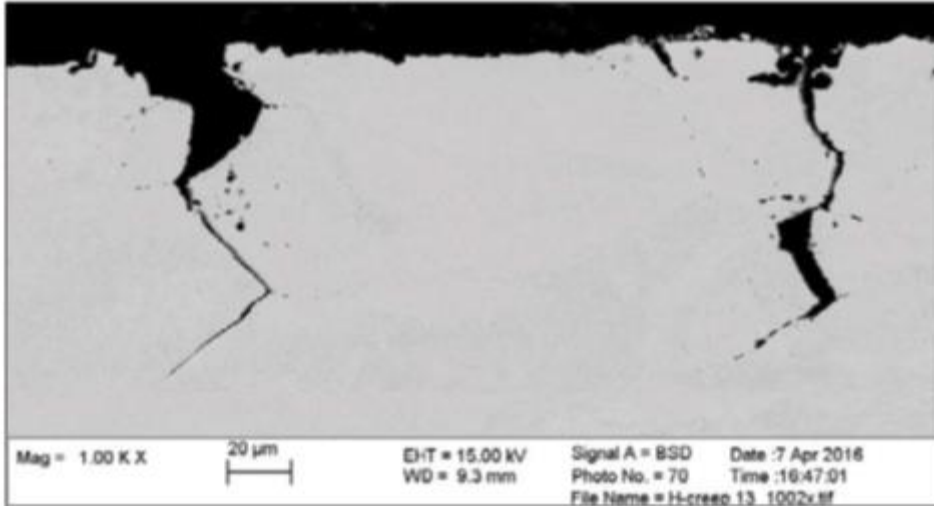
Reaktionen sker med ett vätejämavtryck som är ca
1 miljon ggr högre än vad SKB räknar med: 1 mbar i
rent vatten. (Bekräftat av Los Alamos National Lab.)



1.36 mm hydroxid-penetration i koppars-
korngränserna under 7 års exponering
innebär att hela kapseln (50mm) kommer
att genompenetreras på några hundra år.

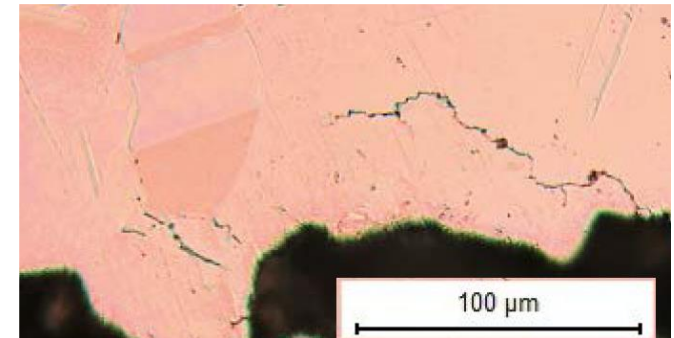
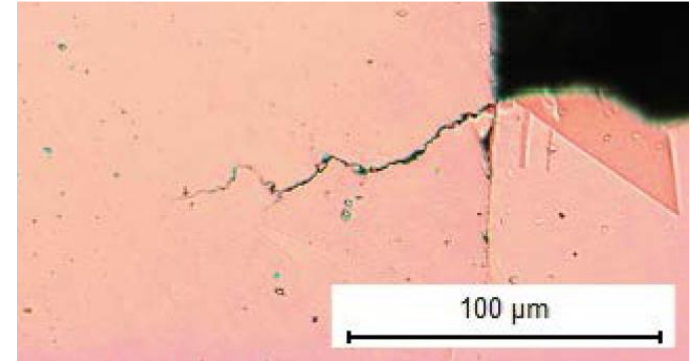
**Gunnar Hultquist (KTH) visade att
kopparkapseln väteladdas i slut-
förvarsmiljön. Dvs. kapslarna kommer
drabbas av vätefösprödning, vilket är
oacceptabelt för KBS-3 modellen.**

Bieffekter av att koppar reagerar med vatten: Väteförsprödning samt Spänningskorrosion



Bilden visar väteinducerad sprickbildning redan efter 13 timmars försök i SKB-koppar (!).

REF: SKB R-17-17 "In situ hydrogen charging of OFP copper during creep"

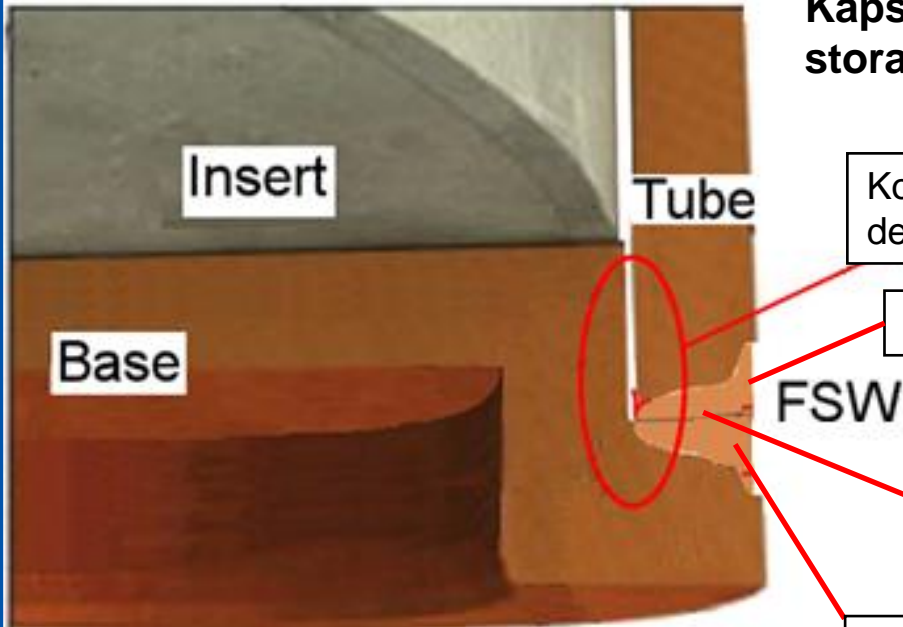


Spänningskorrosion i kapselmaterialet exponerat i Äspö bergslaboratorium i ca 9 år, MiniCan-försöken.

Båda dessa processer skapar sprickor i olegerad SKB-koppar vilket är kopplat till en reaktion med vattenmolekyler där vätet tränger in i kapselmaterialet. Båda sprickprocesserna är mycket snabba när de väl initierats. I slutförvarssammanhang måste man anse att dessa processer förstör kapslarna momentant (när de väl har startat).

Kopparkapselns svagaste punkt: Friktionsomrörningssvetsen (FSW)

Kapselns lock och botten är svetsad till det stora kopparröret med Friction Stir Welding



Korrosion och spänningskorrosion från insidan i den vätskefyllda spalten pga radiolysprodukter

Spänningskorrosion från utsidan pga sulfid

Väteförspädning/vätesjuka. I svetsfogens mitt ansamlas alltid lite oxider som reagerar med väteatomerna i kopparmetallen under bildning av gasporer.

Störst last och lägst krypduktilitet ger krypsprickor i FSW

Vätesjuka, dvs håligheter i koppar. I FSW-fogens mitt ansamlas alltid lite oxider som reagerar med väteatomerna i kopparmetallen under bildning av gasporer. Gasporerna växer ihop till sprickor. Även med skyddsgas vid svetsning bildas lite oxider, dvs i princip omöjligt att erhålla helt oxidfria FSW-fogar.

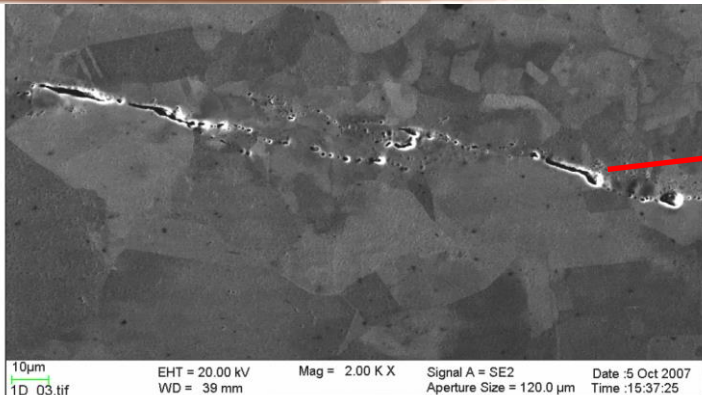


Figure 14. Voids in sample 1D.

Korrosion på olika metallföremål under 333 år på regalskeppet Vasa

Lersediment med syrgasfritt bräckt vatten, temp. på 30 m djup: 4-6°C.
Jämför med slutförvaret under de första 1000 åren: 50°-90°C (!)



1 öre kopparmynt,
1627 Säter.
Fyndplats: trossdäck.
19,9 gram kvar av 29
gram efter 333 år.
Foto: Vasamuseet

Järn:	44 $\mu\text{m}/\text{år}$ (15 mm/333 år)
Olegerad Koppar:	1 $\mu\text{m}/\text{år}$ (0.33 mm/333 år)
Sn-leg. Koppar (brons):	7 nm/år (0.002 mm/333 år)

Tennlegerad koppar korroderar 100-1000 ggr långsammare än olegerad koppar!

Generella slutsatser



Bronskanon från tidigt 1600-tal som legat nerbäddad i östersjöns lerbotten. Bärgat från regalskeppet Kronan utanför Öland.

Det råder koncensus om att vi kommer att behöva ett geologiskt slutförvar, men det är inte brådskande då CLAB i Oskarshamn är mycket säkert.

Det råder koncensus bland nationella och internationella (oberoende) korrosionsforskare att olegerad koppar inte är ett lämpligt materialval till slutförvaret (KBS-3).

SKB-koppar reagerar både med vattenmolekyler och olika salter vilket resulterar i en oskyddande ”passivfilm” som tillåter både gropfrätning, spänningskorrosion samt väteförsprödning, medan t.ex. brons bildar en inert passivfilm som skyddar den underliggande metallen.

KBS-3 har möjlighet att bli tillräckligt säkert om en korrosionsresistent metall eller legering används som ytterhölje (exempelvis en brons- eller titanlegering)

EU bör aktivt samordna och godkänna ett slutförvar då alla länder inte har goda geologiska förutsättningar för ett säkerhet slutförvar och det räcker att ett land gör ett dåligt jobb för att det på sikt kommer att drabba flera länder (tex. hela Östersjöregionen)