

# Försurning

24 januari 2023



Johan Ahlström, Havs- och vattenmyndigheten

Havs  
och Vatten  
myndigheten

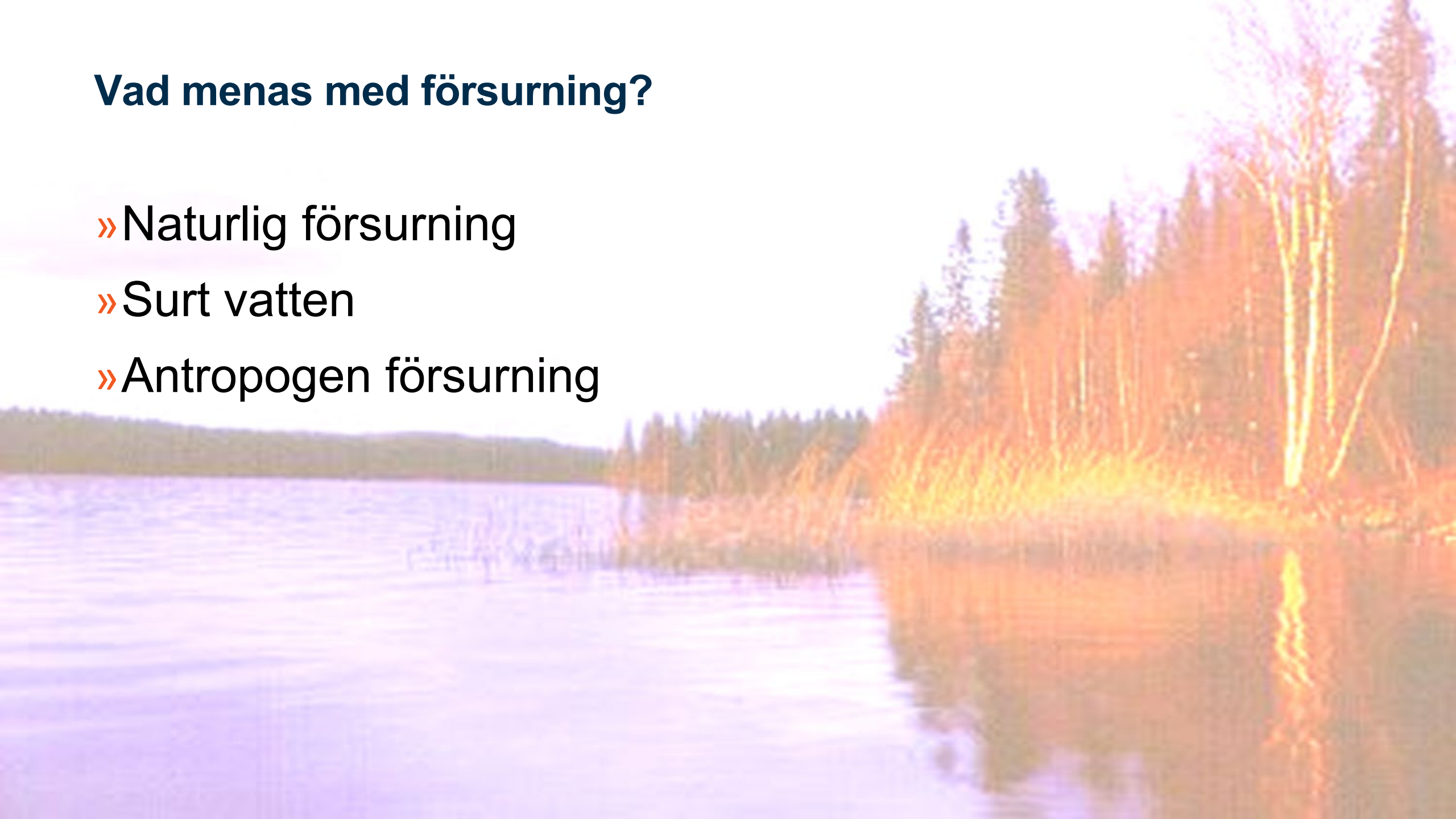
# Detta kommer jag att avhandla!

- » Vad menas med försurning?
- » Varför har vi försurning?
- » Försurningsteori och modeller
- » Återhämtning och nuläge



# Vad menas med försurning?

- » Naturlig försurning
- » Surt vatten
- » Antropogen försurning



## Naturlig försurning

### Rekonstruering av pH med hjälp av kiselalger i sjösediment

#### 1) Kalkning

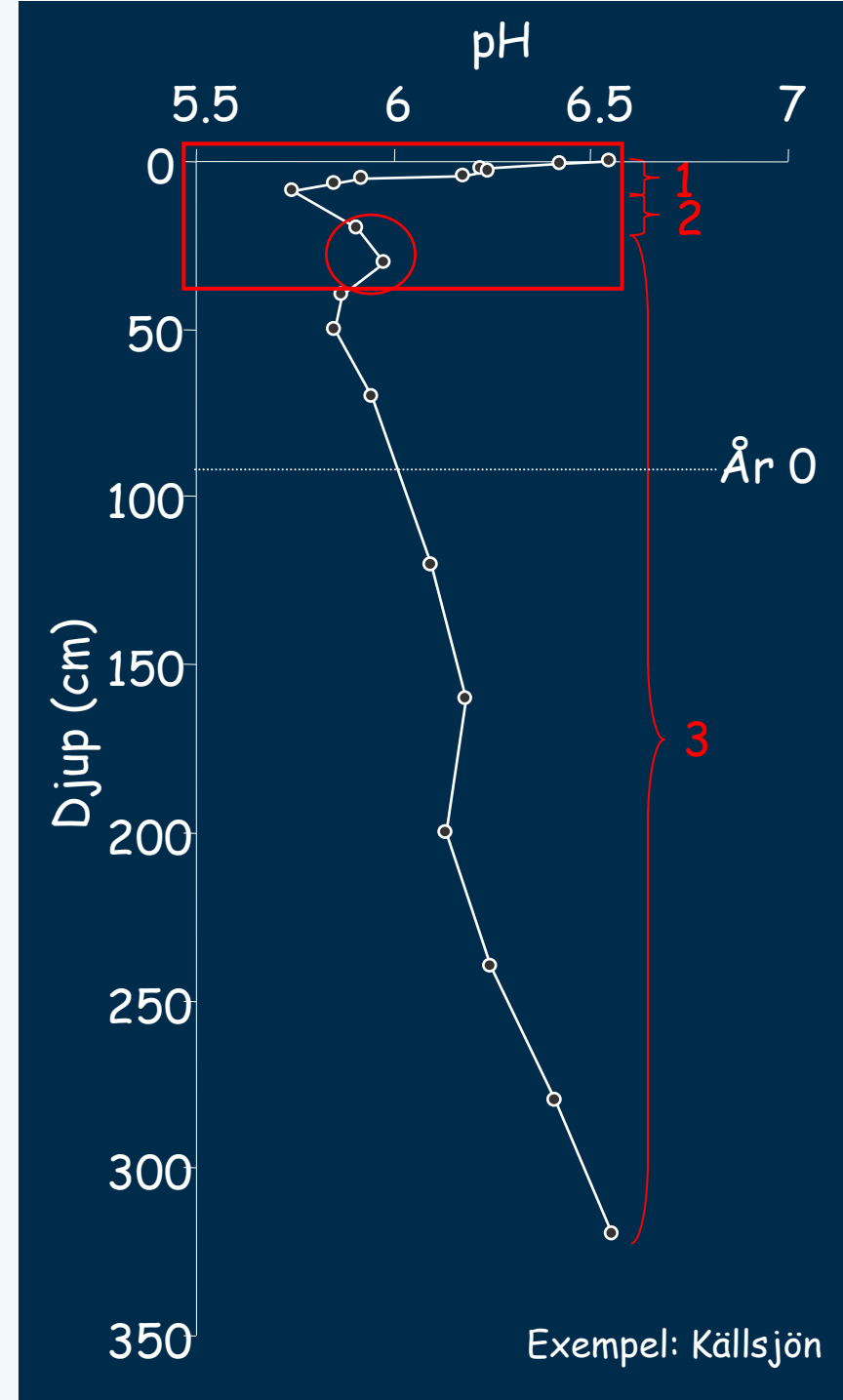
pH stiger till följd av kalkning

#### 2) Antropogen försurning

pH sjunker snabbt till följd av surt nedfall

#### 3) Naturlig försurning

pH sjunker sakta till följd av naturliga processer

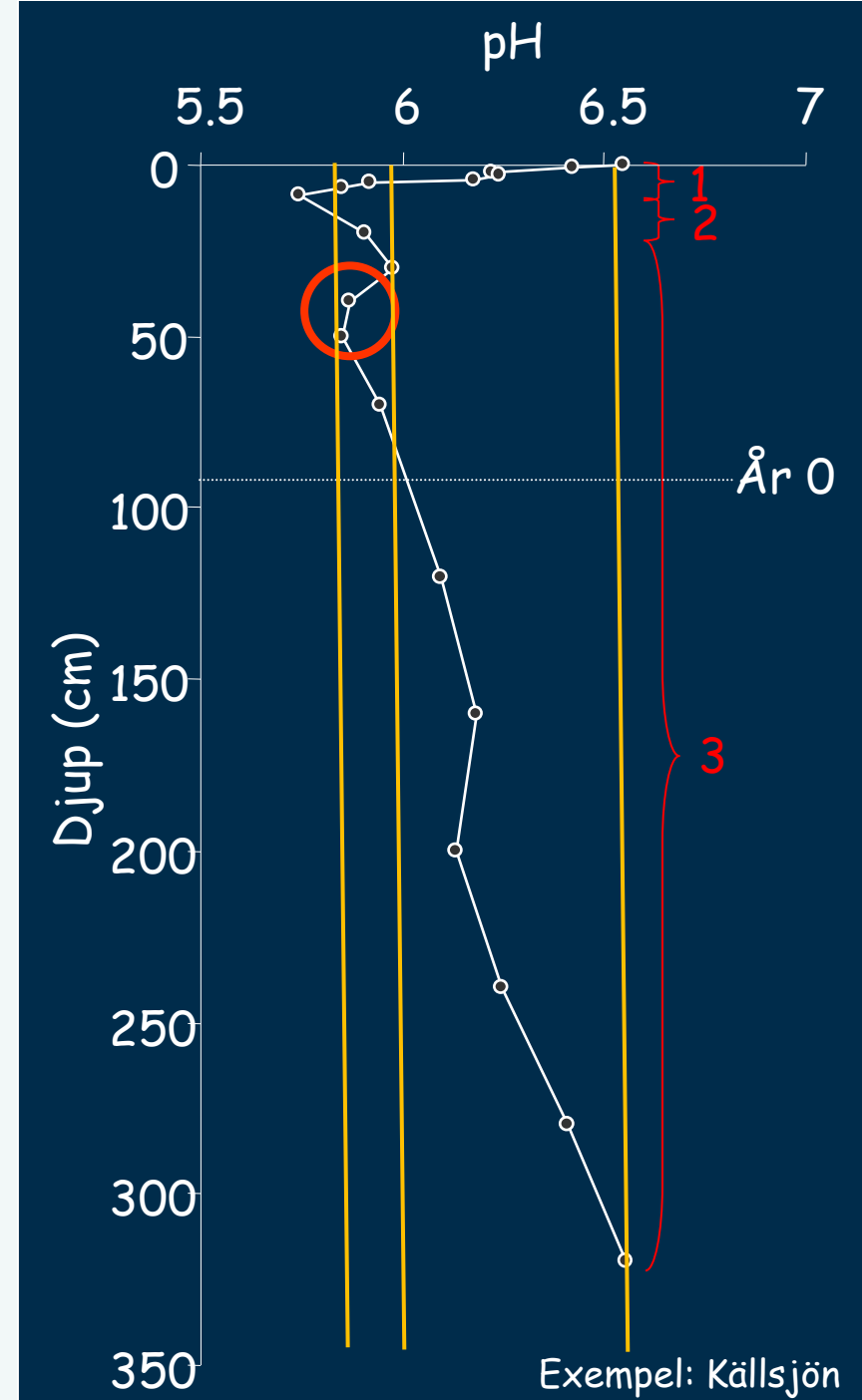




# Naturlig försurning kan leda till surt vatten

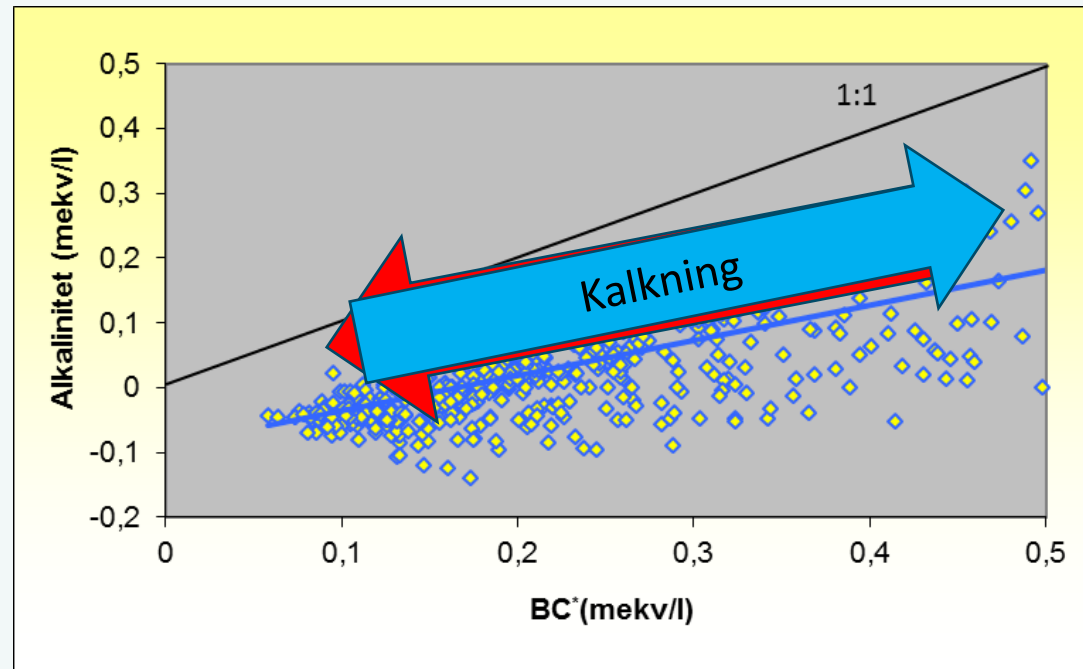
Surt vatten behöver således  
inte vara orsakat av  
antropogen försurning!

- **Låg buffringsförmåga**
- **Organiska syror**
- **Högt koldioxidtryck**
- **Geologiskt sulfat**
- **Vad är referens-pH (naturligt-pH)?**
- **$\Delta\text{pH} = \text{Dagens pH} - \text{referens-pH}$**



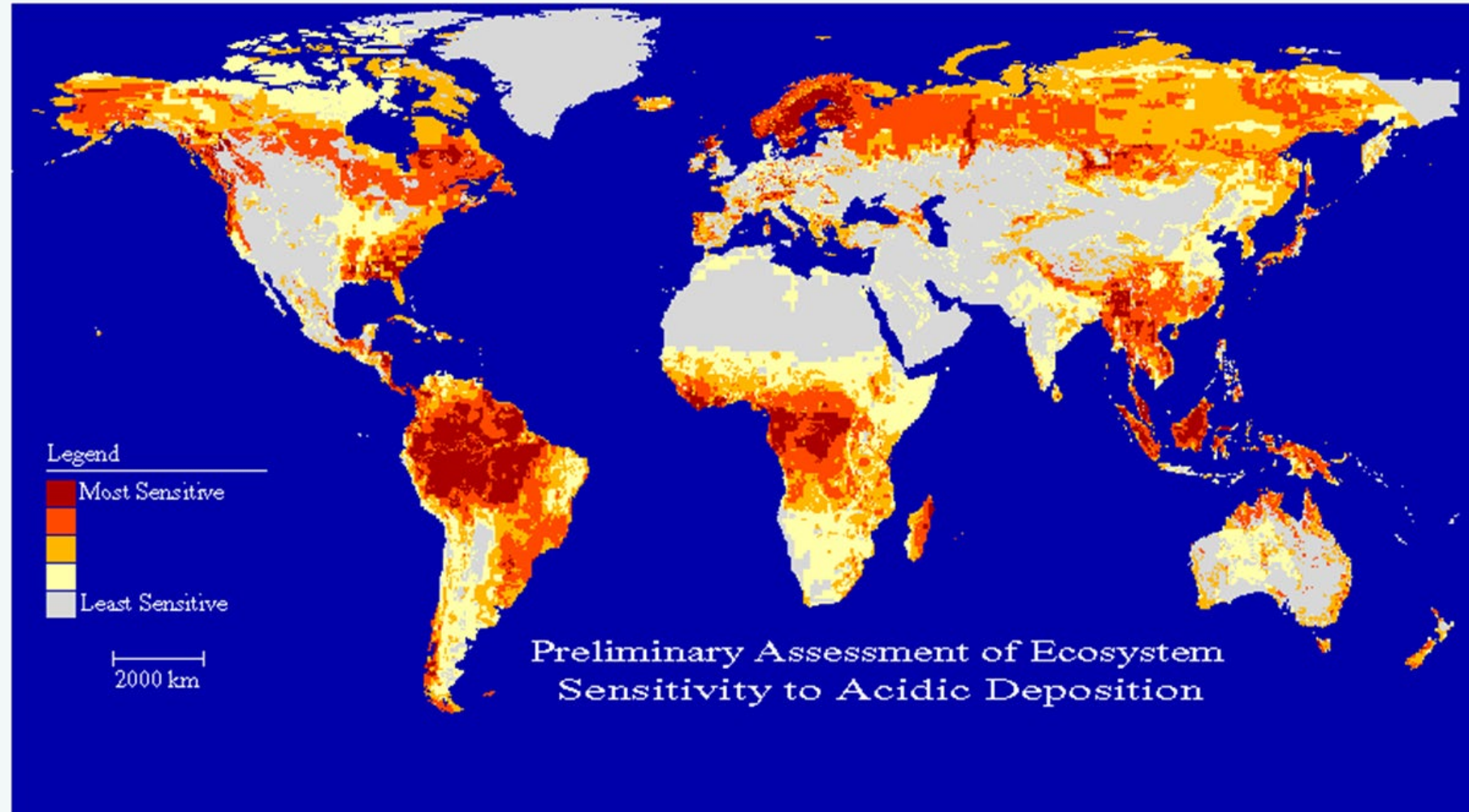
## Surt vatten – låg buffringsförmåga

- » Buffringsförmågan (ofta mätt som alkalinitet) genereras vid vittringen av markmineral
- » Baskatjoner ( $BC^*$ ) frigörs vid vittring i samma mängd som alkalinitet och är ett mått på den alkalinitet som vattnet skulle ha om inga syror tillkommer (OBS förenklat)
- » Låg baskatjonhalt indikerar liten förmåga att neutralisera syror, dvs ett försurningskänsligt vatten
- » Baskatjoner = kalcium, magnesium, natrium och kalium (\*=ej marina)



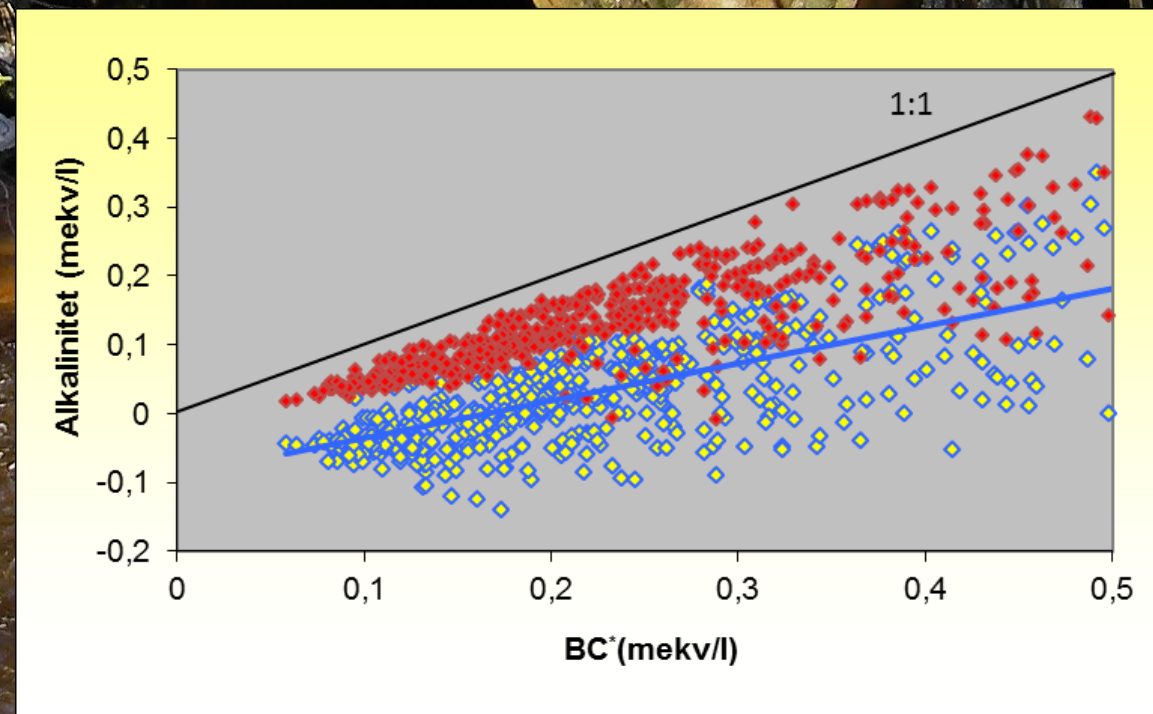
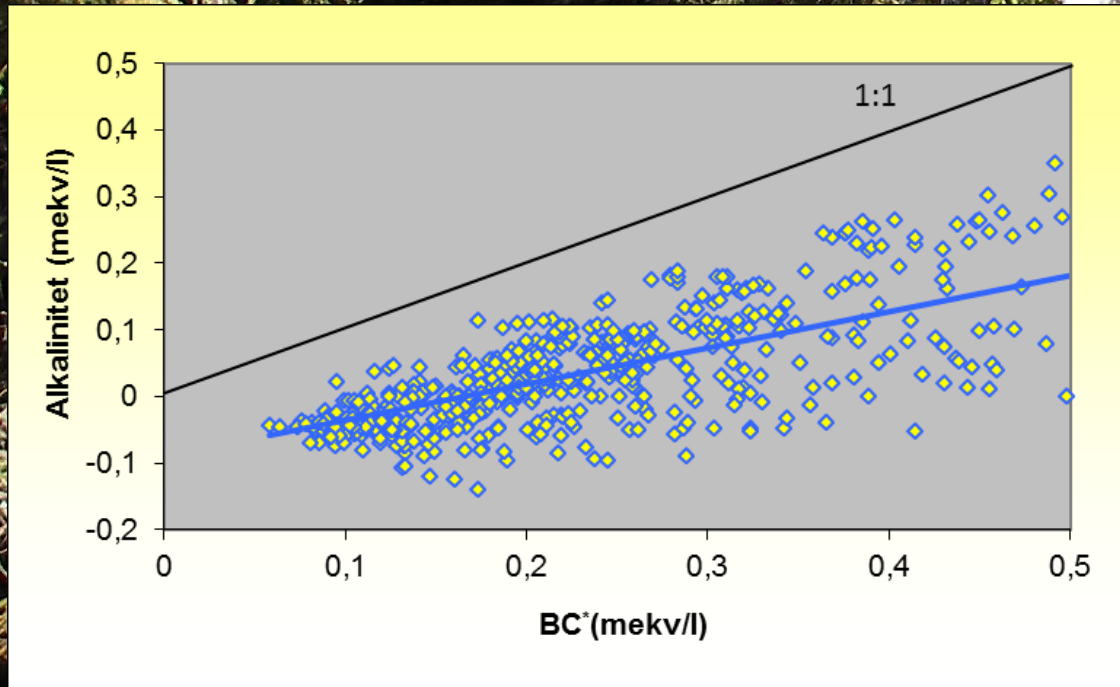
# Känsliga Sverige

- » Svårvittrad berggrund
- » Kallt klimat





# Surt vatten – organiska syror







## Surt vatten – organiska syror

Mängden organiska syror analyseras indirekt i form av TOC (Total Organic Carbon), Absorbans eller färgtal

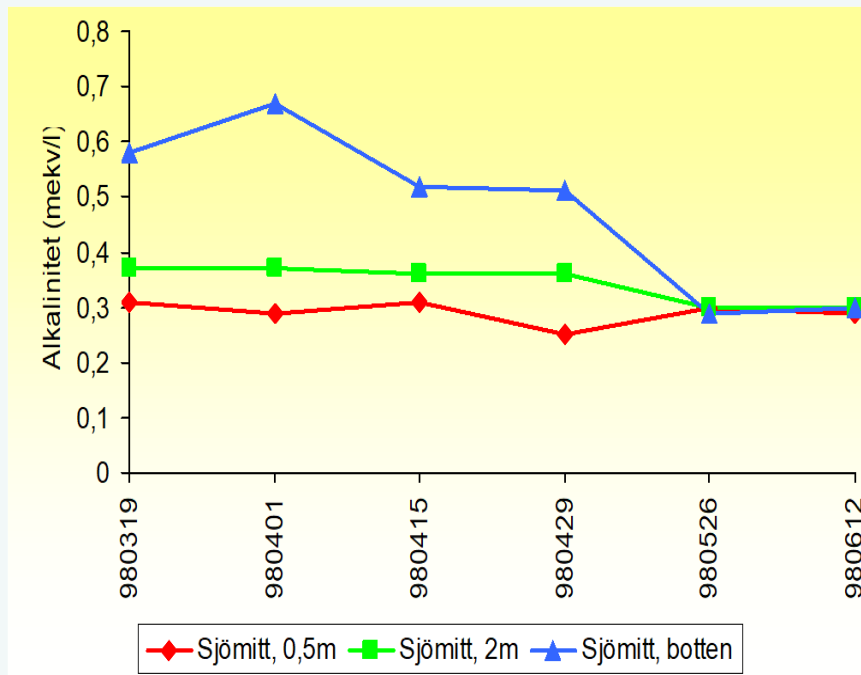
- » Färgtal 100 mg/l motsvarar ungefär en förbrukning av alkalinitet på 0,05 mekv/l
- » Färgtal 200 mg/l: 0,10 mekv/l
- » Färgtal 300 mg/l: 0,15 mekv/l



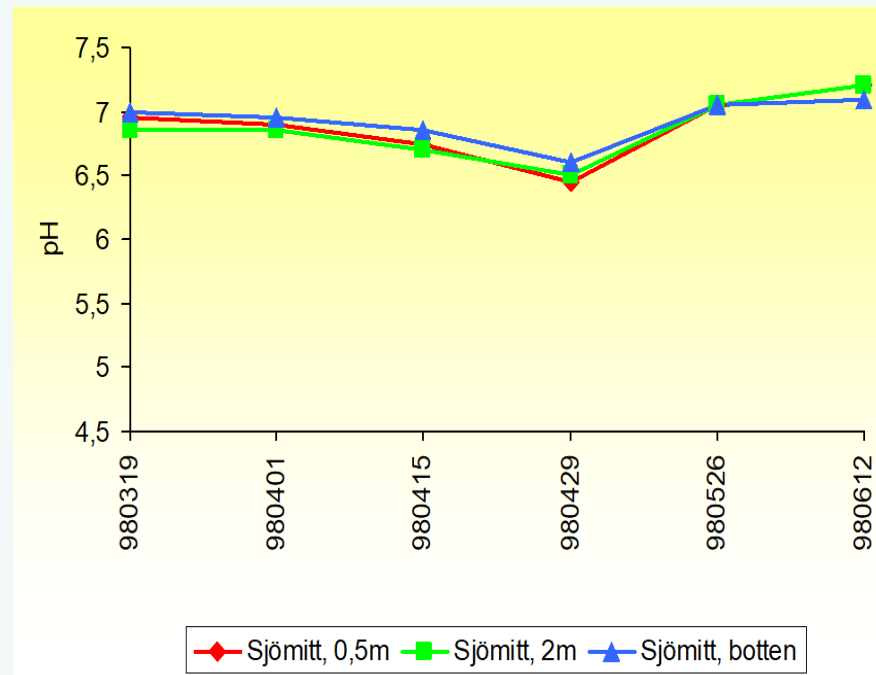
# Surt vatten - koldioxidtryck

Förhöjt partialtryck av koldioxid sänker pH, men inte alkaliniteten

## Alkalinitet



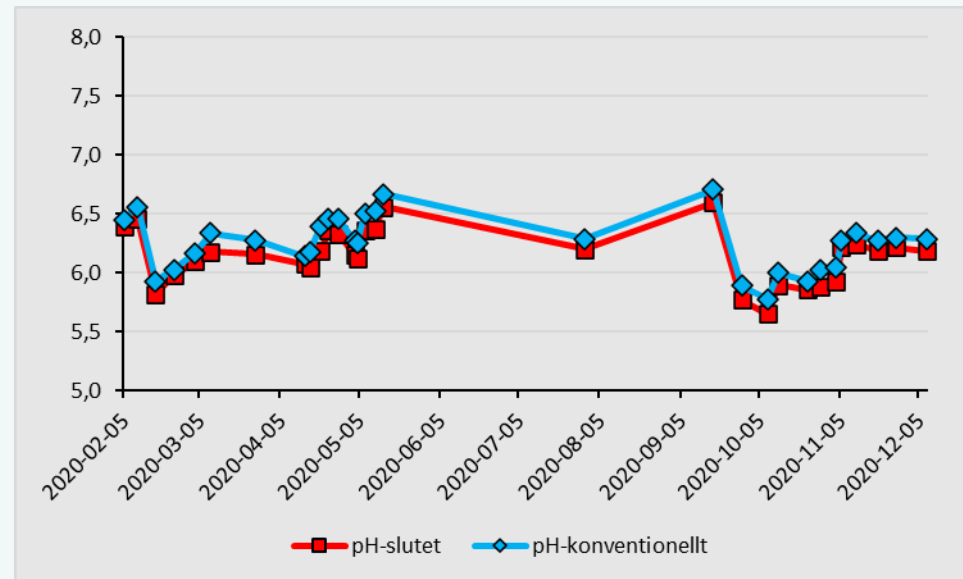
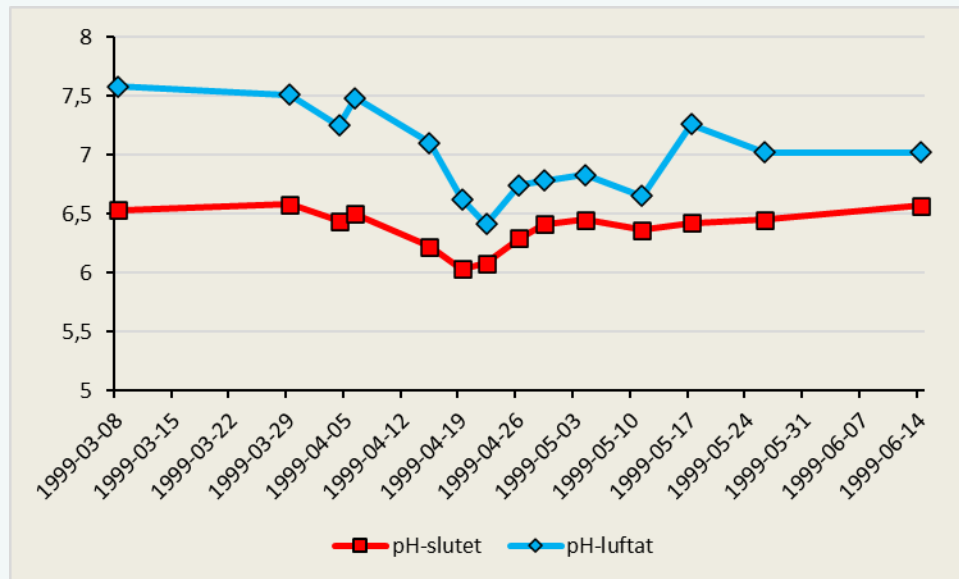
## pH



# Surt vatten - koldioxidtryck

Förhöjt partialtryck av koldioxid sänker pH, men inte alkaliniteten

- » Luftat pH visar effekten av förhöjt partialtryck av koldioxid på pH
- » Även under höglöden i vattendrag ses en viss effekt av koldioxid
- » Konventionell hantering på lab innebär en okontrollerad luftning som höjer pH ▼



## Surt vatten – geologiskt sulfat

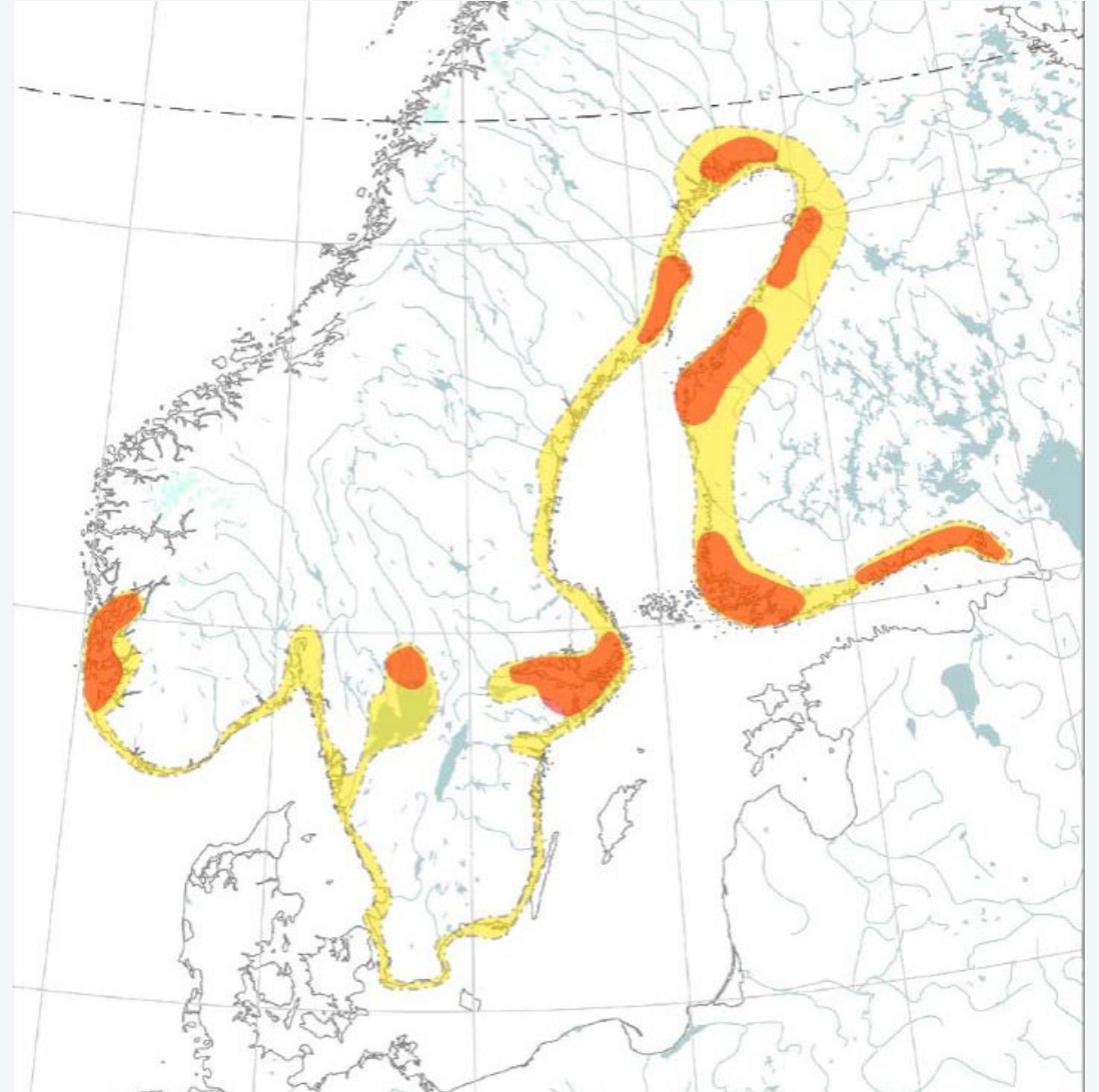
- » Geologiskt sulfat kan finnas i berggrunden eller i sediment – frigörs vid oxidation
- » Störst problem i marker som tidigare legat under havsytan (svartmocka)
- » Antropogen försurning i samband med åtgärder som sänker grundvattennivån





# Surt vatten – geologiskt sulfat

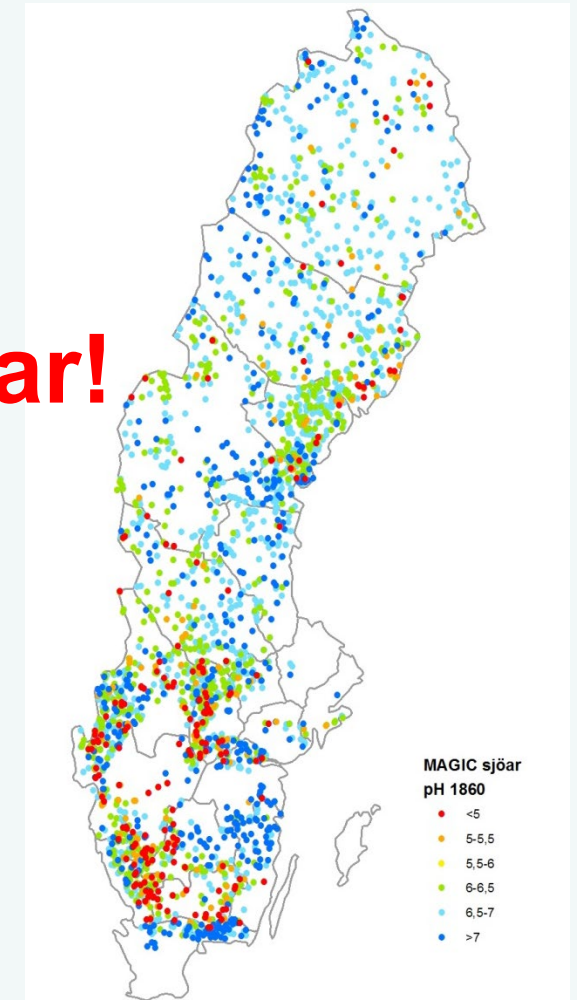
- » Norrbottenskusten
- » Västerbottenskusten
- » Mälardalen



# Naturligt sura sjöar

- » Tunna eller urlakade jordar med svårvittrade mineral, många av dessa är försurningskänsliga och försurade
- » Höga humushalter, behöver inte vara försurningskänsliga

**Vi kalkar naturligt sura sjöar!**



# Naturlig försurning

En långsam process sedan förra istiden. Naturlig försurning kan leda till sura vatten

## Surt vatten

Sura vatten behöver inte vara försurade. Däremot är de ofta känsliga för antropogen försurning

## Antropogen\* försurning

Minskat pH orsakat av människan

\*Antropogen = Av människan skapat (från grekiskans "anthropos" och "genese")



# Varför har vi antropogen försurning?

## Svaveldioxid och kväveoxider

Utsläpp, trender och nedfall

## Avgång av ammoniak

## Skogstillväxt

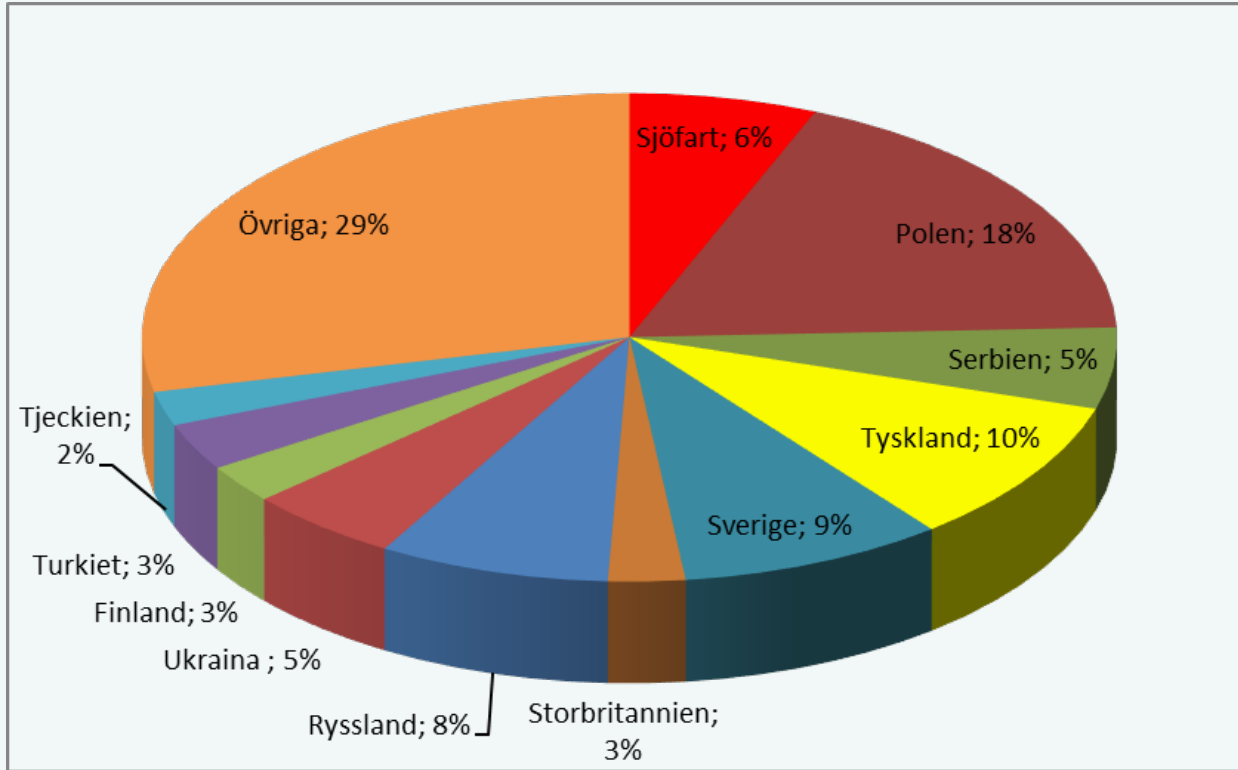
Teori, trender och effekter

## Brunifiering

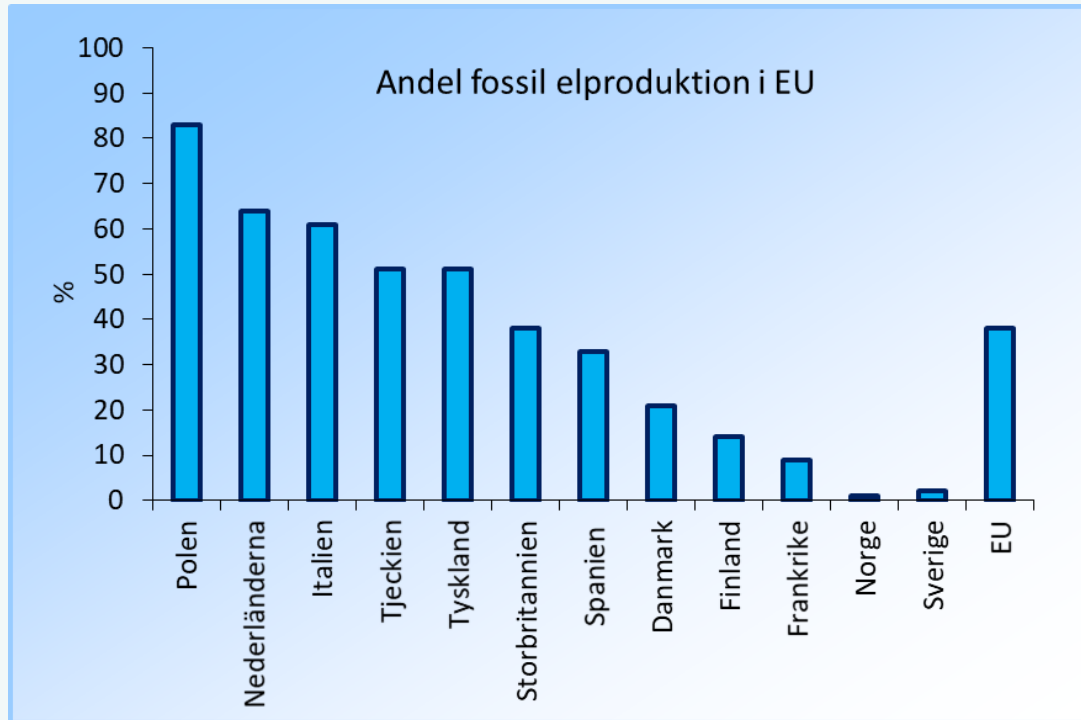
Orsaker, trender och effekter



# Svaveldioxid – 90 % från utlandet



# Svaveldioxid – elproduktion med fossila bränslen

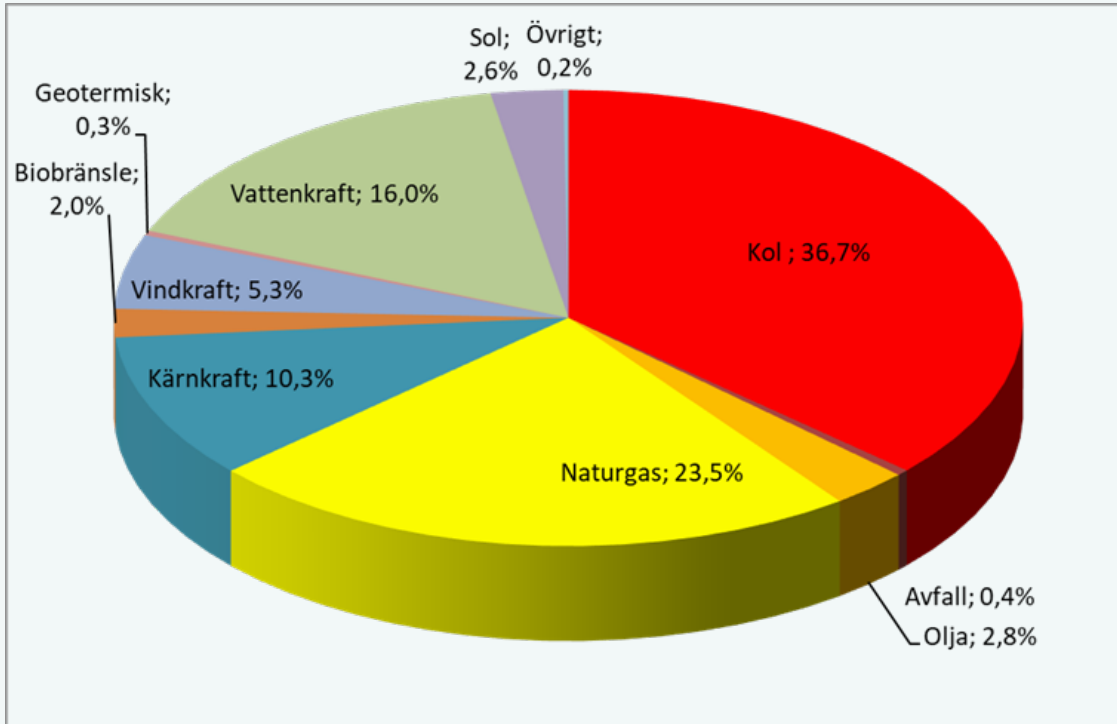


**Inom EU: drygt en tredjedel (2021)**

**Fossila bränslen  
(kol, naturgas, olja)  
innehåller en viss  
del svavel**



# Svaveldioxid – elproduktion med fossila bränslen

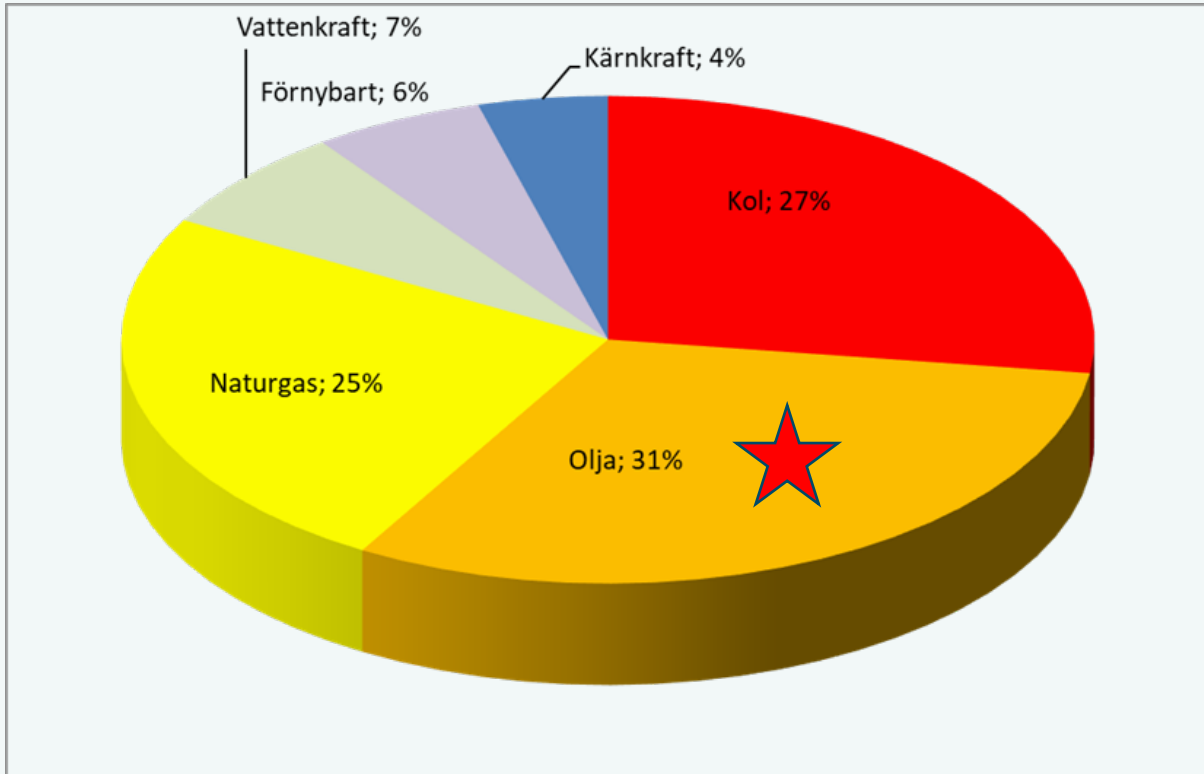


**Globalt: 63% (2019)**





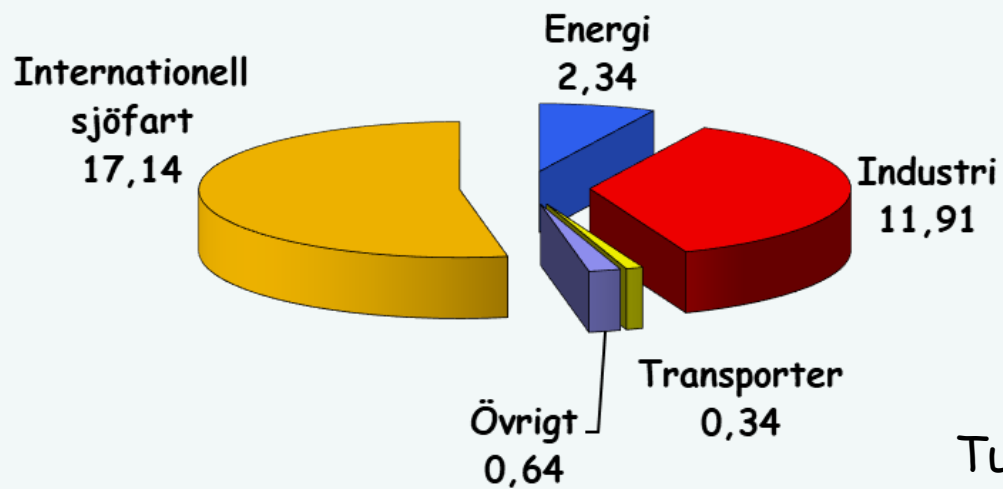
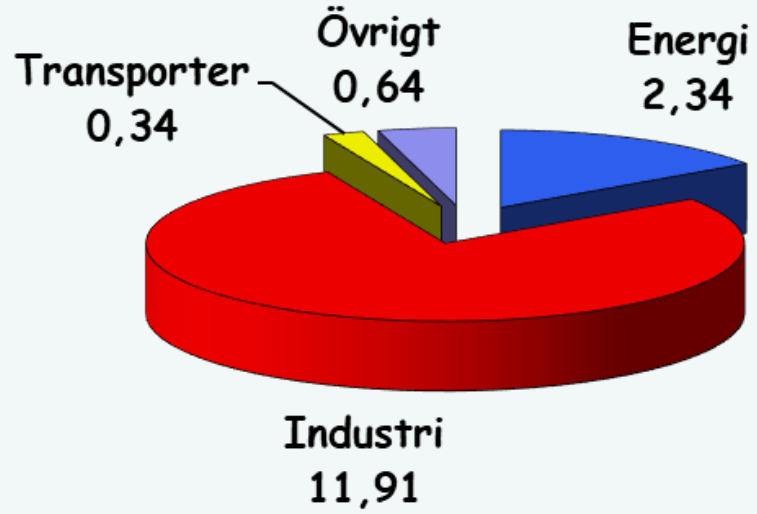
# Svaveldioxid – energiproduktion med fossila bränslen



**Globalt: 83% (2019)**



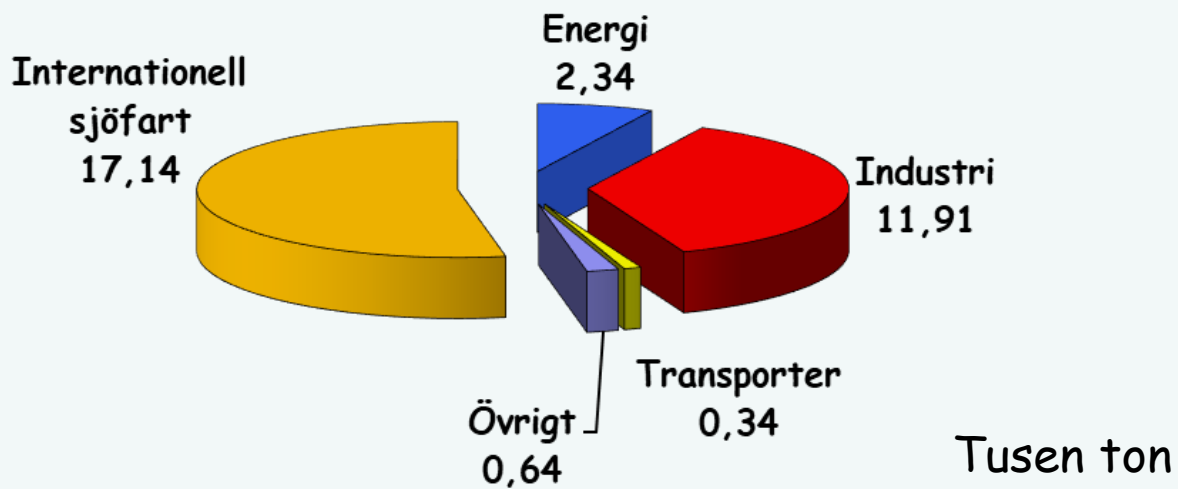
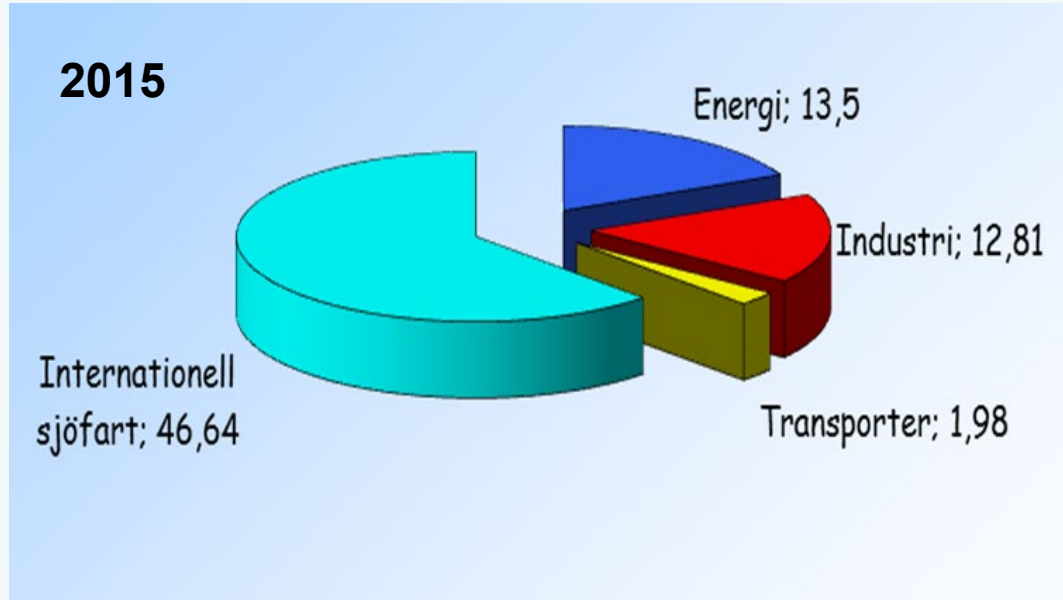
# Svaveldioxid – svenska utsläpp



Tusen ton

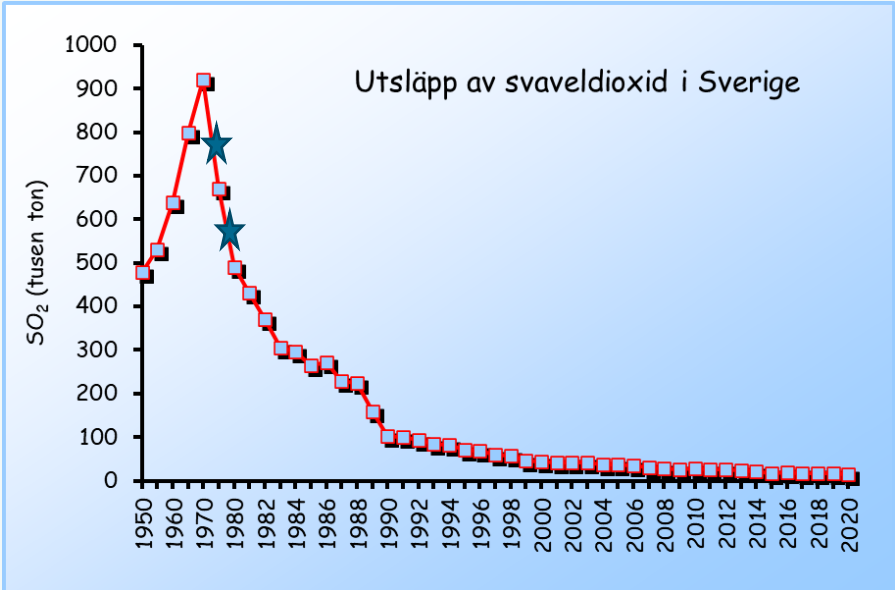
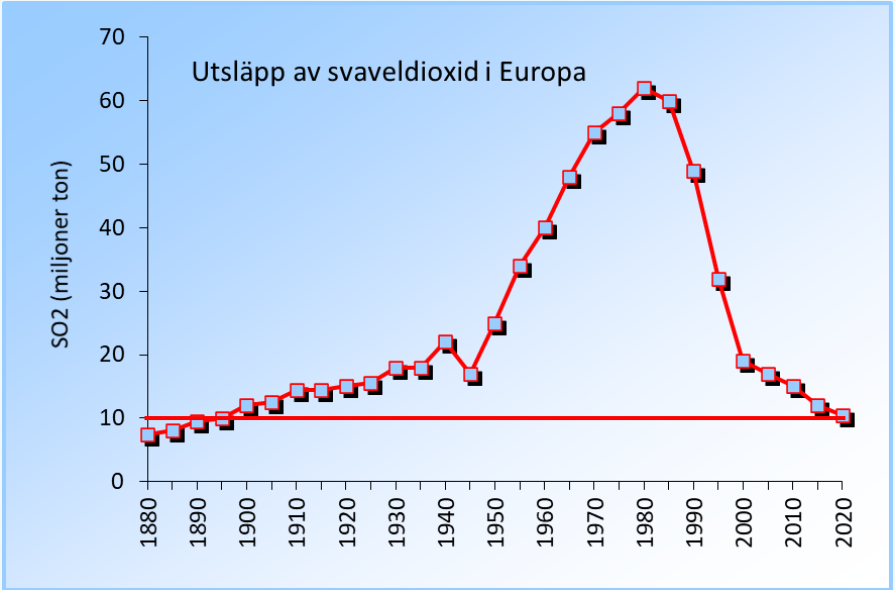


# Svaveldioxid – svenska utsläpp

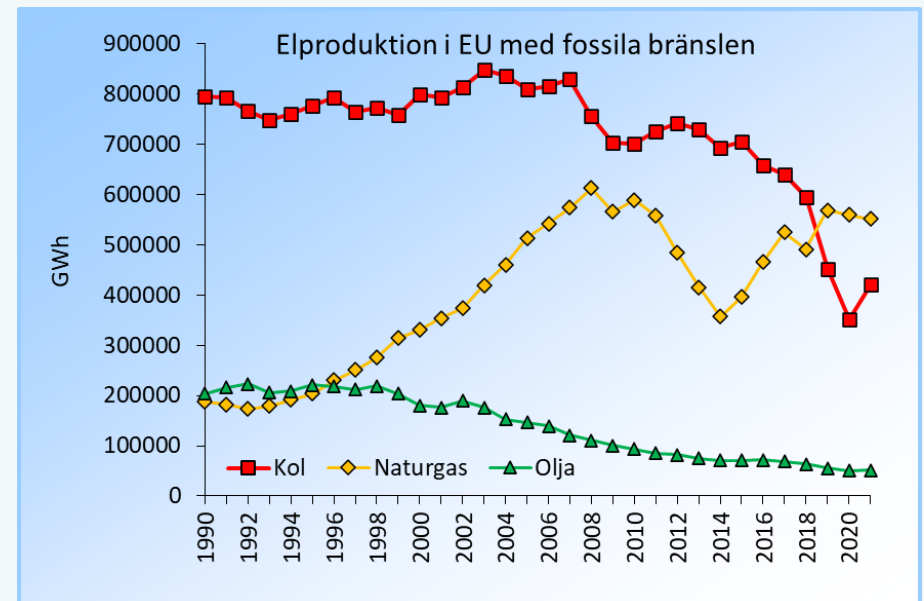
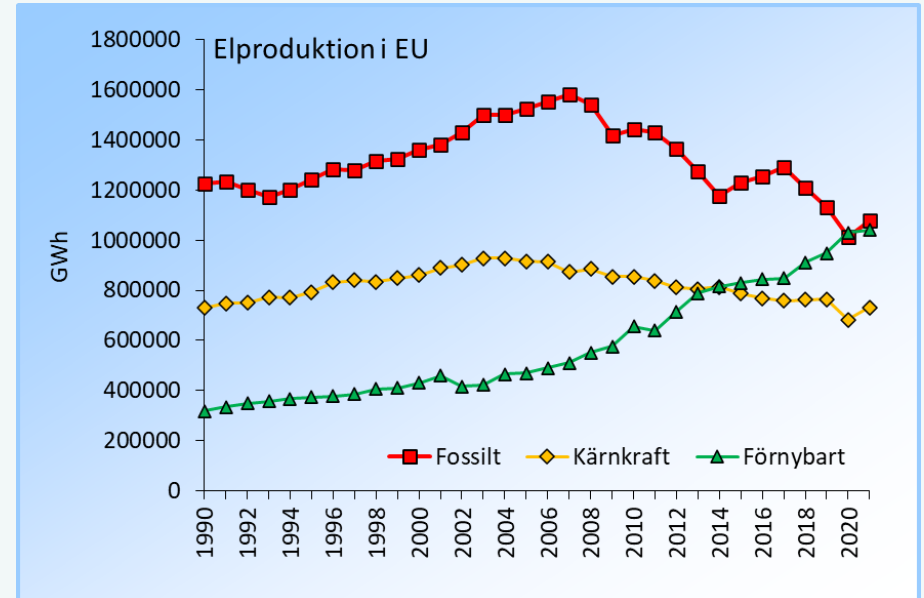




# Svaveldioxid – utsläppen minskar



# Svaveldioxid – utsläppen minskar



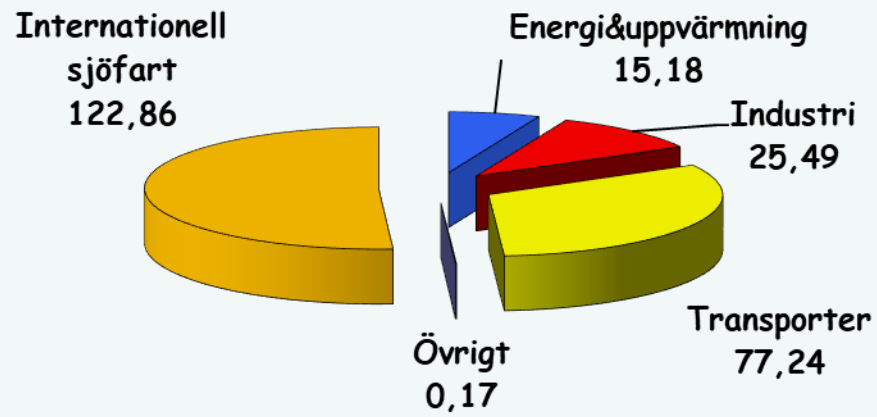
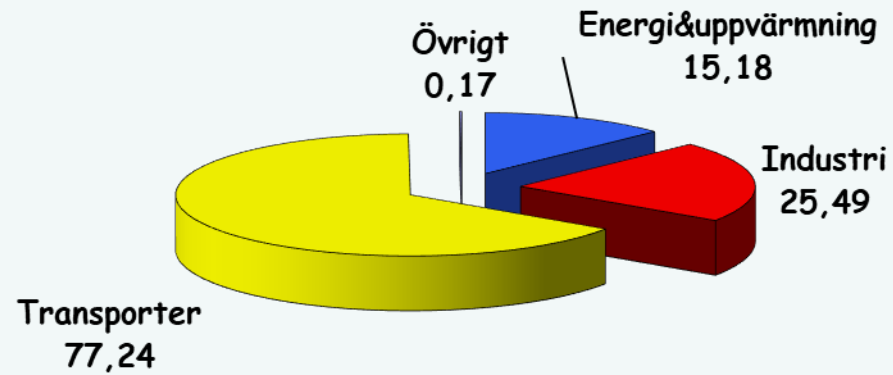
# Svaveldioxid – utsläppen minskar



- » Byte från kol och olja till naturgas
- » Ökad fossilfri produktion (först kärnkraft sedan vind och sol)
- » Rökgasrening med kalk
- » Lägre svavelhalt i olja (avsvavling), under senare år inte minst i sjöfarten



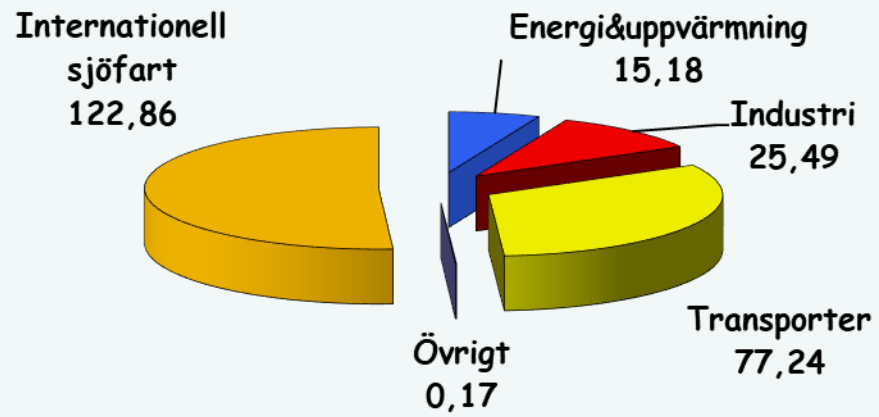
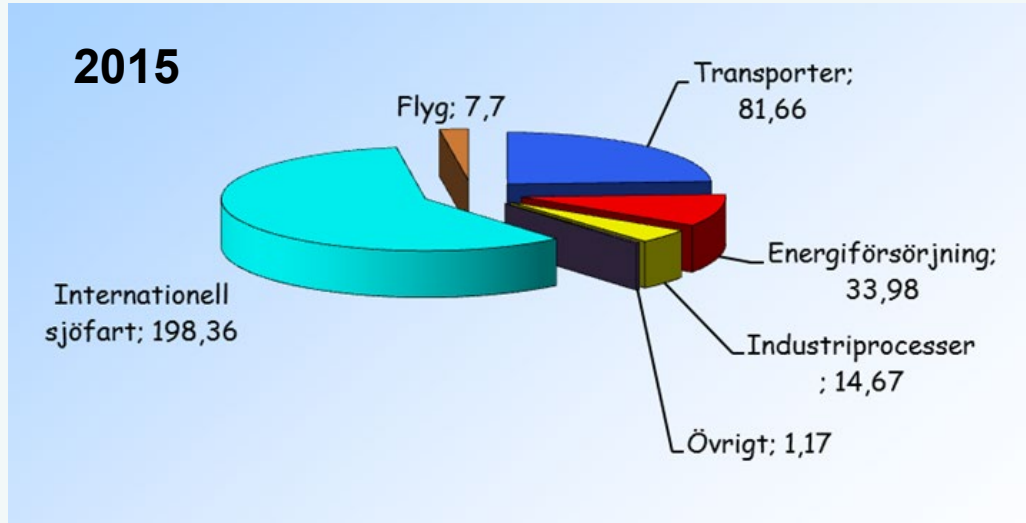
# Kväveoxider – svenska utsläpp



Tusen ton



# Kväveoxider – svenska utsläpp



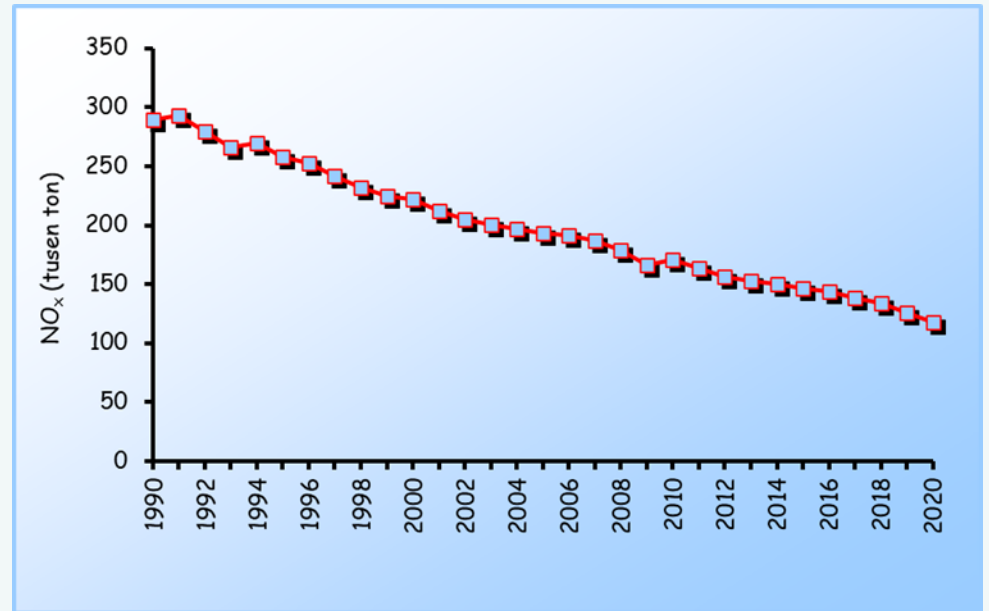
Tusen ton



# Kväveoxider – utsläppen minskar



## Svenska utsläpp



# Kväveoxider

- » Syraeffekten från kväveoxider neutraliseras i samband med upptag av kväve i vegetationen och försurar enbart vid kvävemättnad (dvs när vegetationen inte förmår att ta upp mera kväve)
- » Kvävemättnad syns i form av uppmätt nitrat ( $\text{NO}_3$ ) i sjöar och vattendrag (kan exempelvis uppträda efter kalhuggning)
- » Kväve bidrar även till försurningen via en ökad skogstillväxt

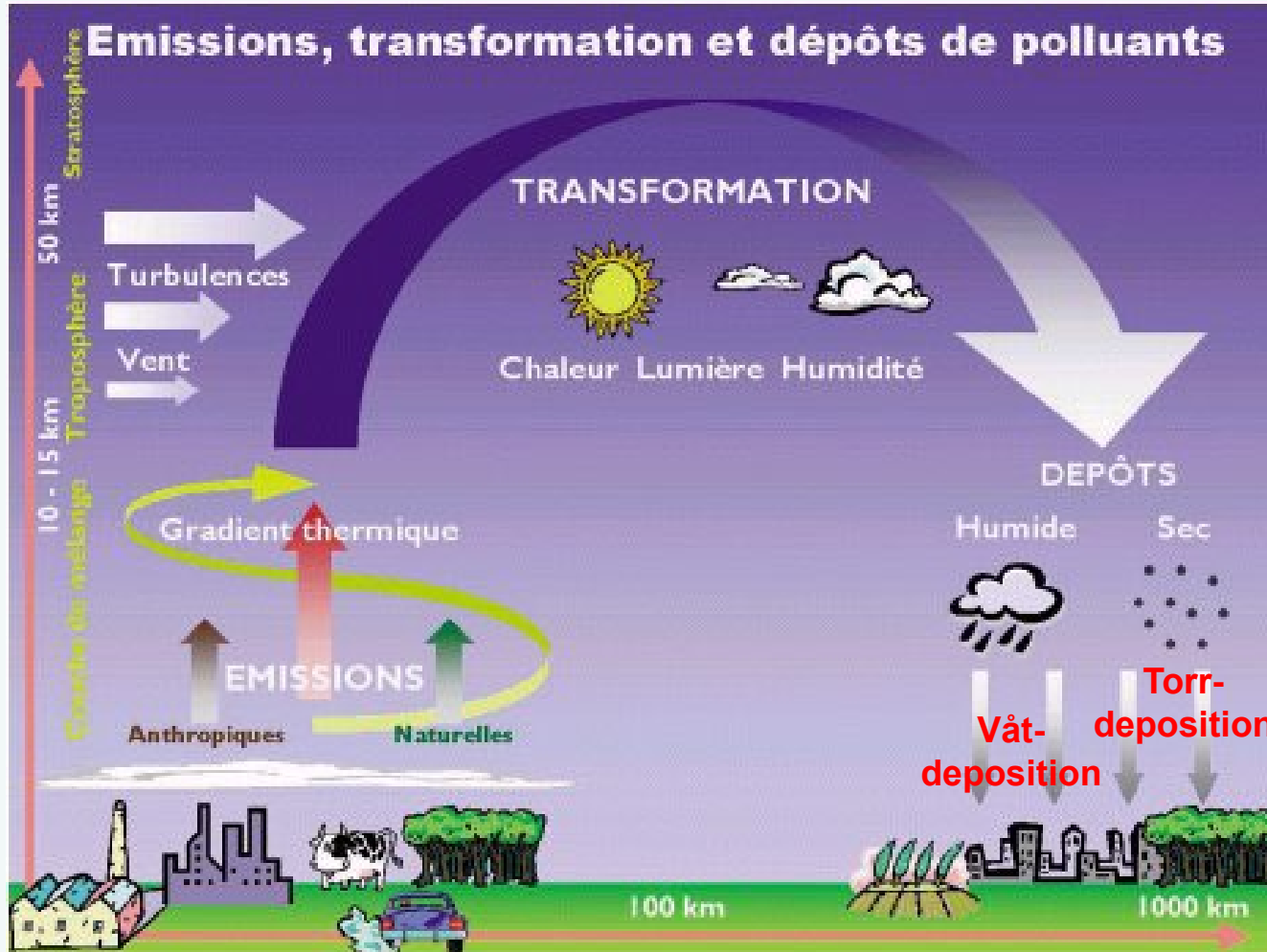


# Ammoniak

- » Kommer från djurhållning och naturgödsel
- » Är ett alkaliskt ämne som omvandlas till ammonium i atmosfären och därmed höjer pH
- » I samband med bioupptag eller nitrifikation kan ammonium bidra till försurning

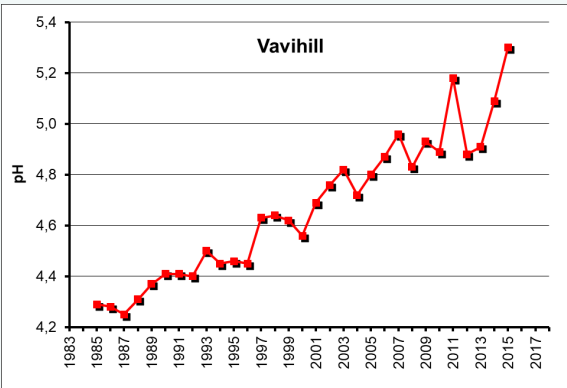
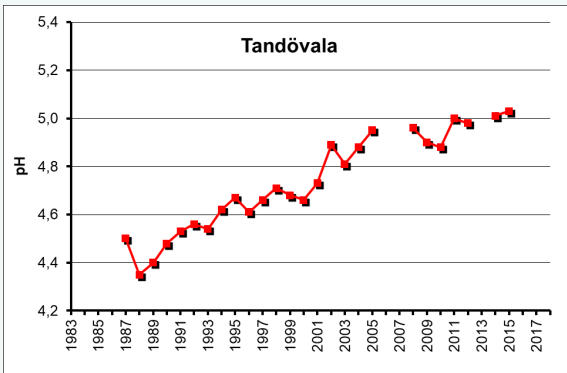
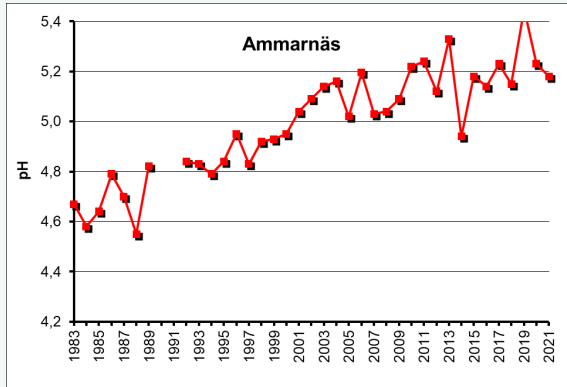


# Allting kommer tillbaka

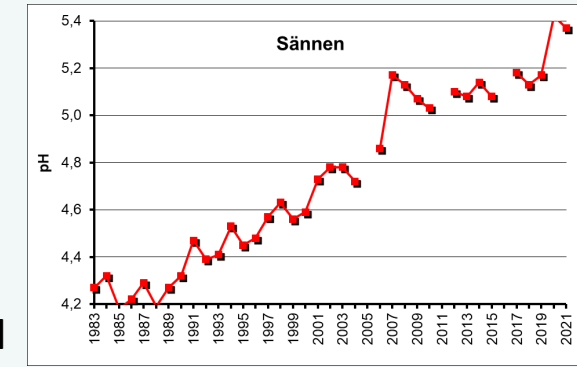
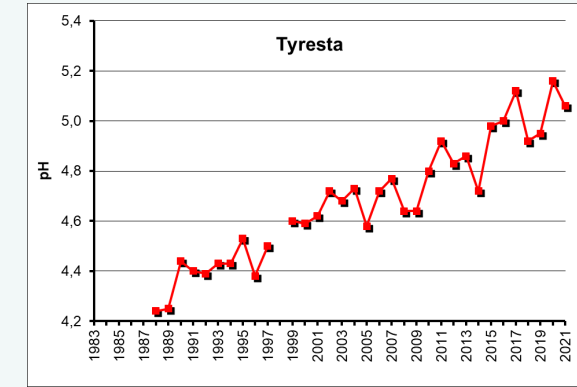
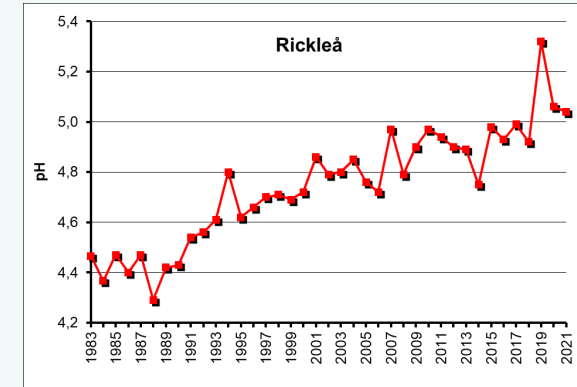
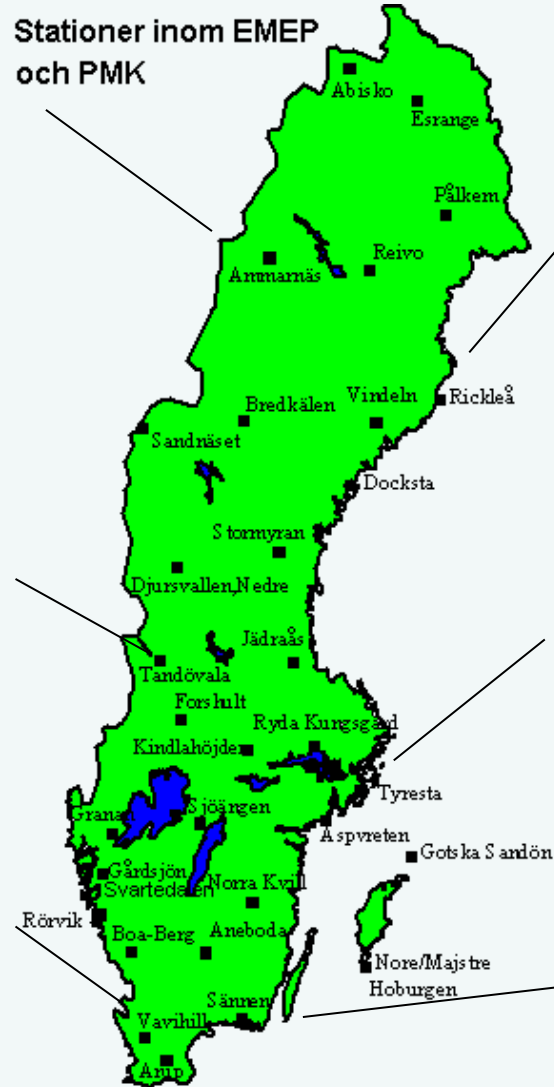


Svaveldioxid → Svavelsyra → Surt regn

# pH i nederbörden



Stationer inom EMEP och PMK

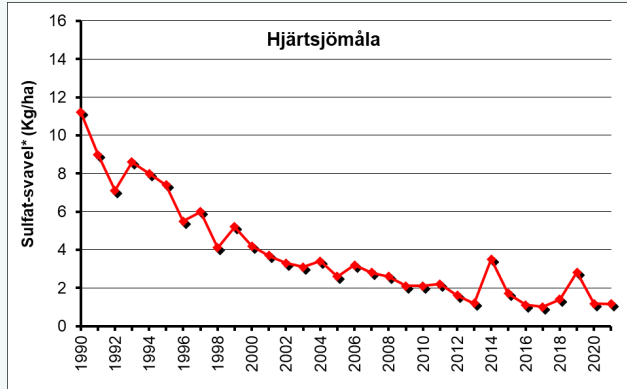
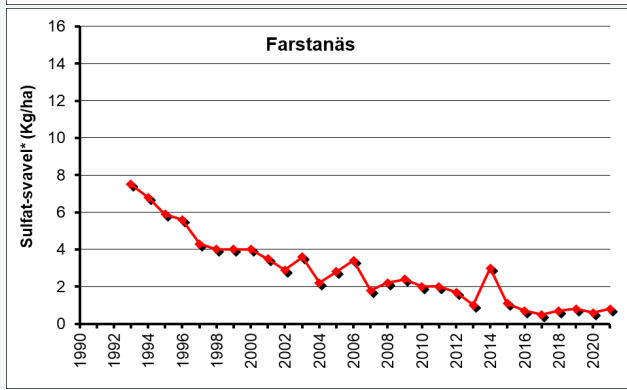
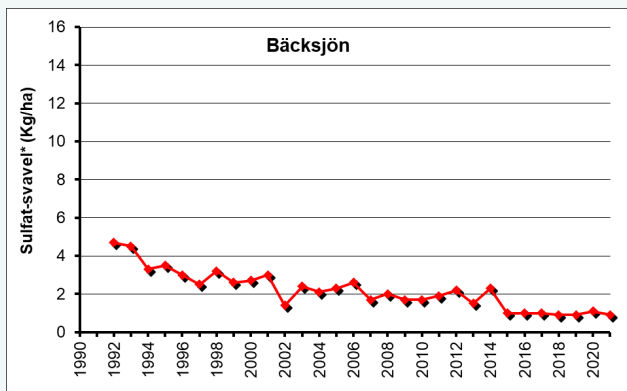
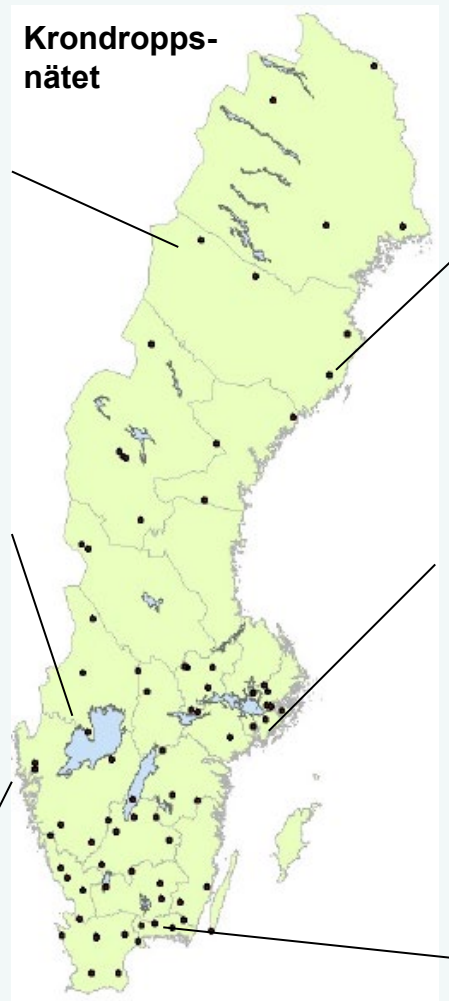
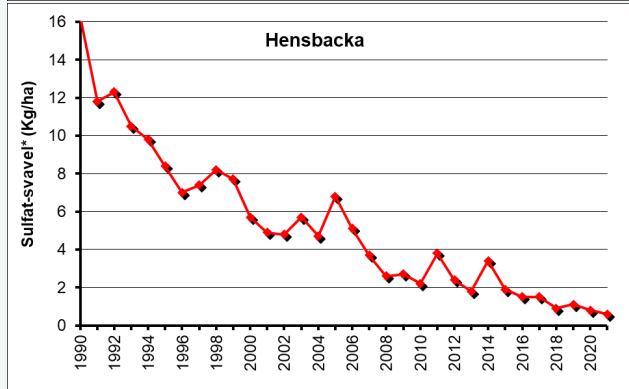
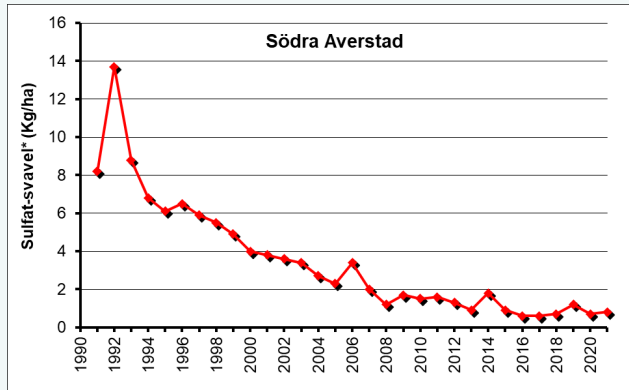
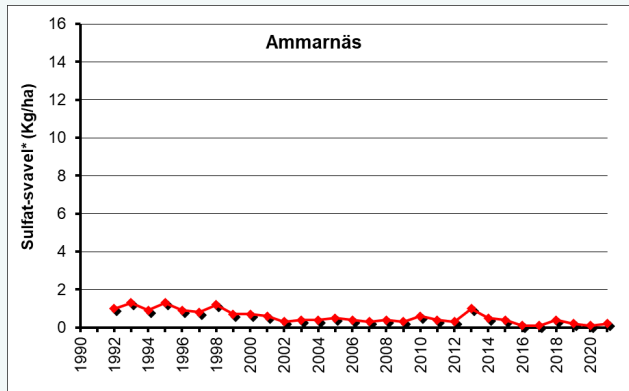


Källa: SMHI

Havs  
Vatten  
myndigheten



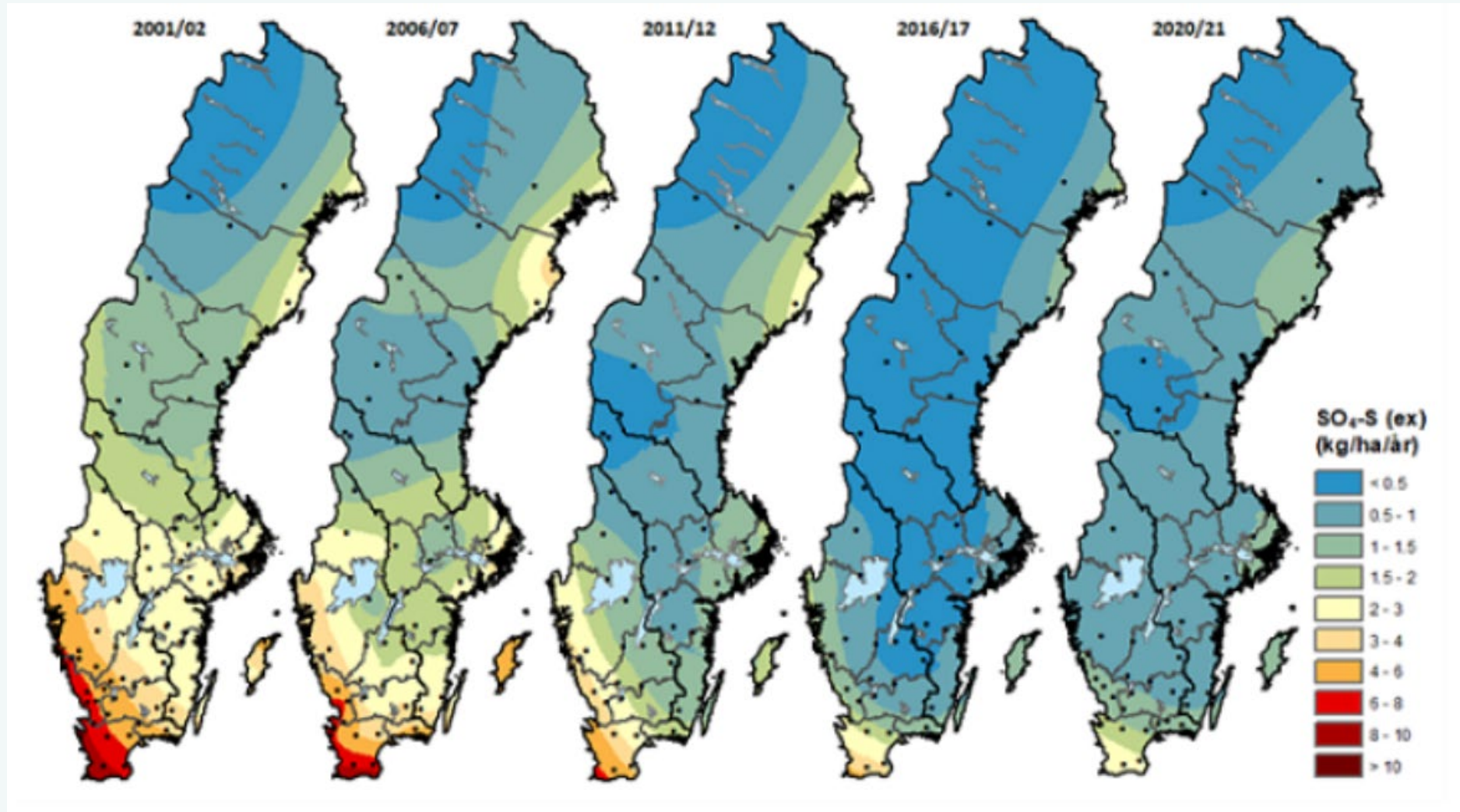
# Nedfall av svavel, uppmätt



Källa: IVL

Havs  
Vatten  
myndigheten

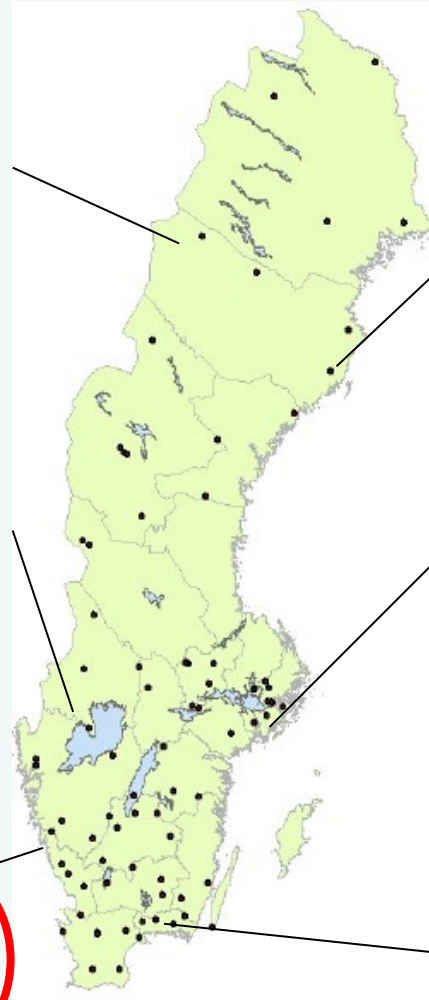
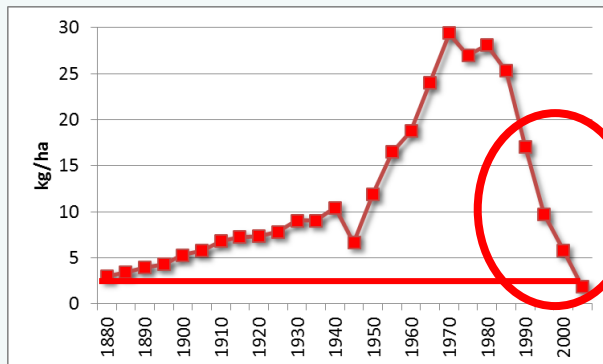
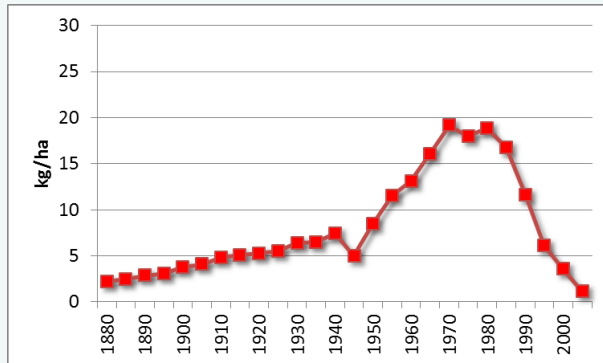
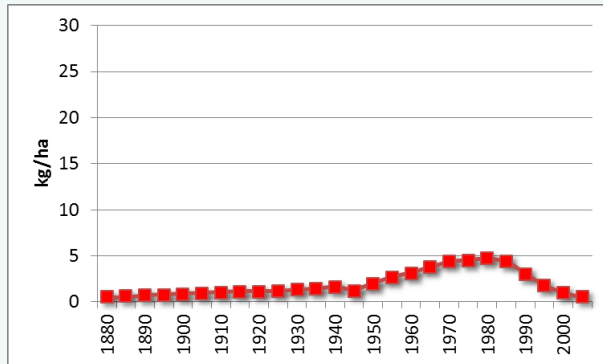
# Nedfall av svavel, uppmätt



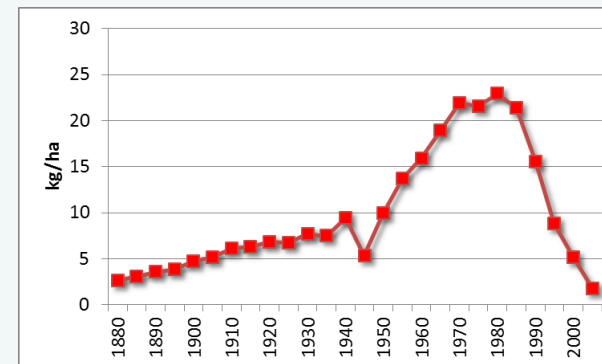
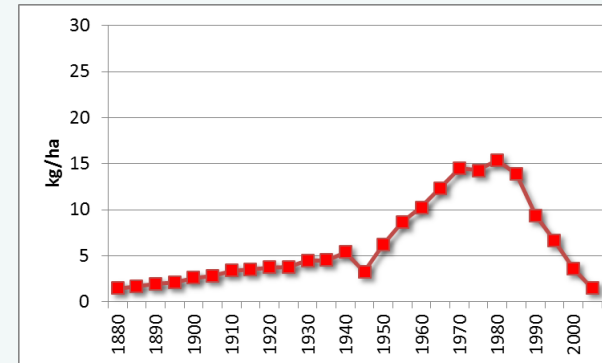
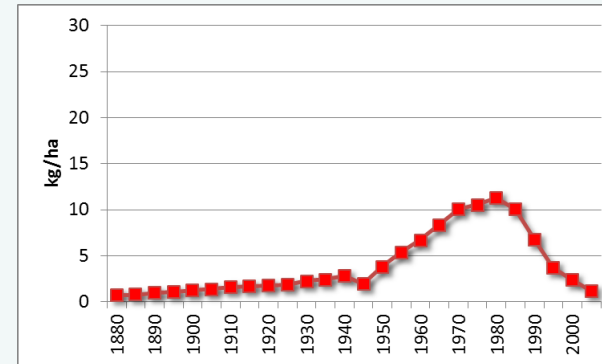
Källa: IVL

Havs  
Vatten  
myndigheten

# Nedfall av svavel, modellerat



Källa: EMEP

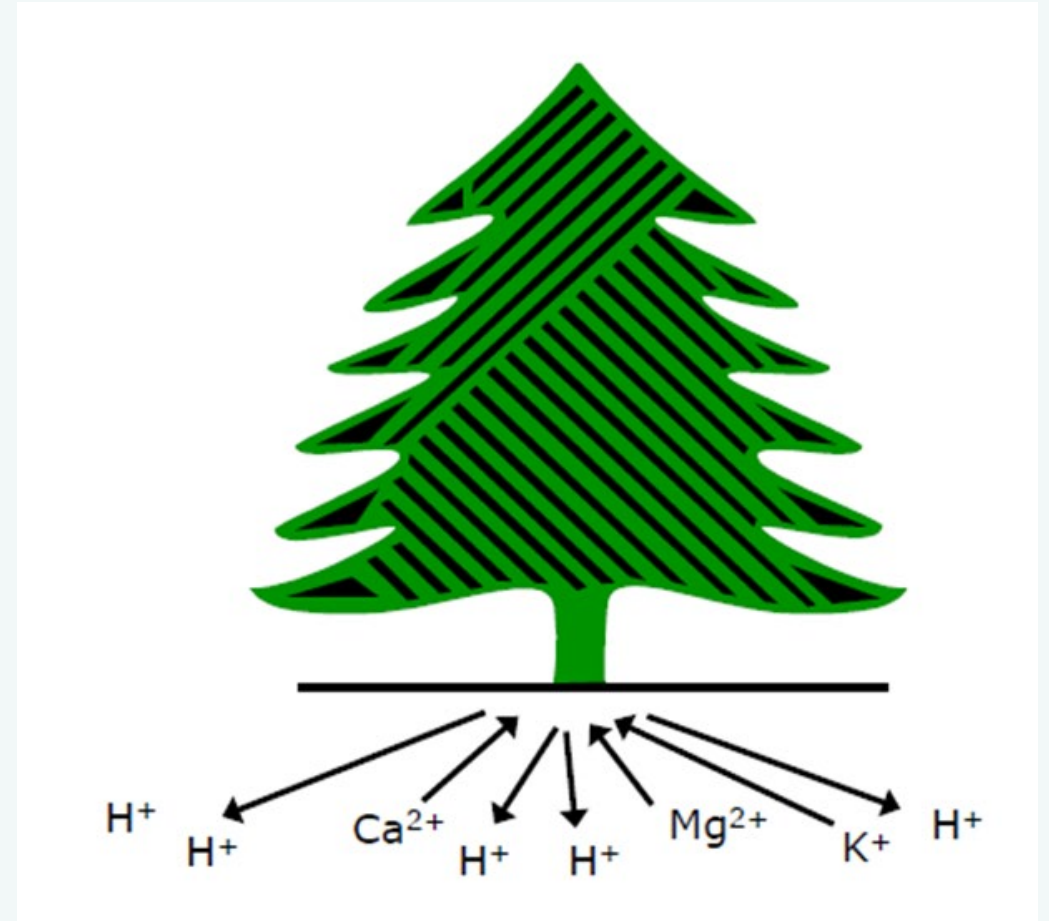


Havs  
Vatten  
myndigheten



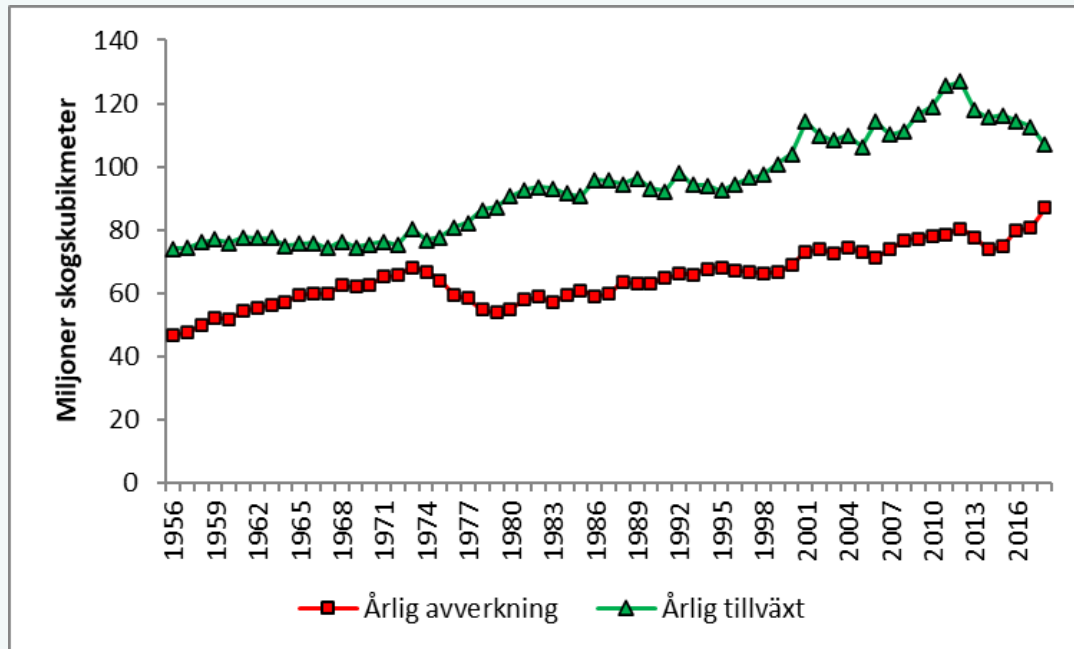
# Skogstillväxt

- » Skogen försurar genom näringsupptag av positiva joner (baskatjoner) i utbyte mot vätejoner ( $H^+$ )
- » Träden "lånar" dessa joner från marken
- » De betalas tillbaka när träden dör och förmultnar
- » Vid skörd blir förlusten permanent



# Skogstillväxt

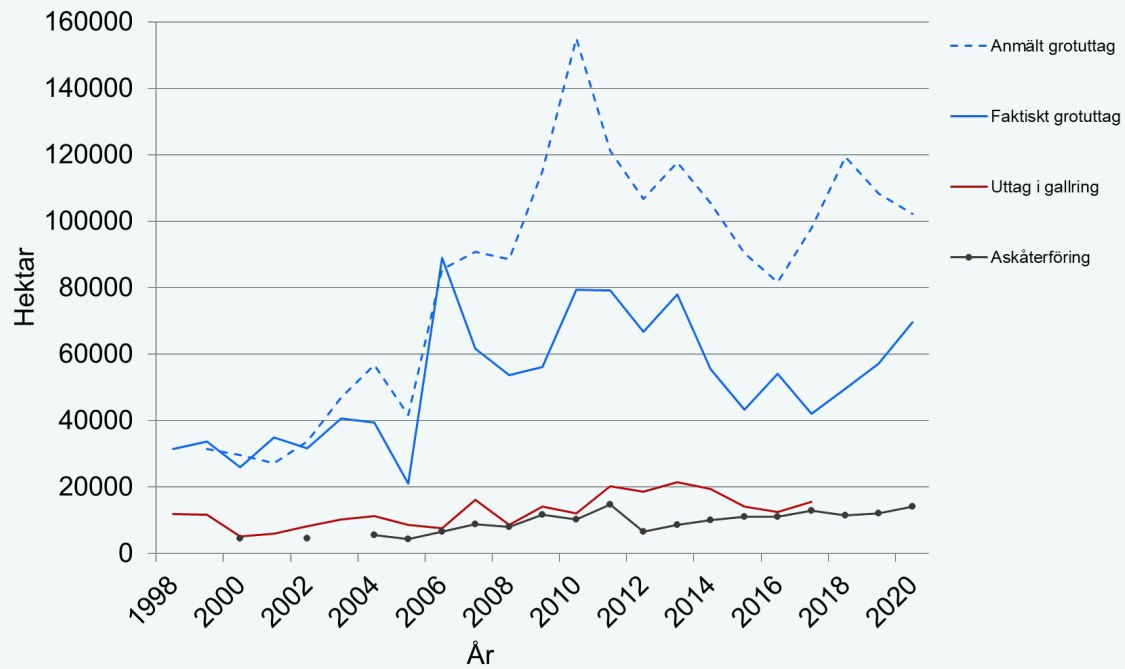
- » Ökad tillväxt ger ökad förurning
- » Ökat uttag ger ökad förurning





# Skogstillväxt

» Uttag av GROT dubblerar bortförseeln av baskatjoner (ungefär)

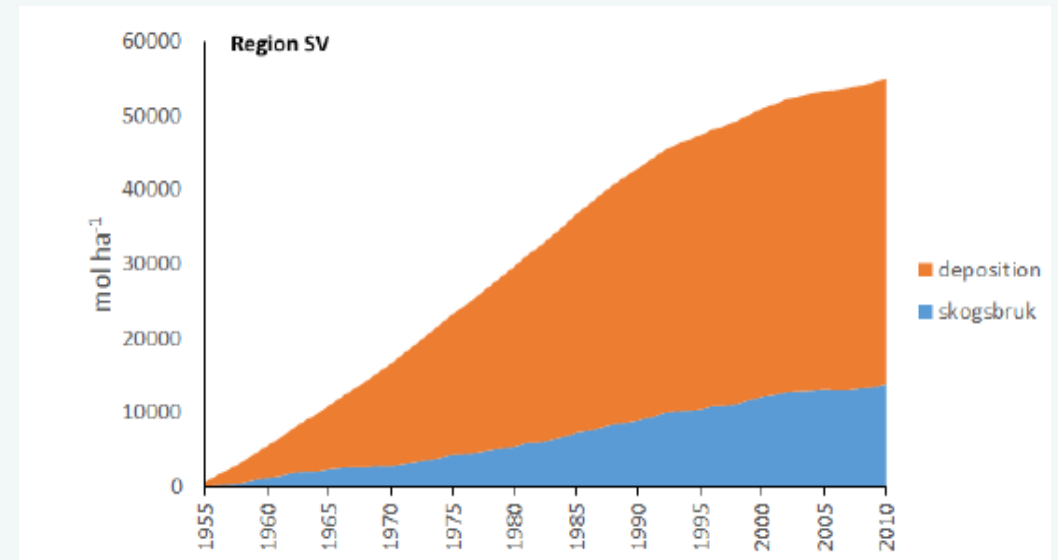
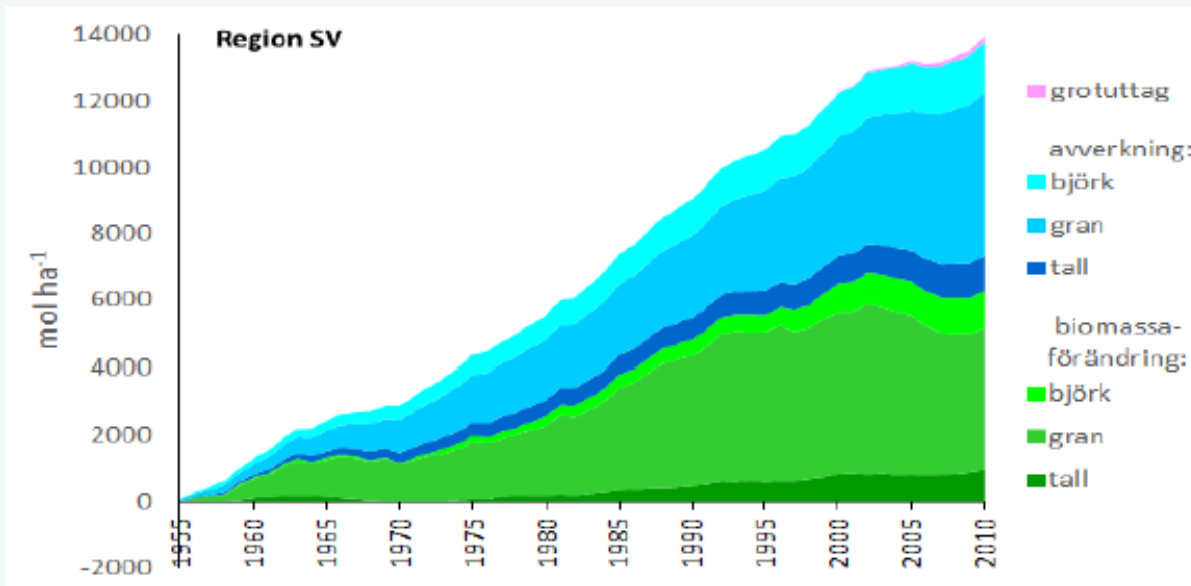


Källa: Skogsstyrelsen



# Skogstillväxt

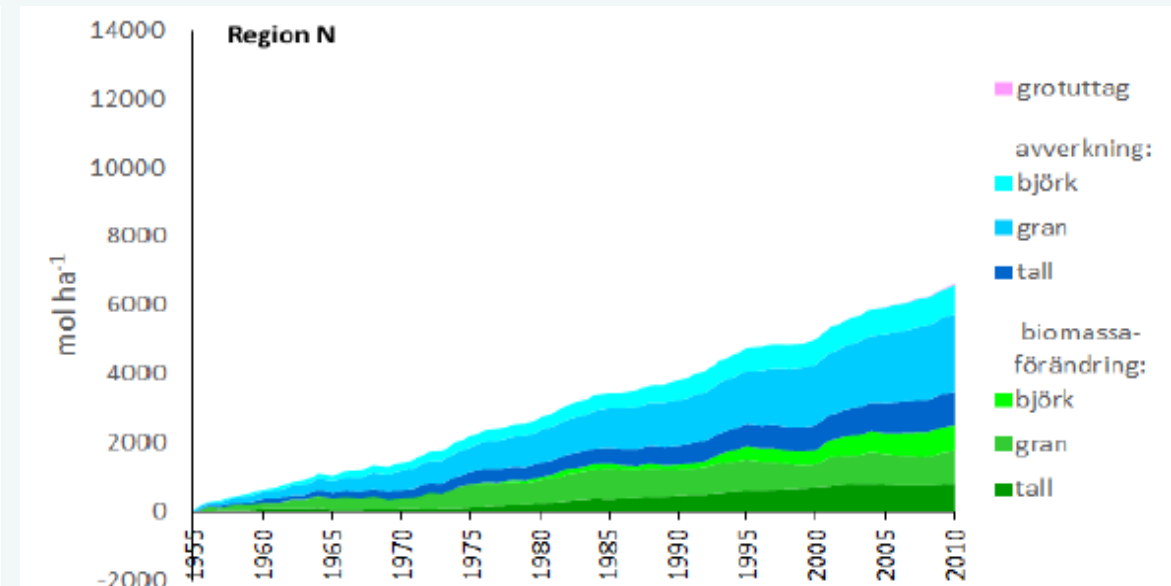
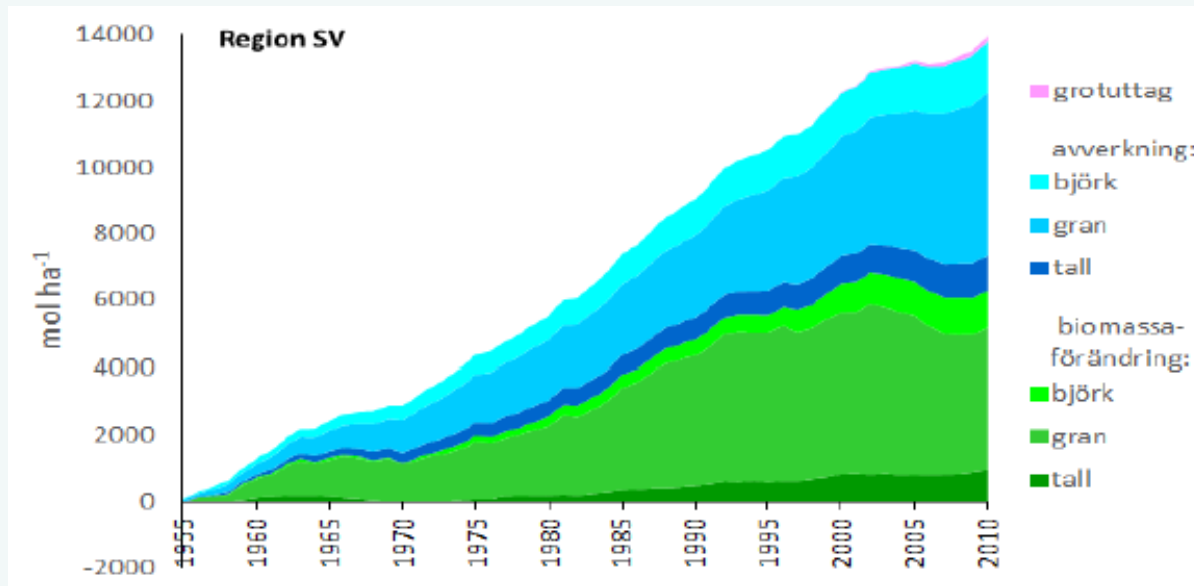
- » Ökad biomassa ger ökad markförsurning
- » Ungefär 20 % av total syrabelastning sedan 1955 i region sydväst
- » Uttaget av GROT har hittills haft liten betydelse





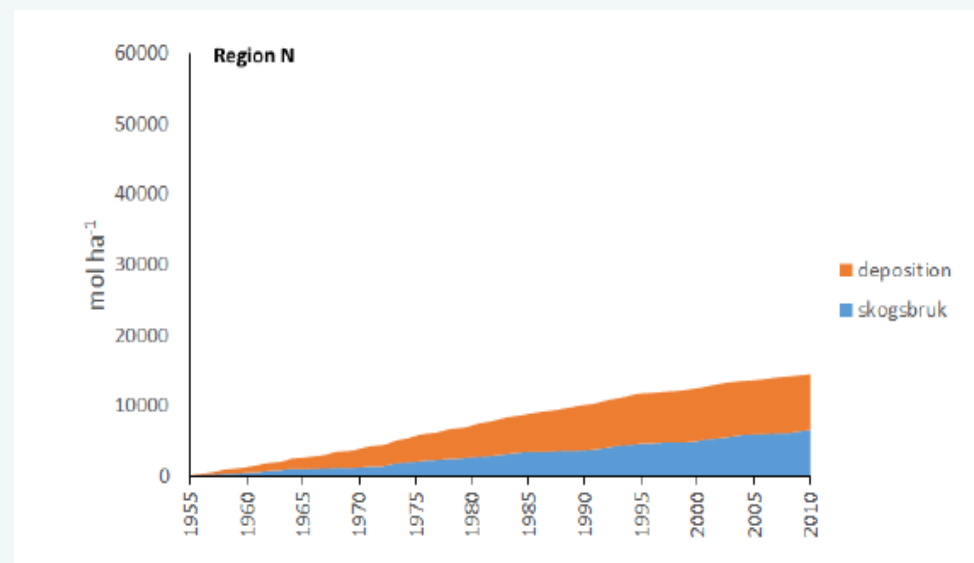
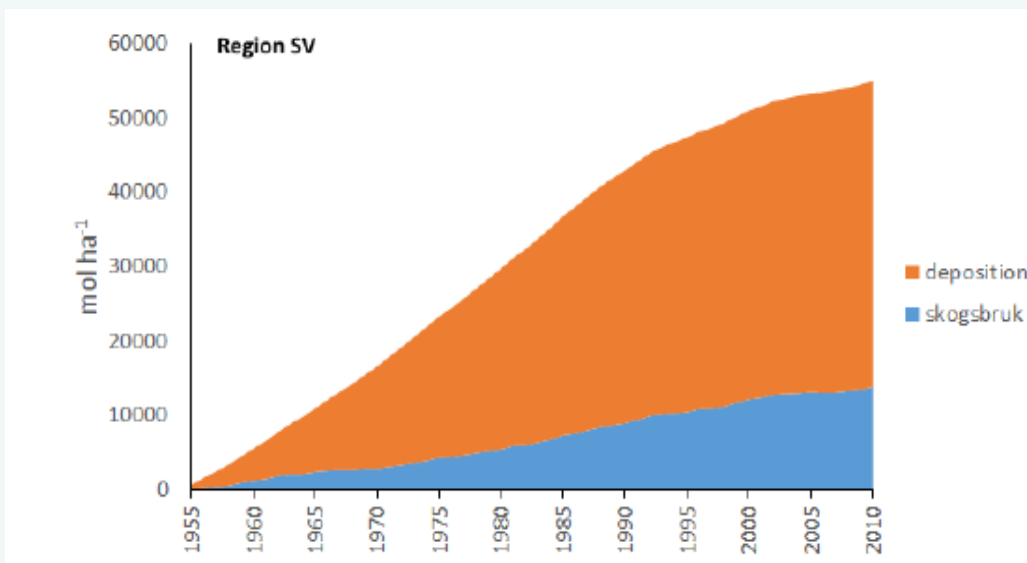
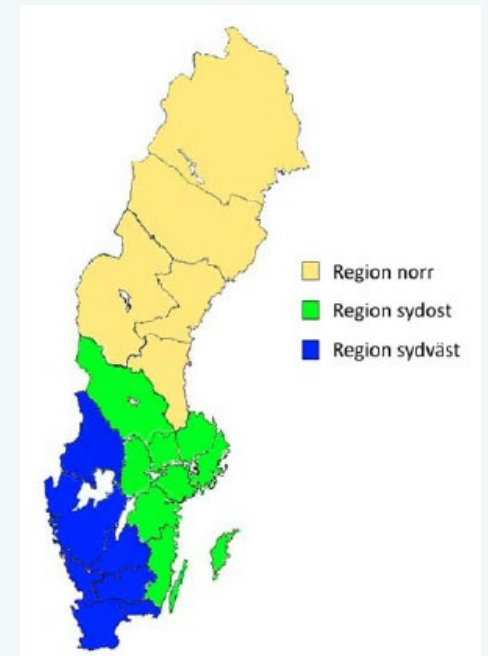
# Skogstillväxt

- » Ökad biomassa ger ökad markförsurning
- » Ungefär 20 % av total syrabelastning sedan 1955 i region sydväst
- » Uttaget av GROT har hittills haft liten betydelse
- » Kallare klimat ger lägre effekt i norra Sverige



# Skogstillväxt

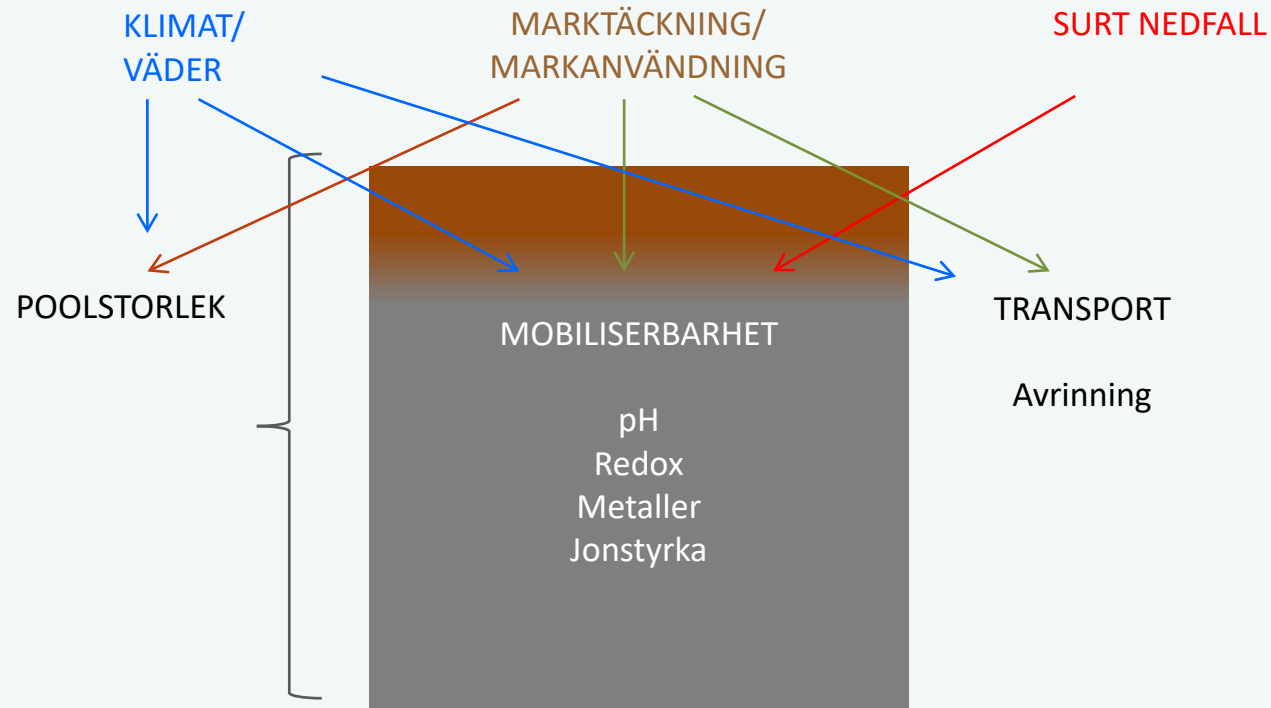
- » Ökad biomassa ger ökad markförsurning
- » Ungefär 20 % av total syrabelastning sedan 1955 i region sydväst
- » Ungefär 50 % av total syrabelastning i norr



vs  
titen  
...yndigheten

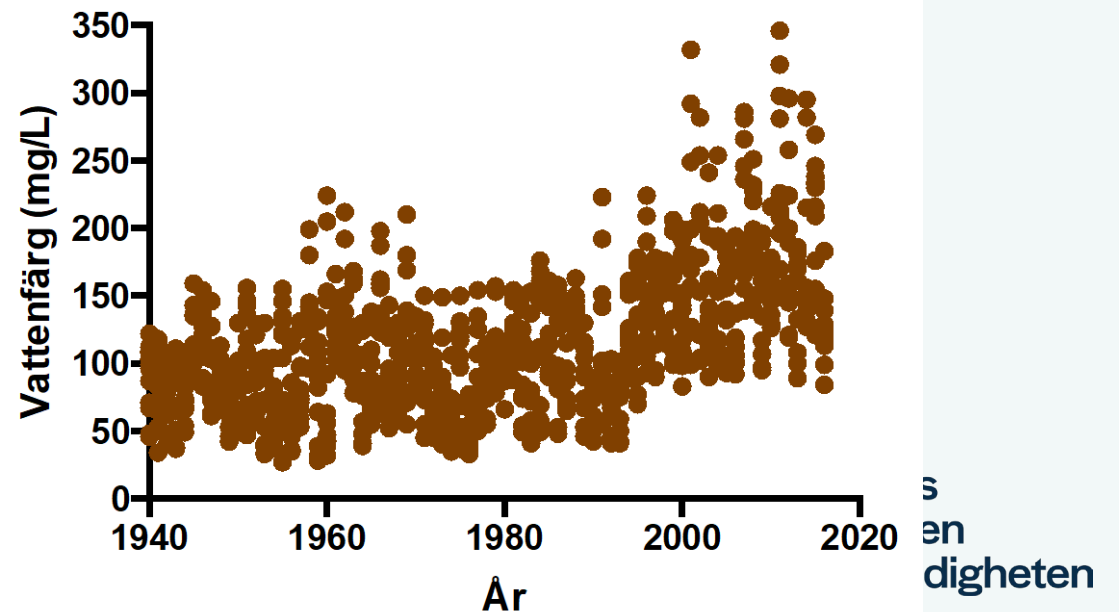
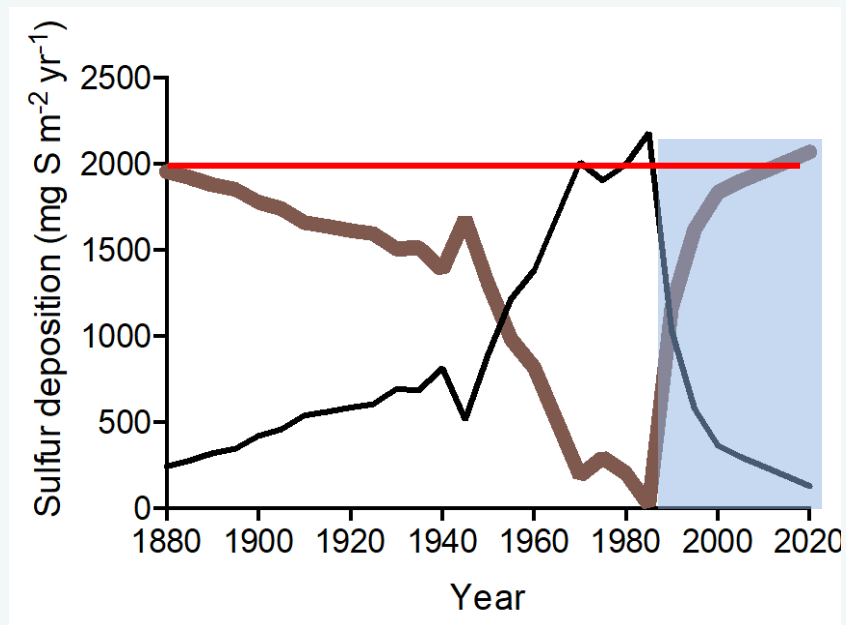
# Brunifiering

- » Vattnen blir brunare till följd av en ökad mängd organiskt material (och järn), vilket gör vattnen surare (organiska syror)



# Brunifiering

- » Tidigare teori att minskad svavelnedfall var den viktigaste orsaken
- » Återgång till nivå innan försurningen
- » Ingen minskad brunifiering har påvisats när försurningen ökade





# Brunifiering

- » Svavelnedfallet är inte den förhärskande faktorn, brunifieringen är inte en återgång till en naturlig nivå
- » Variationen i nederbörd är en viktig faktor bakom periodicitet i kombination med ökande temperatur är klimatet en bidragande faktor
- » Markanvändning – expansion av barrskog – har varit en underskattad faktor
- » Markavvattning? (körskador, markberedning, brandbekämpning)



# Utsläpp av svavel

Främst från koleldad elkraft i utlandet. Omvandlas till syra och ger surt regn över Sverige

## Utsläppen av svavel har minskat

Till en nivå som motsvarar slutet på 1800-talet

## Skogsbruk försurar marken

Både genom uttag av skogsråvara och genom en ökad mängd biomassa

## Brunifieringen motverkar återhämtningen

Markanvändningen är en betydande faktor och det är inte en återgång till naturliga förhållanden



# Försurningsteori och försurningsmodeller?

pH, alkalinitet och ANC

Markens betydelse för försurningseffekten i sjöar och vattendrag

Hydrologi och surstötter

Försurningsmodeller och MAGIC



# pH och buffringsförmåga

pH anger surhet, logaritmiskt mått på mängden vätejoner,  
pH 5 är 100 gånger surare än pH 7

Alkalinitet anger förmågan att neutralisera vätejoner –  
buffringsförmågan, titreras till 5,4 ~ vätekarbonat

ANC (Acid Neutralizing Capacity) anger vattnets totala  
buffringsförmåga som även innefattar organiska syror

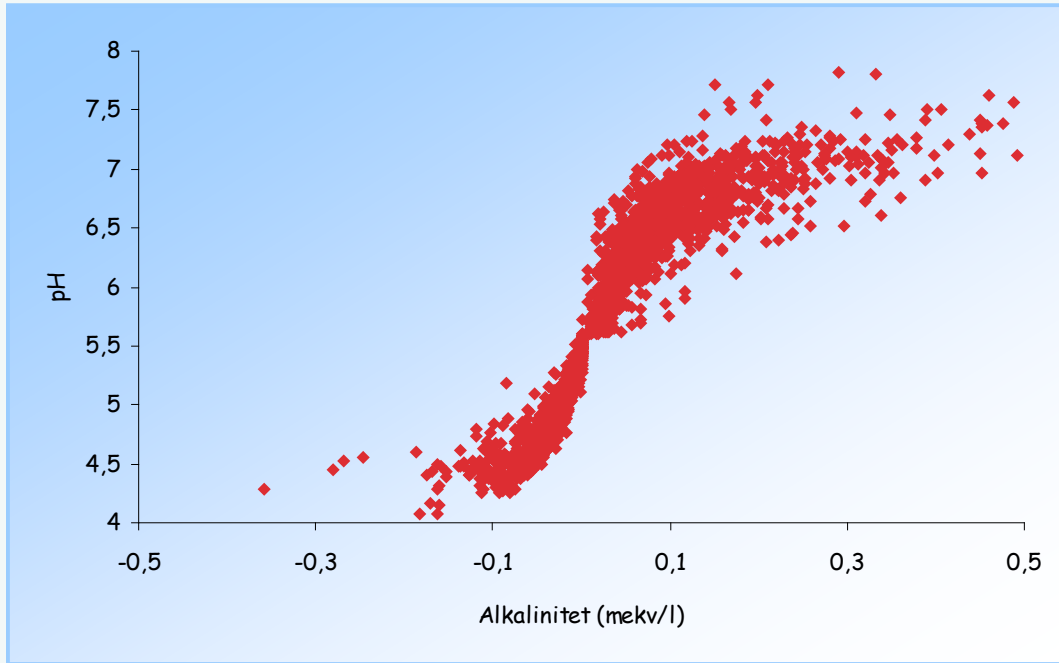
Beräknas som:  $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} - \text{SO}_4 - \text{NO}_3 - \text{Cl}$

men är egentligen:





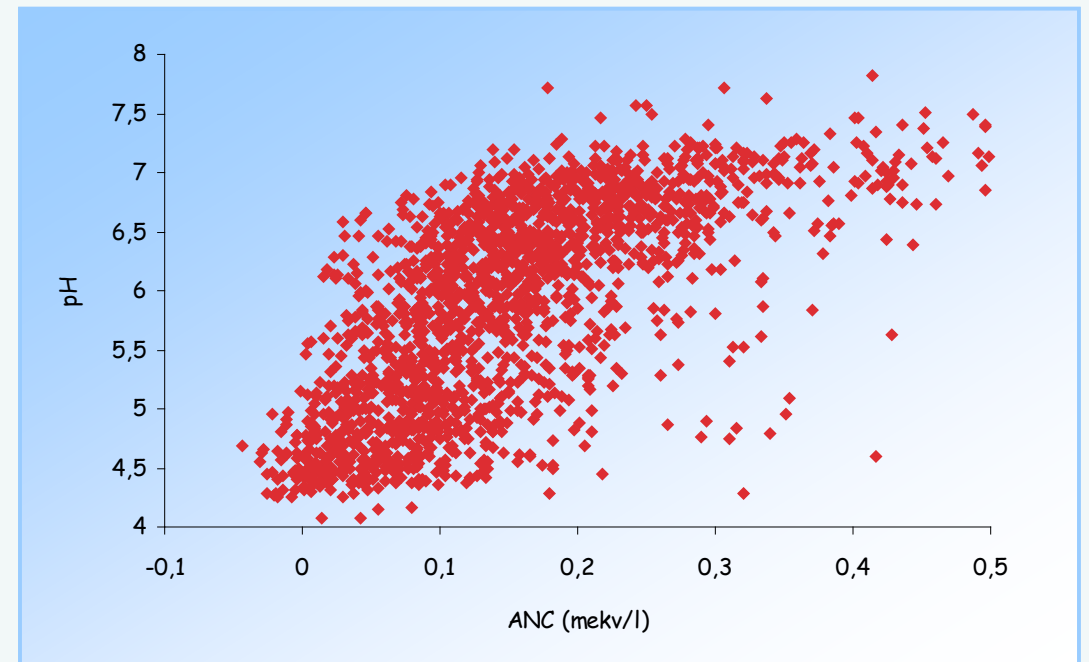
# pH och buffringsförmåga



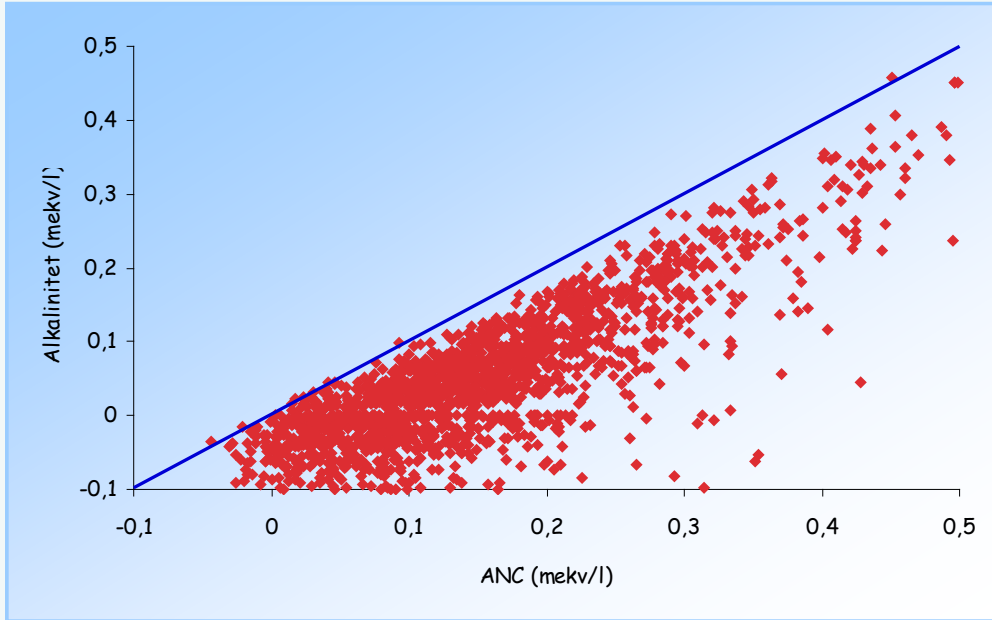
## pH och alkalinitet

ANC är enkel att modellera, men har svagare koppling (än alkalinitet) till biologiska effekter i humösa vatten

## pH och ANC



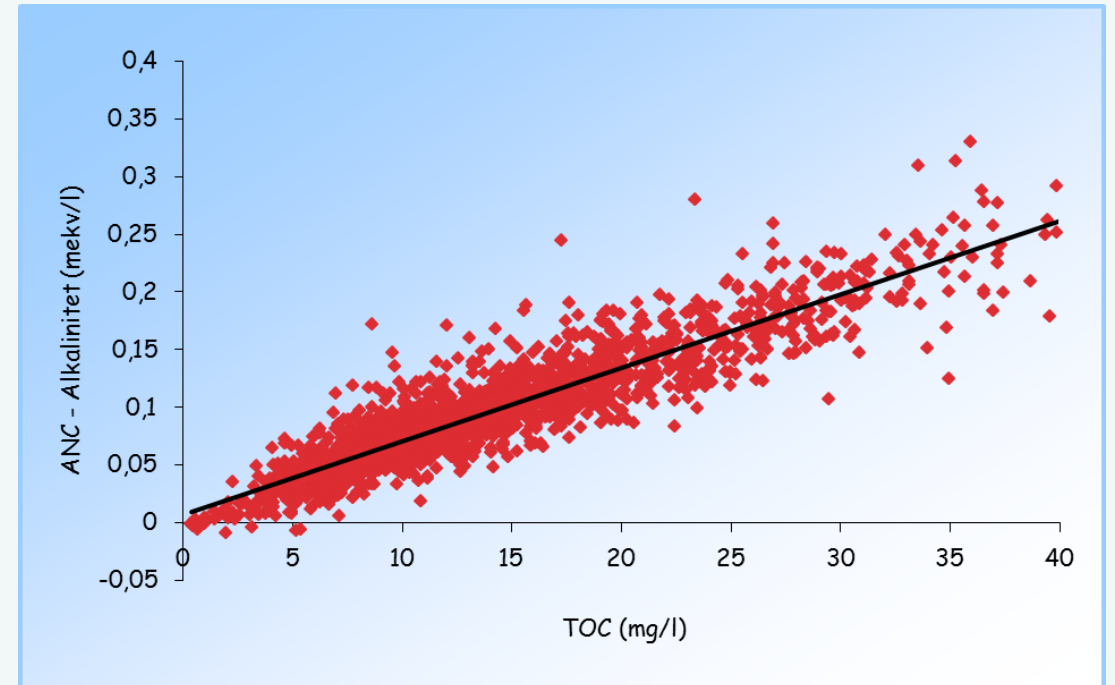
# pH och buffringsförmåga



$$\text{ANC} \approx \text{Alkalinitet} + (0,0063 * \text{TOC})$$

## Alkalinitet och ANC

I vatten som saknar humussyror är i princip alkalinitet = ANC



# Mark och hydrologi

Bara en liten del av nederbörden (ofta 1-2 %) hamnar direkt på vattenytor

Därför

Avrinningsområdets karaktär och vattnets transportvägar och uppehållstid i marken avgör vattenkvaliteten

Surt regn behöver inte leda till sura sjöar och sura vattendrag

# Mark och hydrologi

## Högt pH

Lättvittrade mineral  
Ex. kalkspat (kalk)

Finkorniga jordar

Mäktiga jordtäcken

Lång uppehållstid  
för vattnet i marken

Låg tillförsel av organiskt  
material

## Lågt pH

Svårvittrade mineral  
Ex. kvarts

Grovkorniga jordar

Tunna jordtäcken

Kort uppehållstid  
för vattnet i marken

Hög tillförsel av  
organiskt material



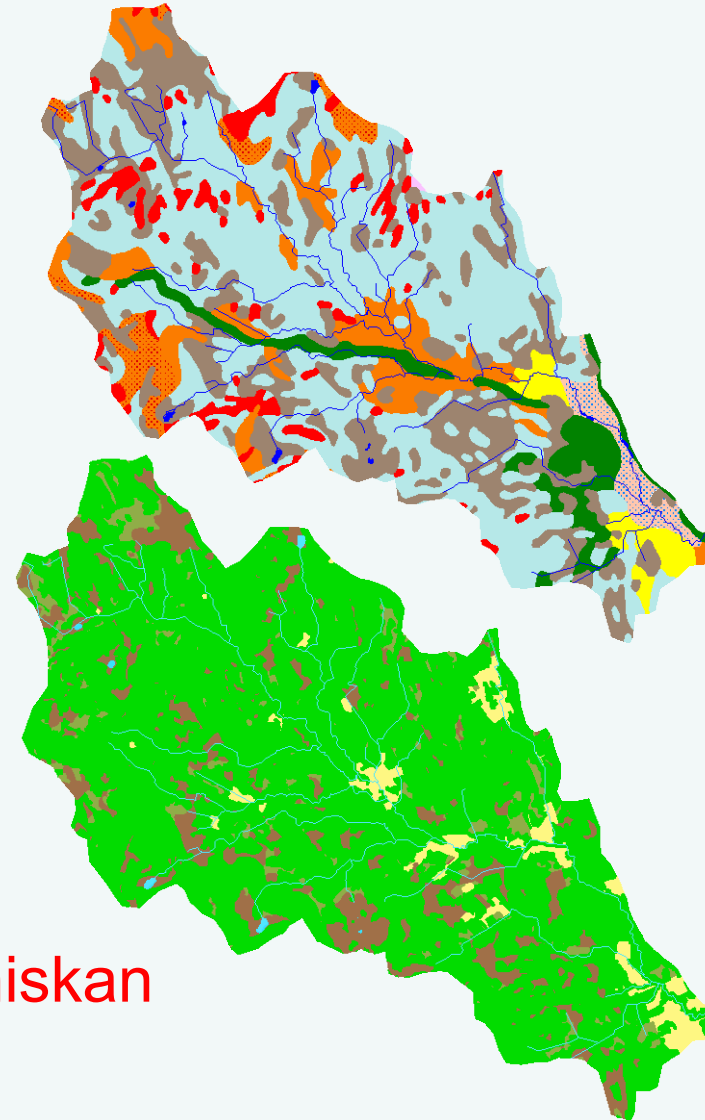
# Mark och hydrologi

## Stora variationer i tid och rum

- » Avrinningsområdet är en mosaik av olika egenskaper
- » Tidsmässig variation avseende tillförsel av nederbörd och smältvatten. Vilket påverkar vattnets transporttid och transportvägar genom marken

# Avrinningsområdet en mosaik av olika egenskaper

- » Bergarter/mineral
- » Jordarter
- » Markdjup
- » Markanvändning
- » Trädslag
- » Beståndsålder

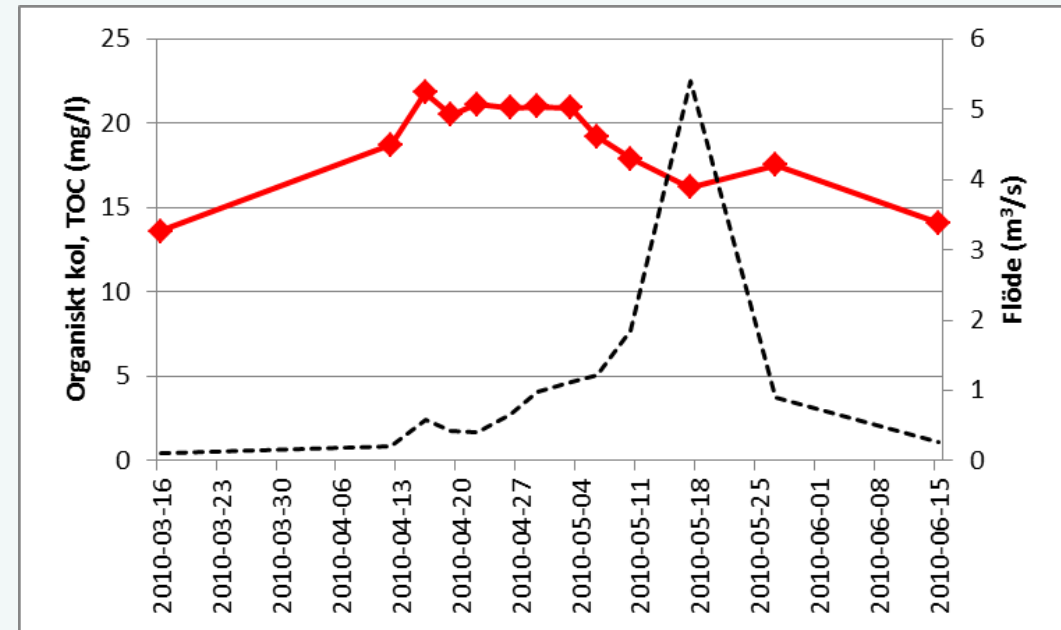
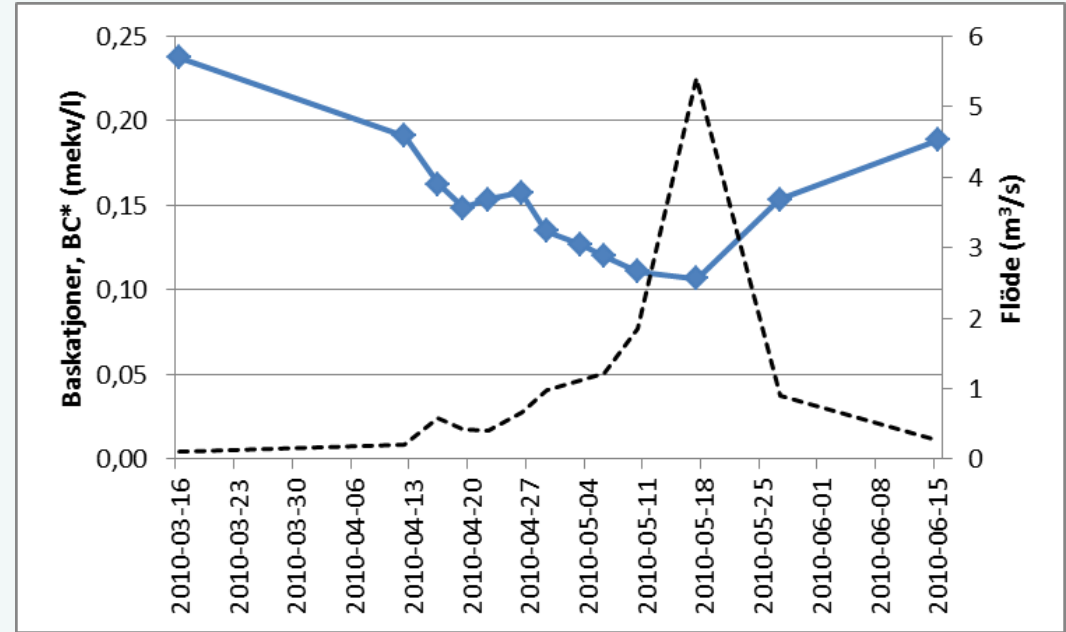
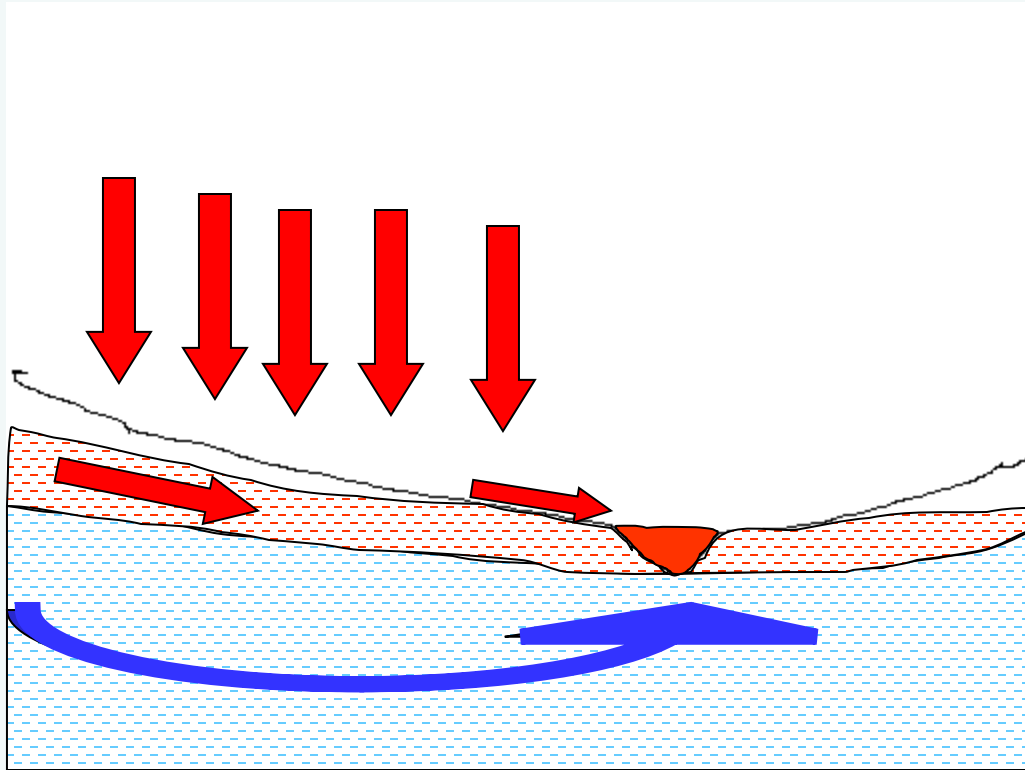


och allting i olika grad påverkat av människan

# Hydrologi

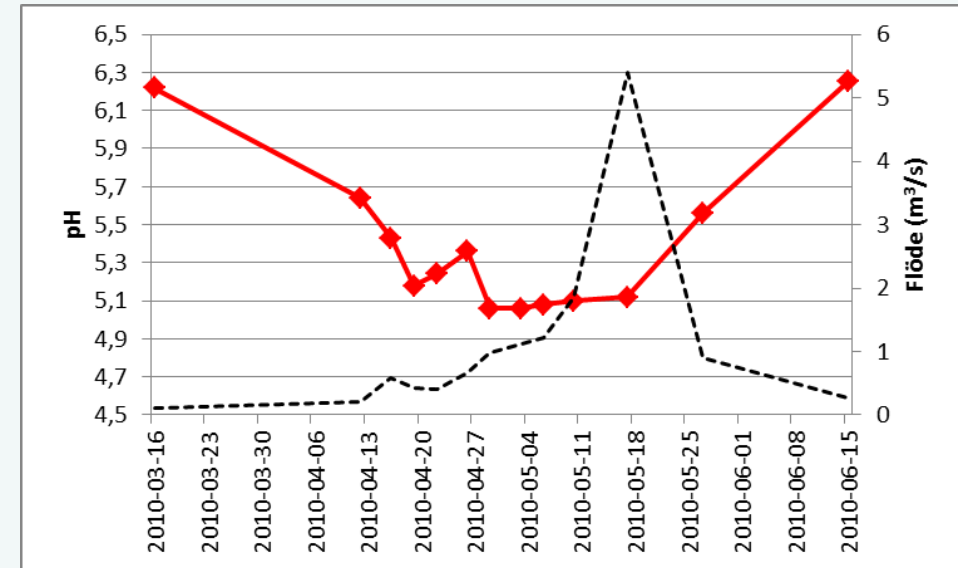
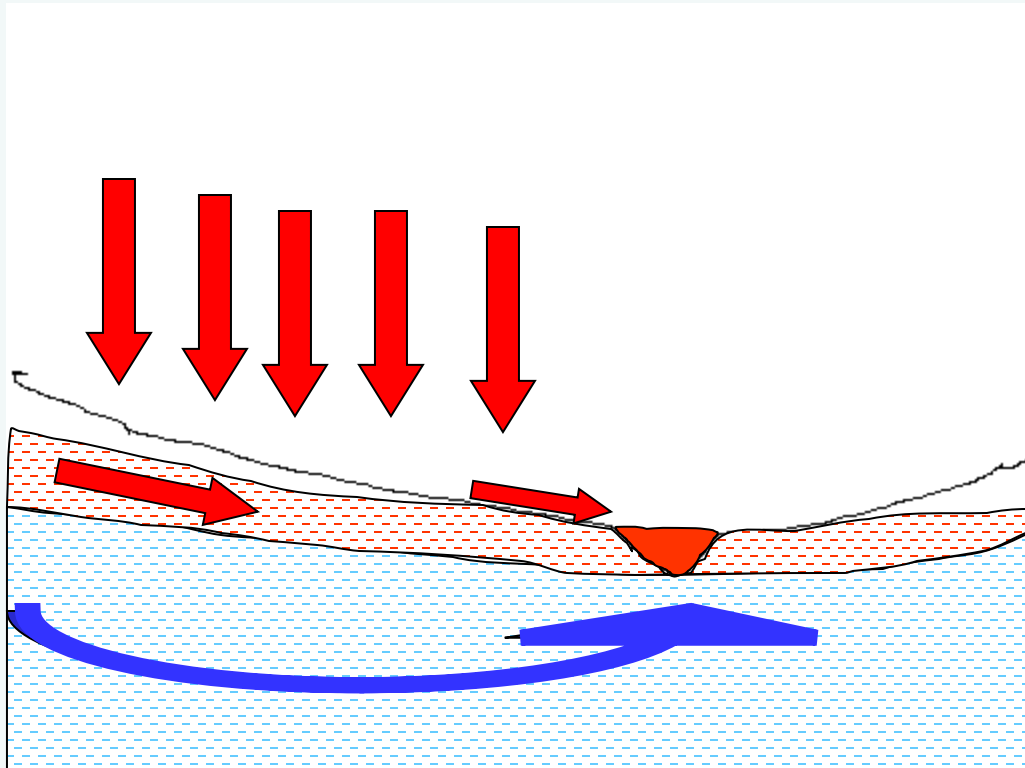


# Hydrologi





# Hydrologi



## Surstöt

Ett naturligt fenomen som förstärks av sur nederbörd

Havs  
och Vatten  
myndigheten

# Försurning av sjöar och vattendrag

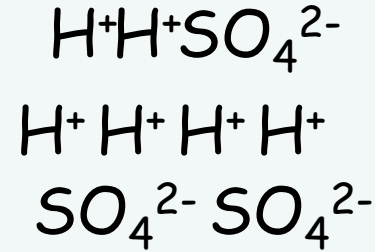
- » Marken i avrinningsområdet har en avgörande betydelse för kopplingen mellan surt nedfall och försurade sjöar och vattendrag
- » Variationerna i tid och rum medför en komplexitet som är närmast oändlig
- » Att skruva tillbaka tiden och skatta den historiska vattenkvaliteten skulle inte ens Ethan Hunt klara



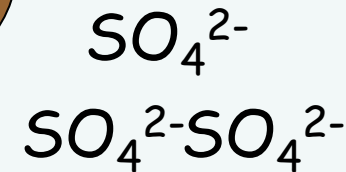
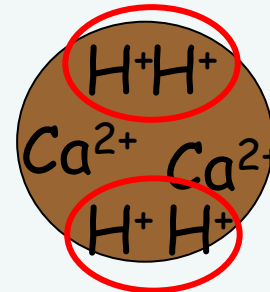
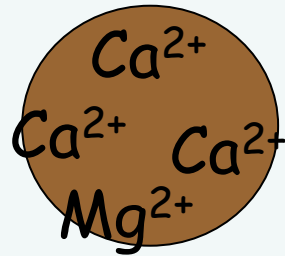
- » Det krävs helt andra metoder

# Markens respons på sur nederbörd

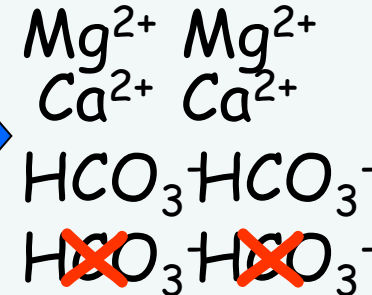
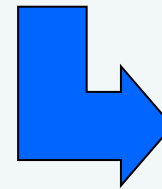
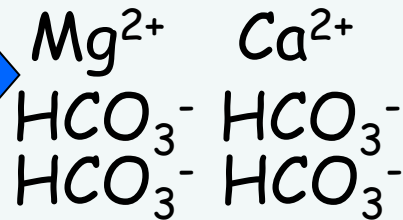
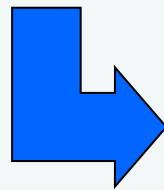
Från luften



Jonbyte



Till vattnet



Havs  
och Vatten  
myndigheten

# Grundläggande frågeställning vid försurningsmodellering

- » Hur stor är markens förmåga att neutralisera syra med jonbyte?
- » Hur påverkar detta marken över tid = hur mycket sjunker basmättnadsgraden?
- » Hur snabb är markens återhämtning = vittringshastigheten (hur mycket tar skogen upp)
- » Hur påverkar detta vattenkvaliteten



# Försurningsmodeller

## Varför behövs modeller?

- » Till följd av att naturligt pH varierar kraftigt i tid och rum kan försurning inte mätas
- » Vi saknar tillförlitliga mätningar av pH från tiden innan försurning

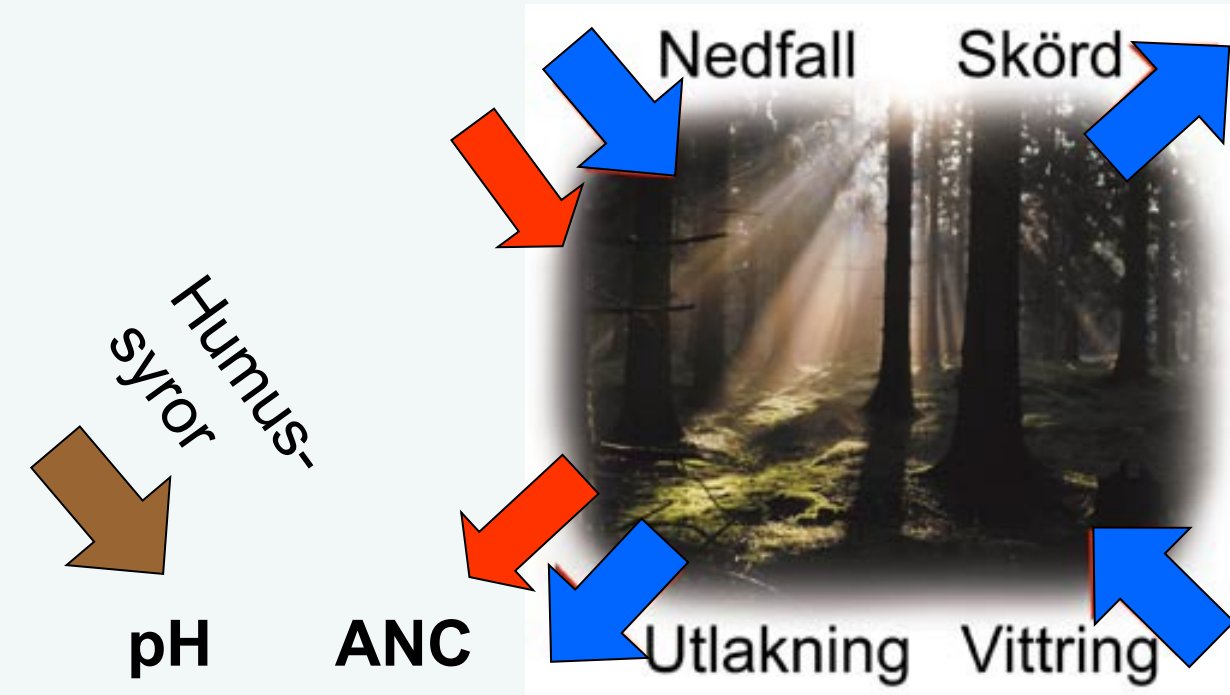
## Alternativ?

- » Biologiska förändringar via äldre dokumentation (muntlig/skriftlig) eller rester i sediment
- » Avsaknad av reproduktion för långlivade arter
- » Ger grova till mycket grova skattningar av naturliga pH-nivåer

# Försurningsmodeller

## MAGIC (Model of Acidification of Groundwaters in Catchments)

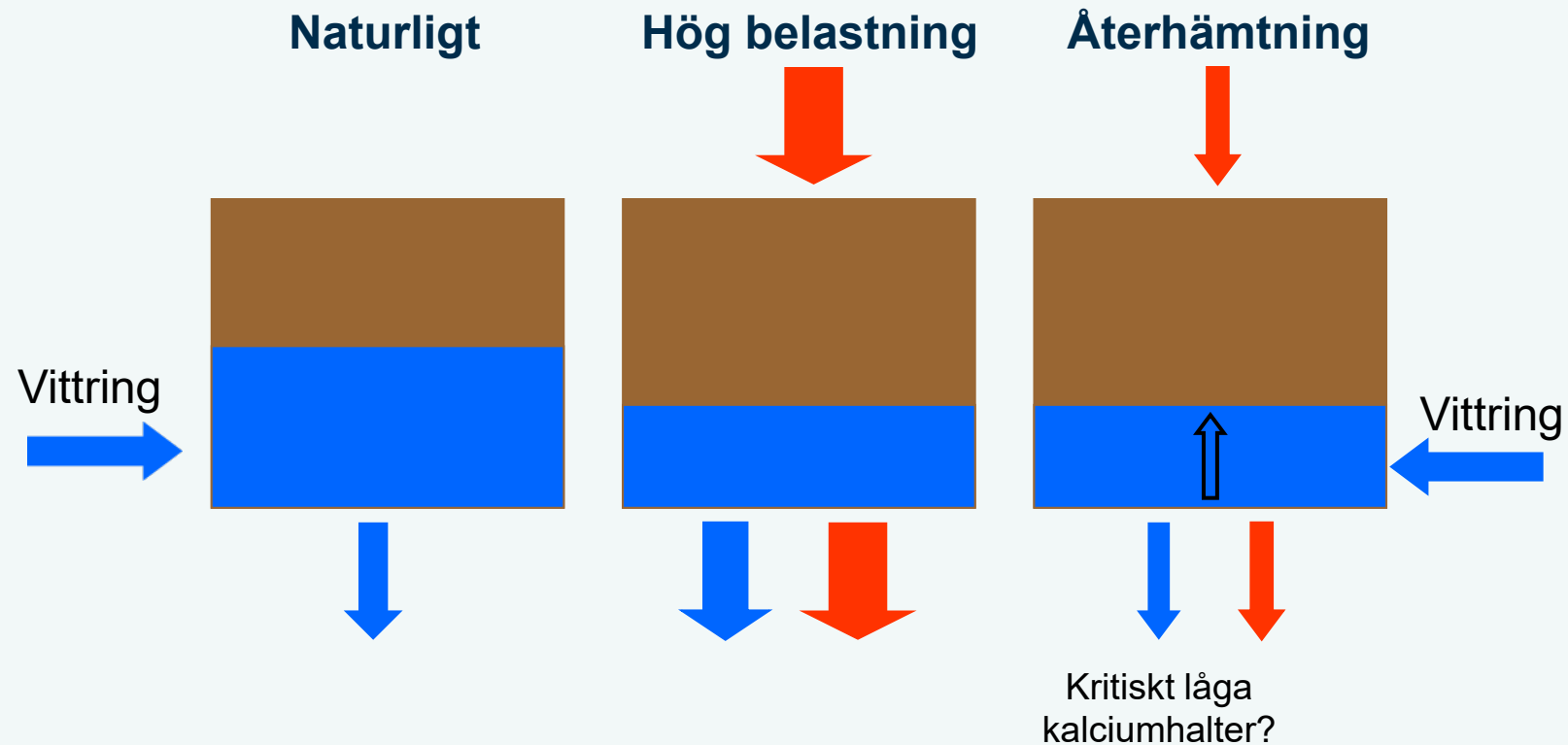
En budget för baskatjoner



Havs  
och Vatten  
myndigheten

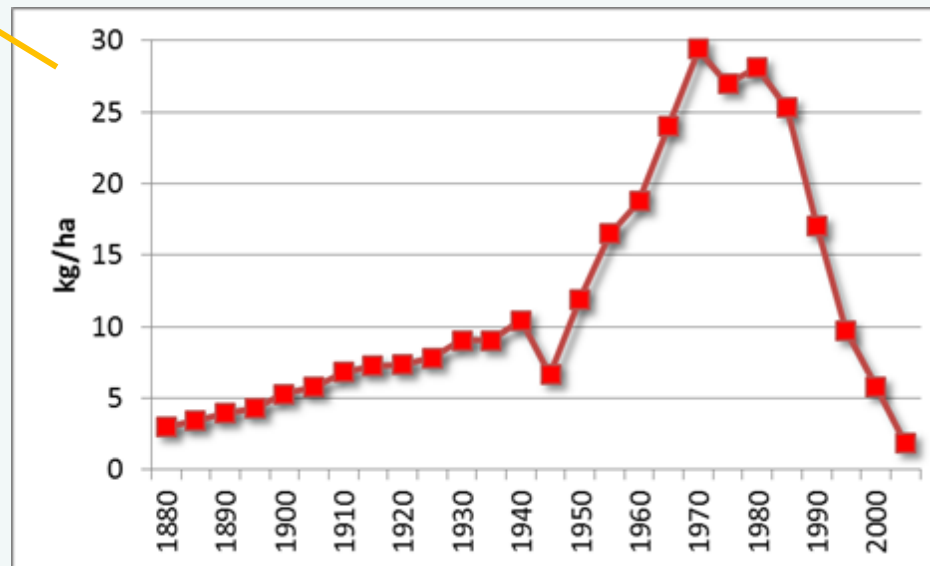
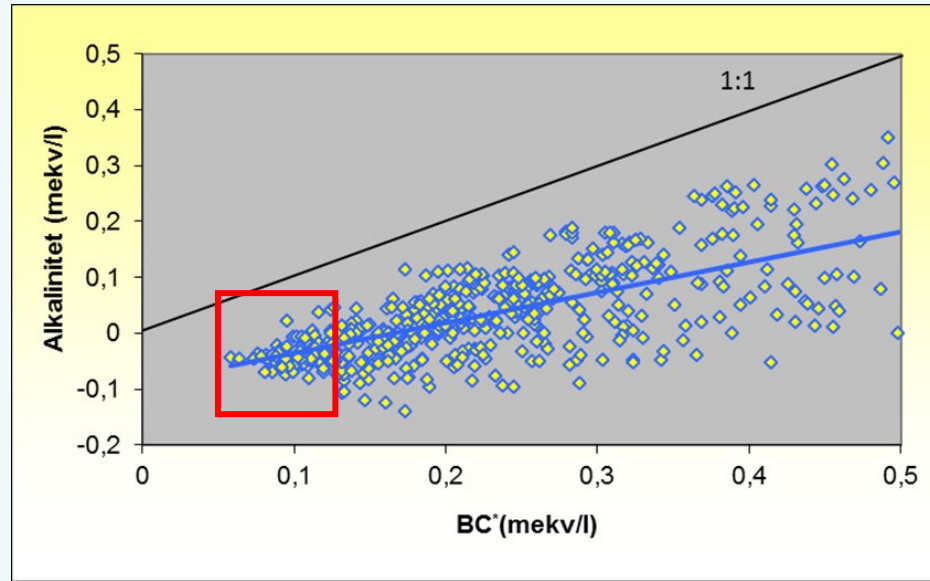
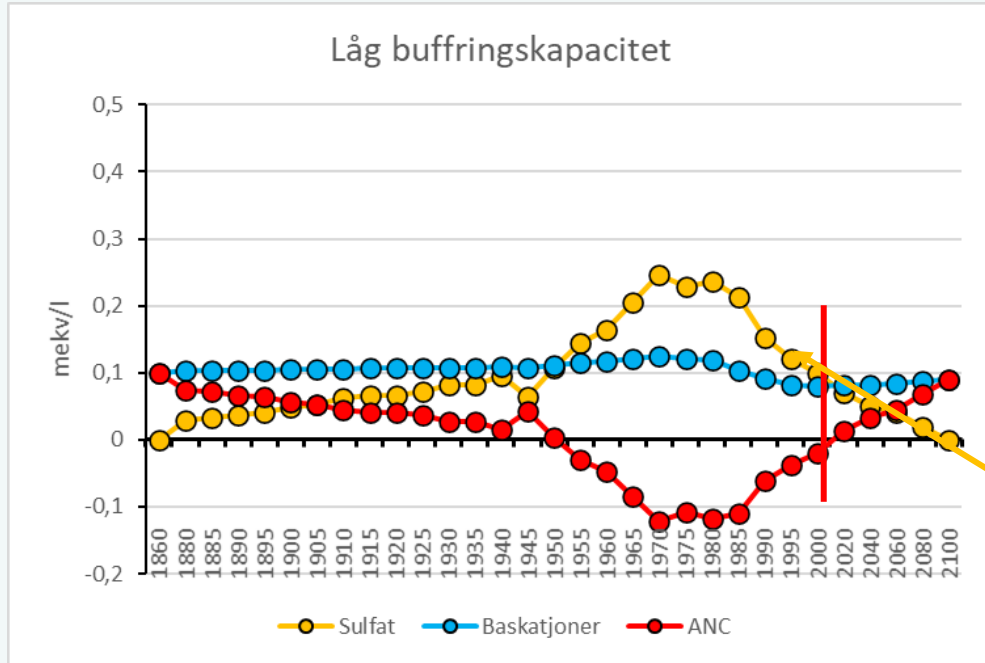
# Försurningsmodeller

## MAGIC (Model of Acidification of Groundwaters in Catchments)



Havs  
och Vatten  
myndigheten

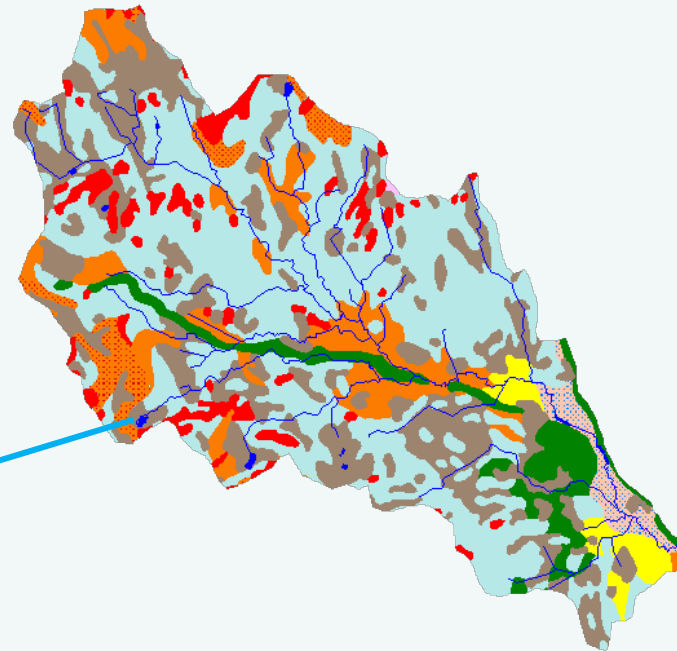
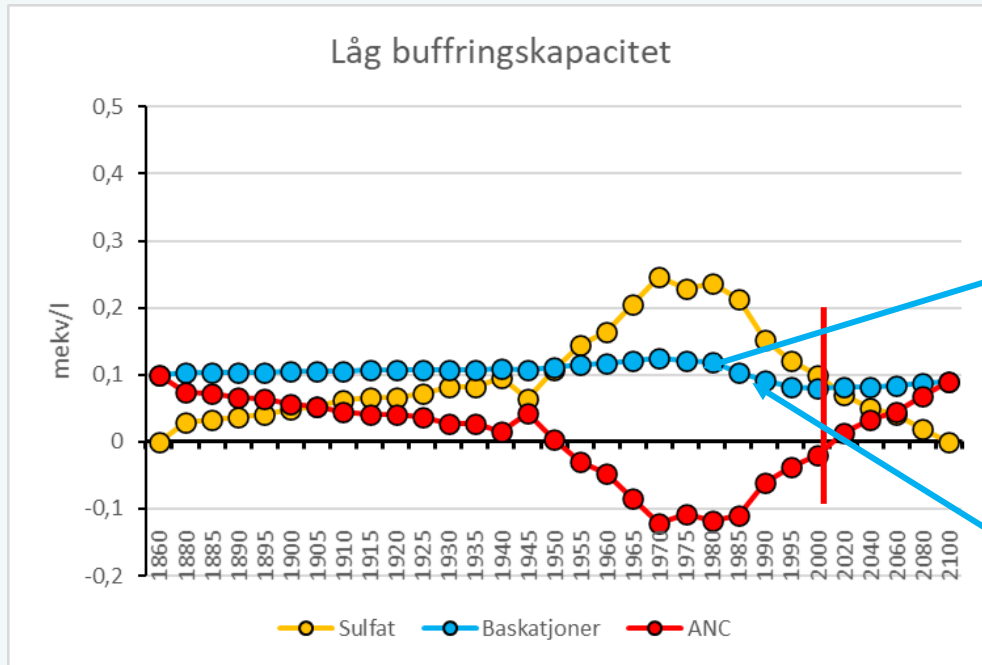
# Försurningsmodeller



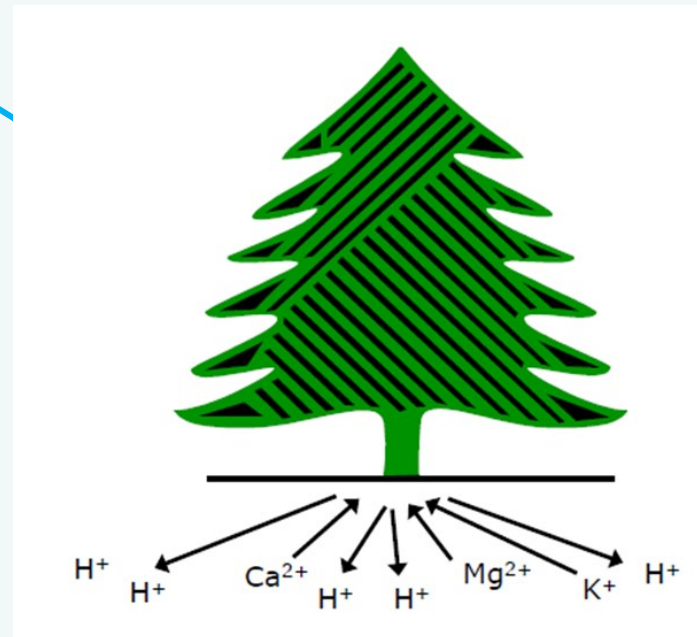
- ☐ Historiskt svavelnedfall, naturlig sulfathalt, fastläggning och frigöring av svavel i marken



# Försurningsmodeller

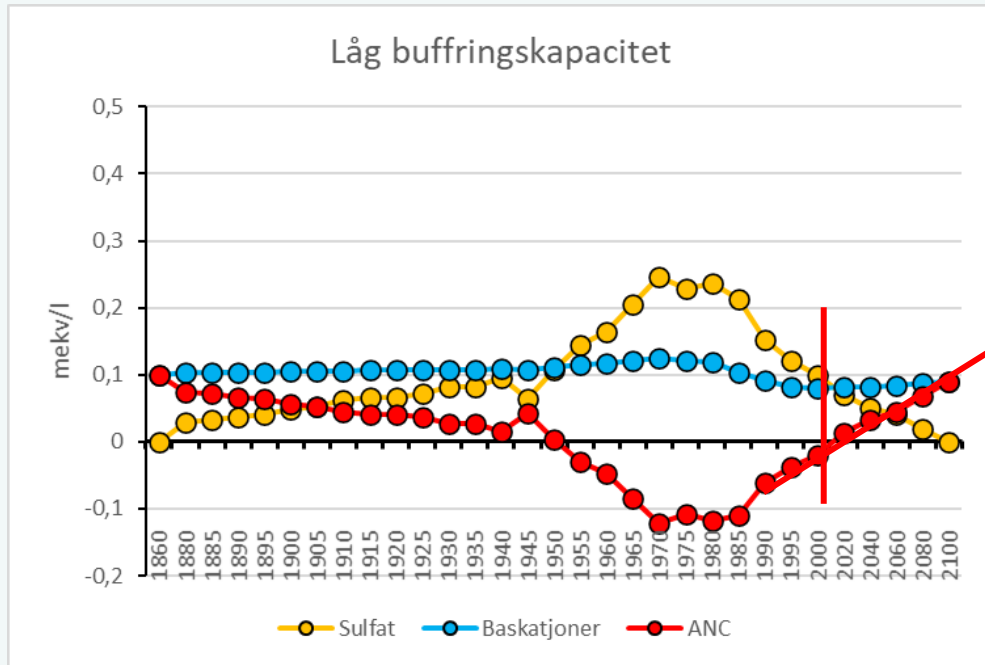


- ❑ Markdjup, densitet, porositet, katjonbyteskapacitet, mängden utbytbara baskatjoner
- ❑ Skogens upptag av baskatjoner

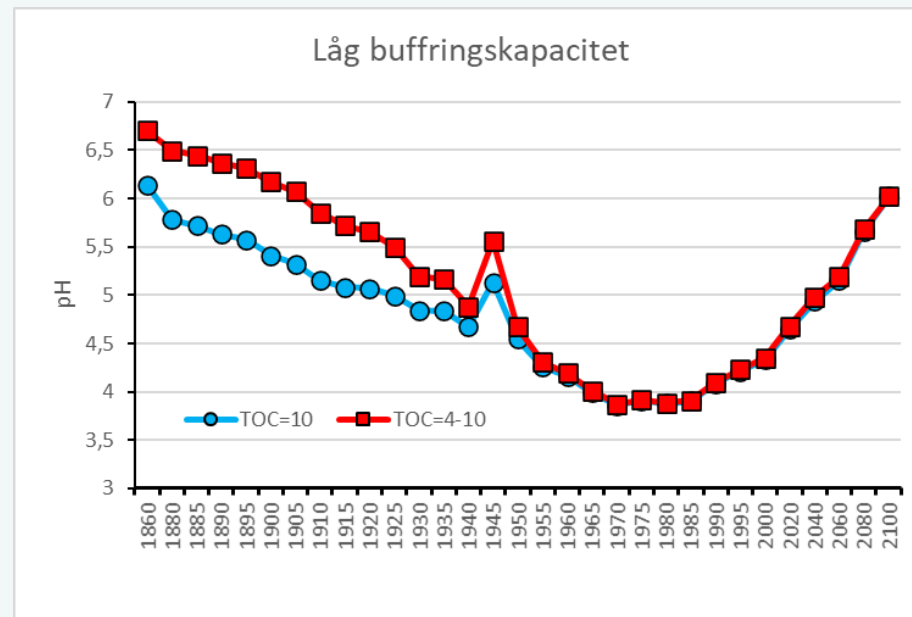
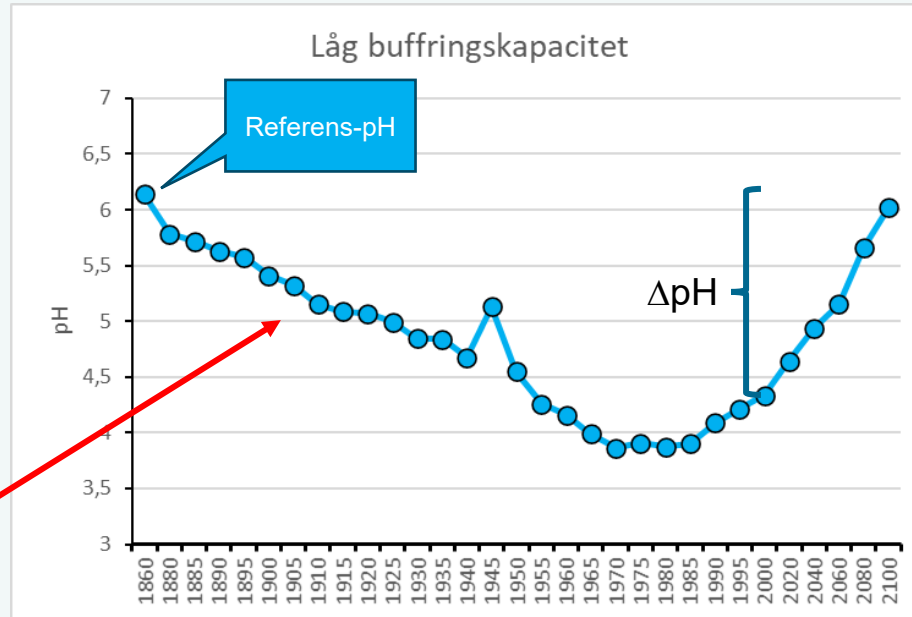


Havs  
och Vatten  
myndigheten

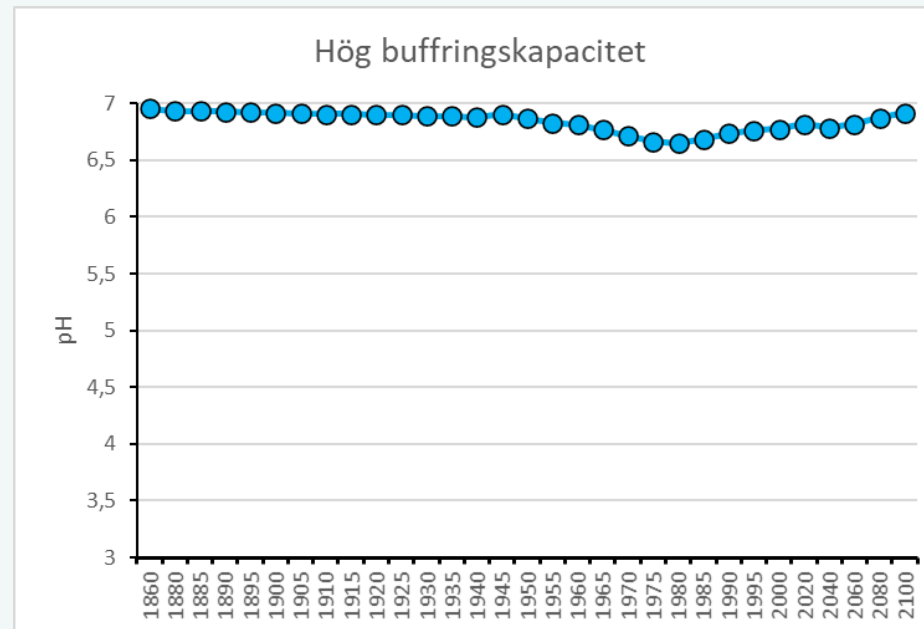
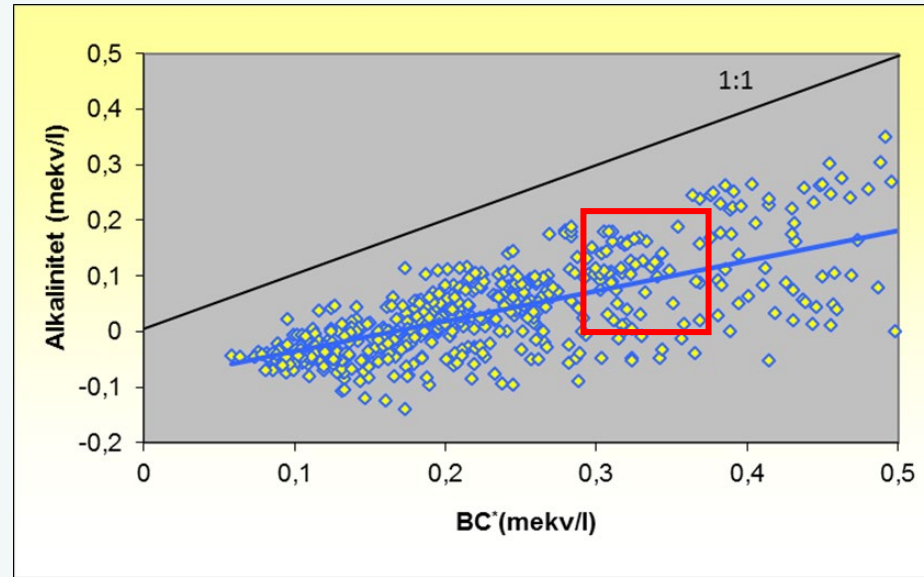
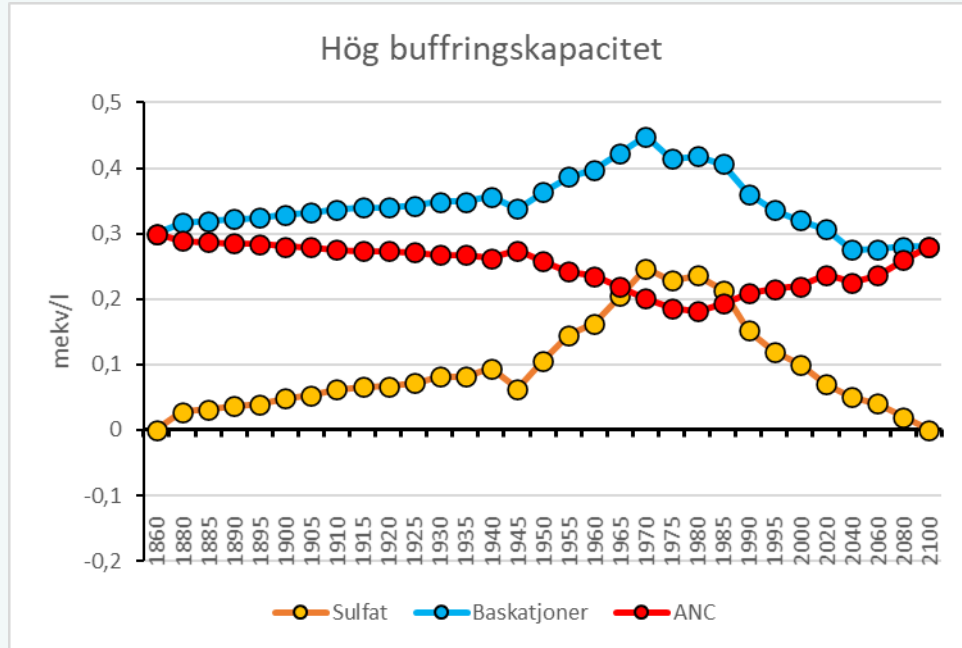
# Försurningsmodeller



- Förändringen i TOC
- Antag samma TOC som kalibreringsåret, ingen hänsyn till brunifieringen



# Försurningsmodeller



- Högre jonbyteskapacitet
- Lägre påverkan på ANC och pH



# Marken bestämmer

Svårvittrade markmineral och grovkorniga jordar ger dåligt skydd mot försurning

pH sjunker vid höga flöden

Ytlig och snabb vattentransport genom marken medför sänkt pH

Försurningsmodeller behöver inte vara dåliga, men uppdraget är omöjligt (Mission impossible)



# Återhämtning och nuläge

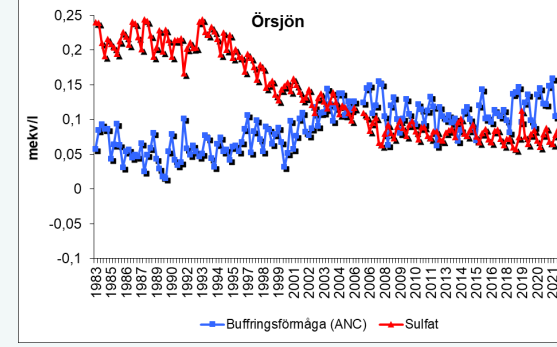
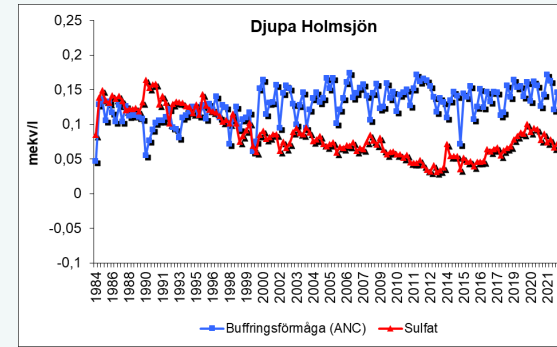
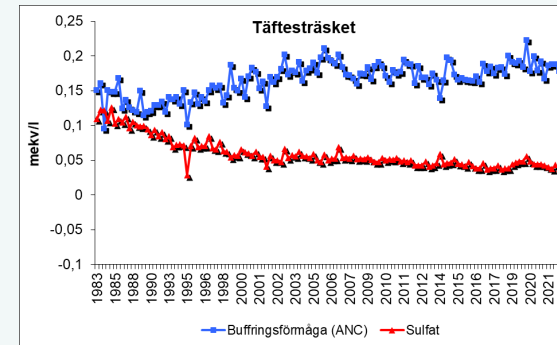
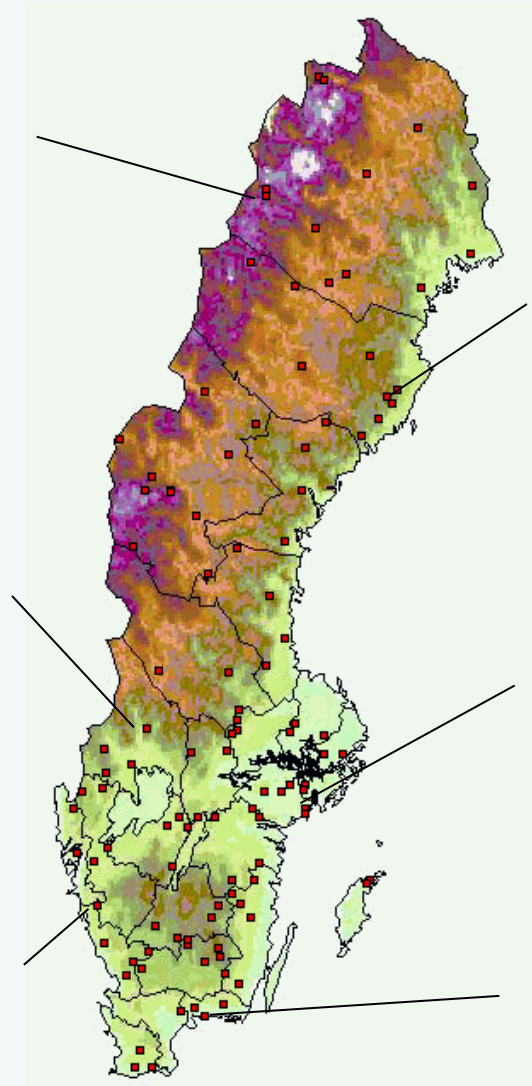
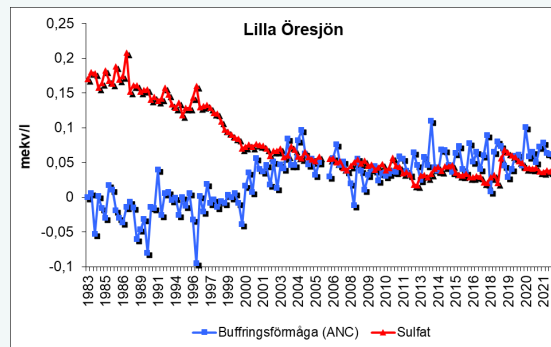
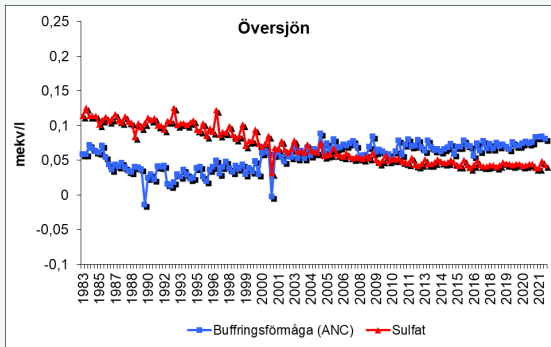
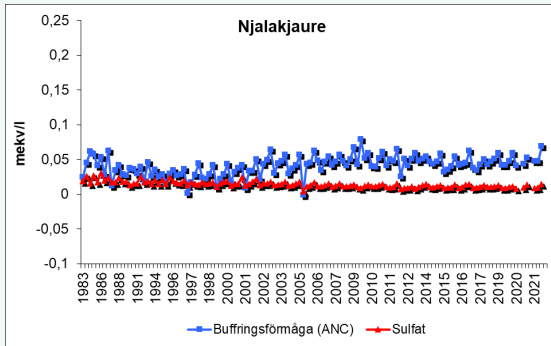
Uppmätta och modellerade trender i sjöar

Nuläge i sjöar

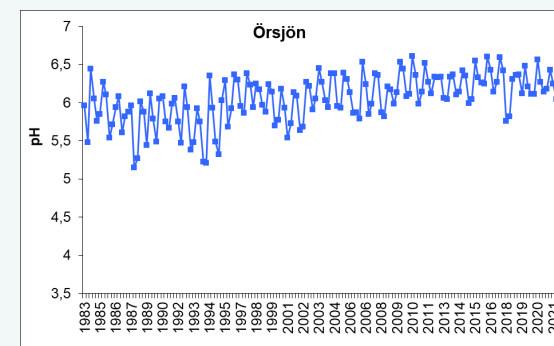
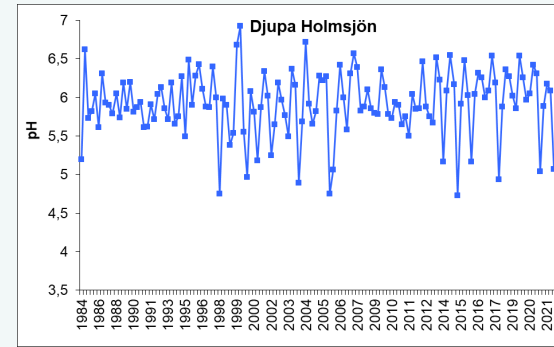
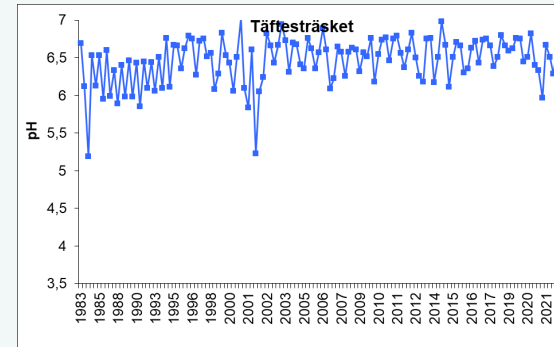
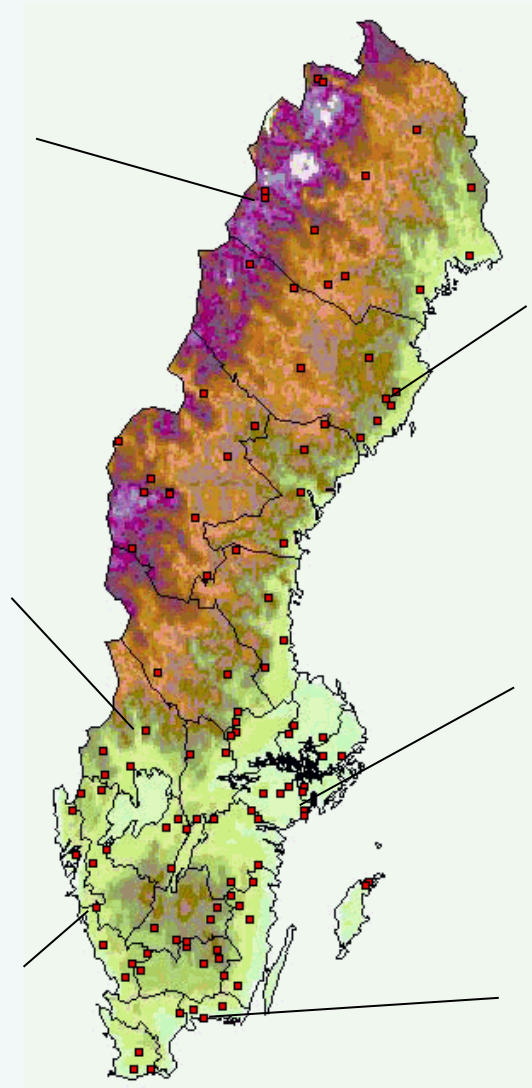
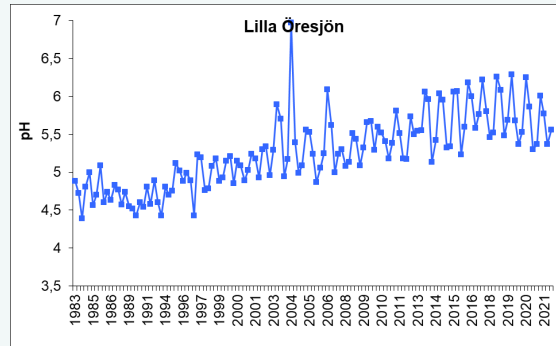
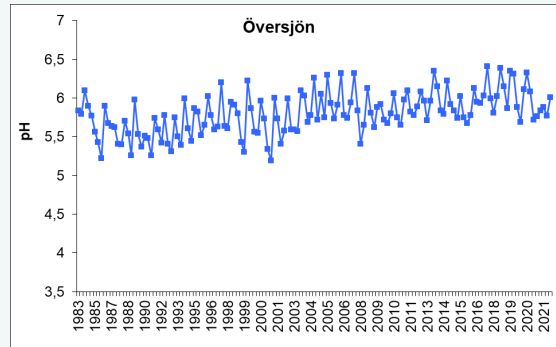
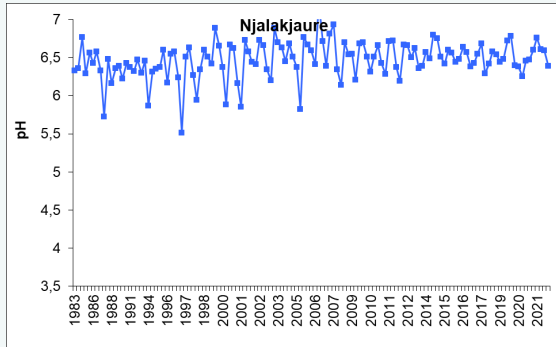
Surstötter i vattendrag



# Försurade sjöar – uppmätta trender

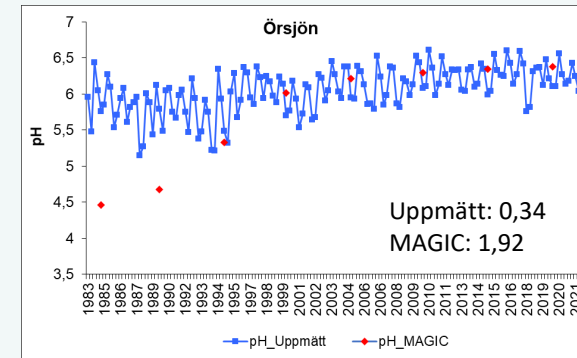
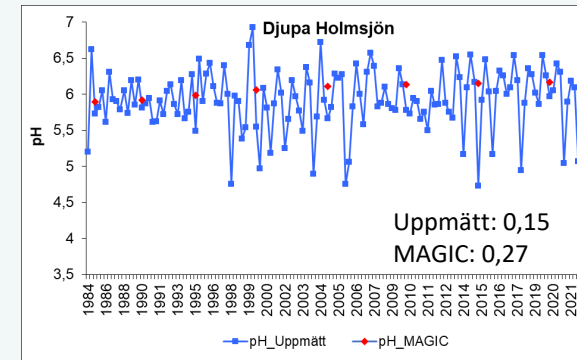
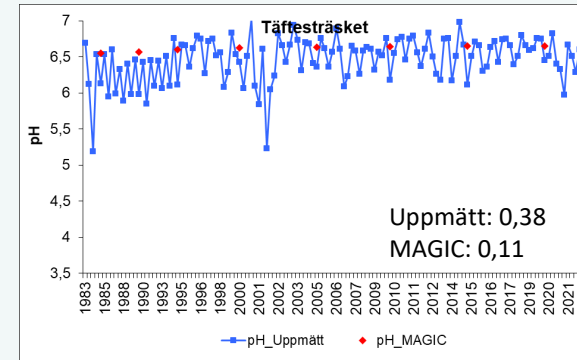
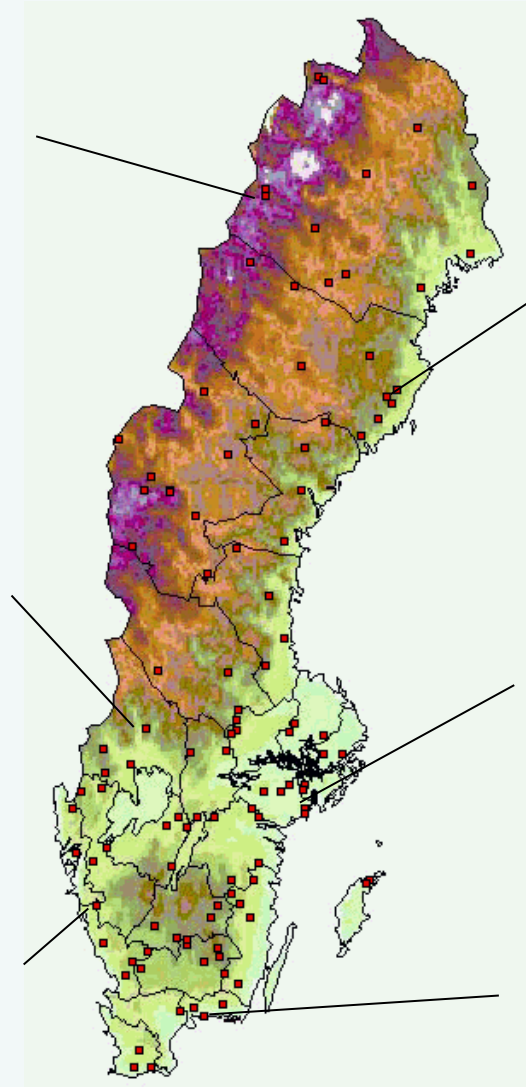
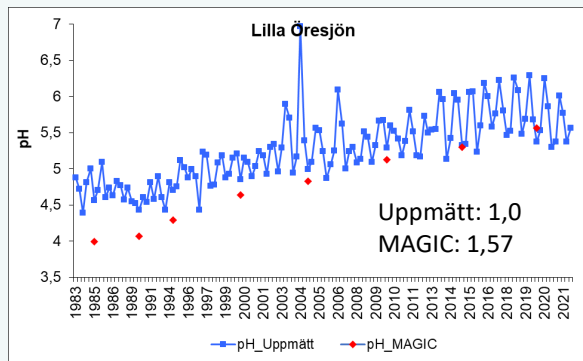
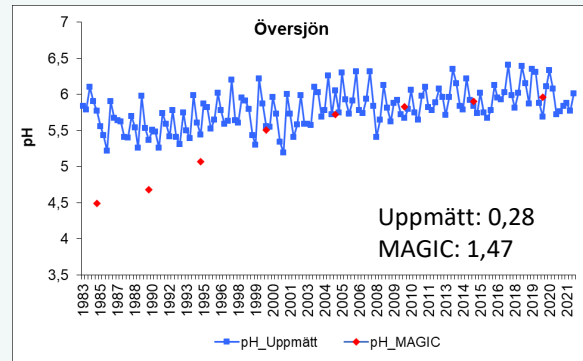
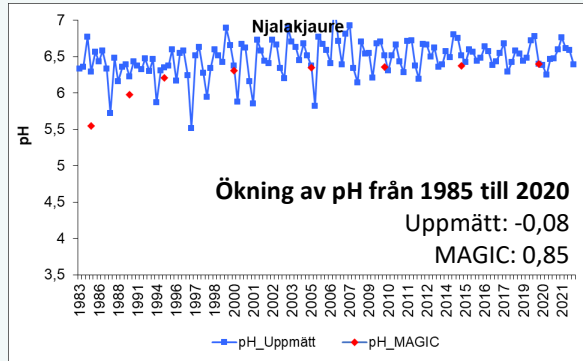


# Försurade sjöar – uppmätta trender

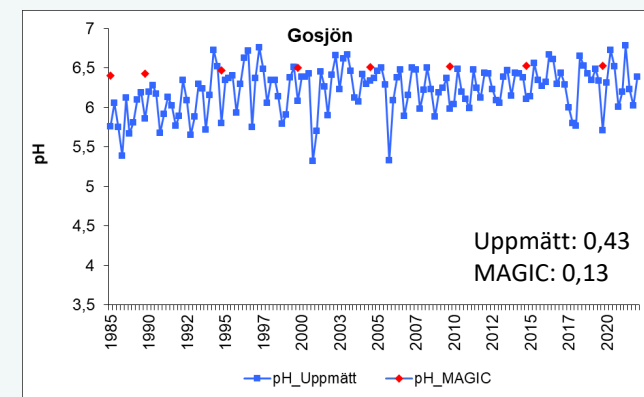
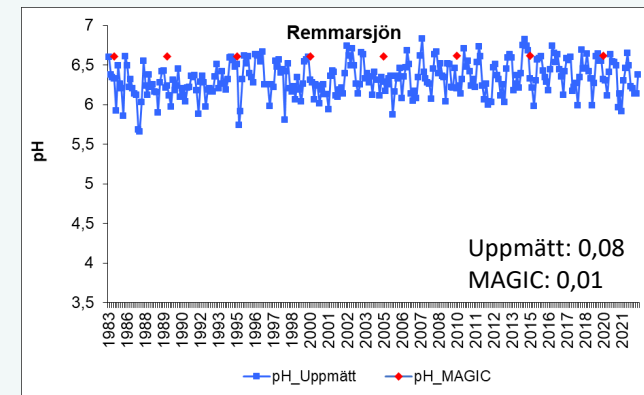
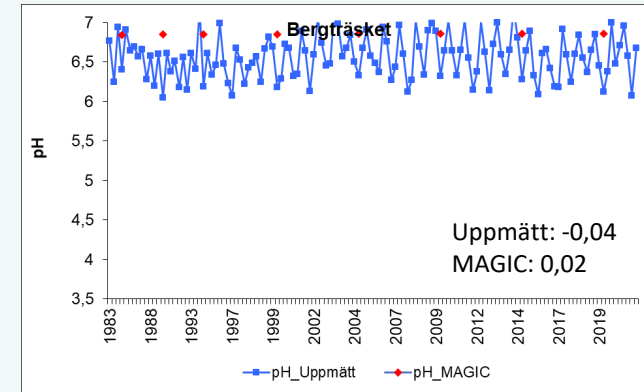
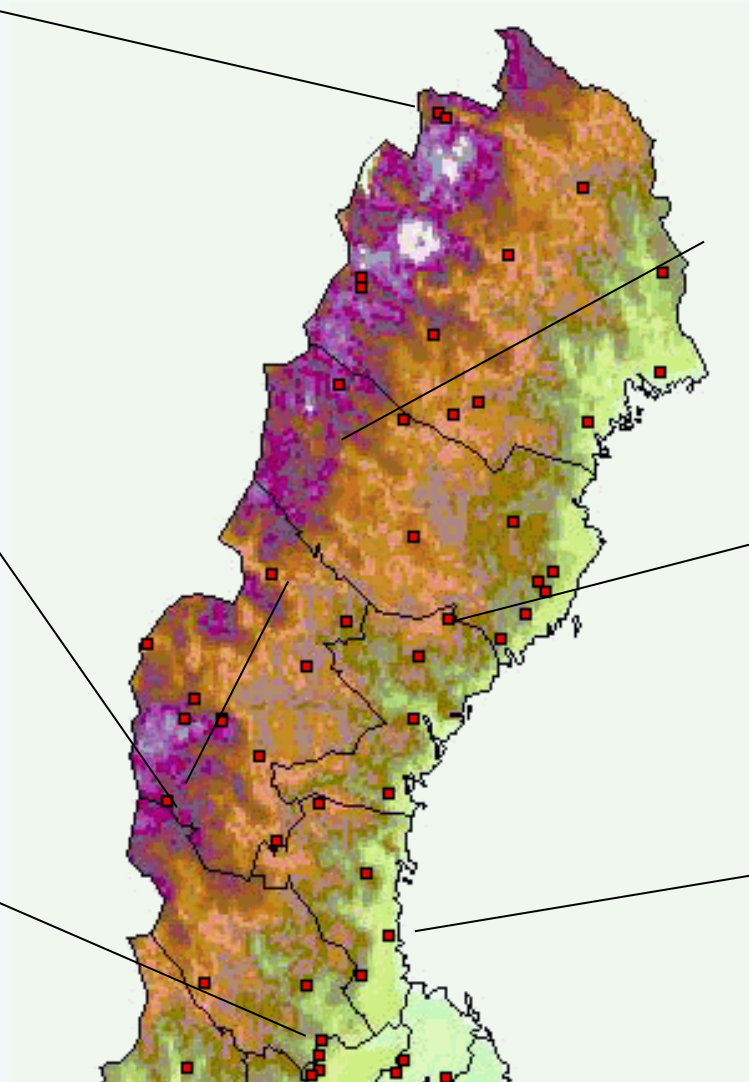
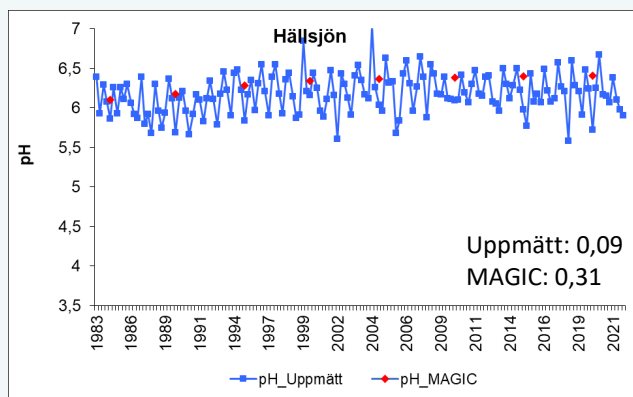
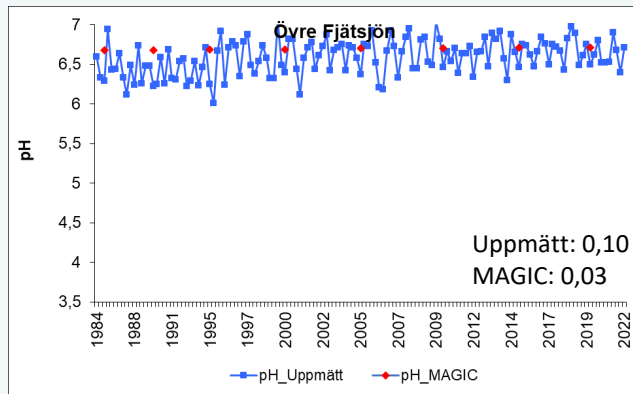
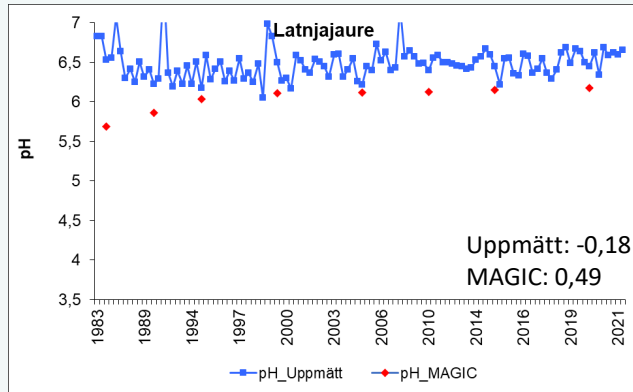




# Försurade sjöar MAGIC vs verkligheten



# Försurade sjöar MAGIC vs verkligheten

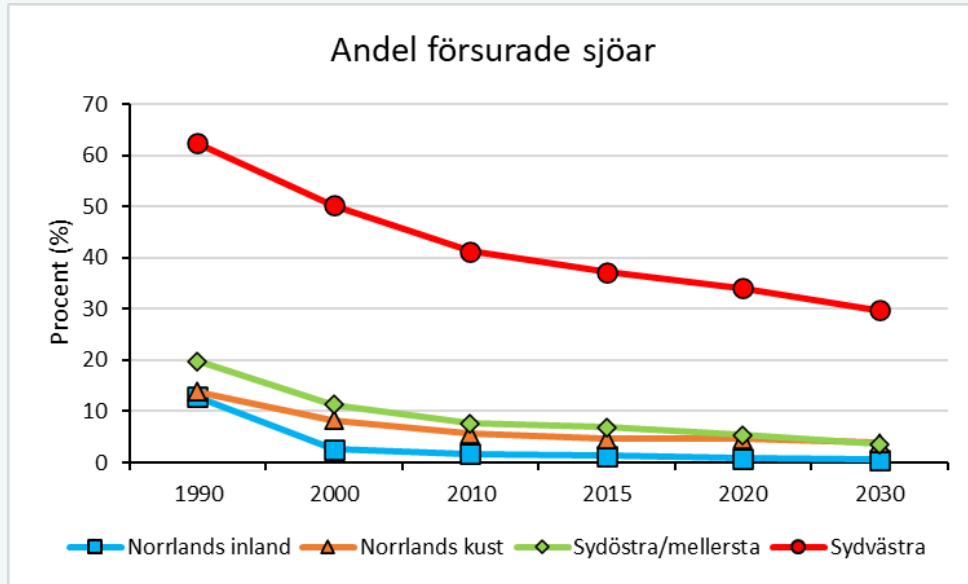


## Något att fundera på

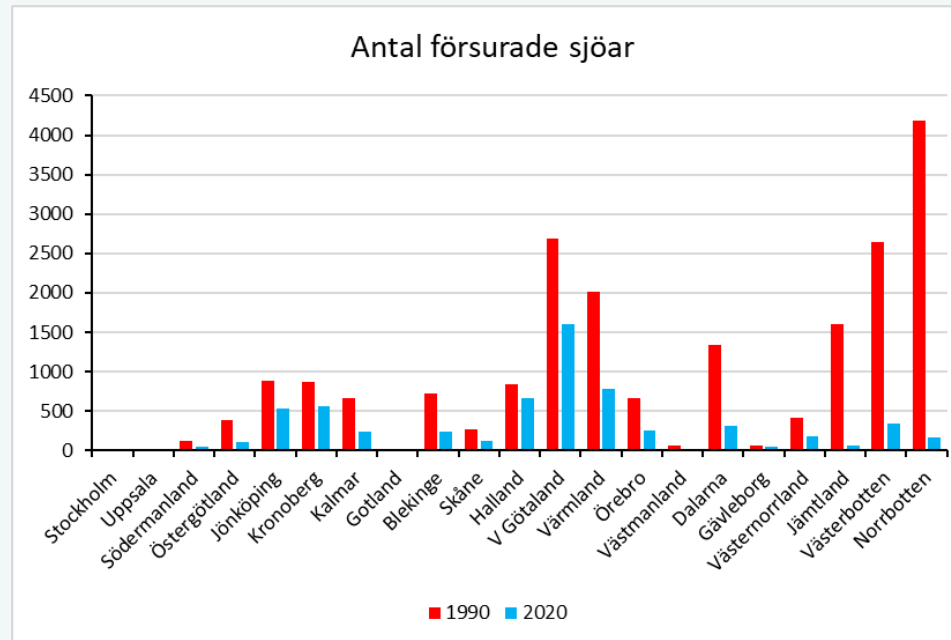
- » Är bristen på återhämtning sedan 1983 en indikation på att sjöarna aldrig försurats, eller finns det andra förklaringar?
- » Är MAGIC:s svaga överensstämmelse med uppmätta pH-värden en indikation på att även referens-pH ( $\text{pH}_{1860}$ ) är fel, eller?



# Försurade sjöar enligt MAGIC



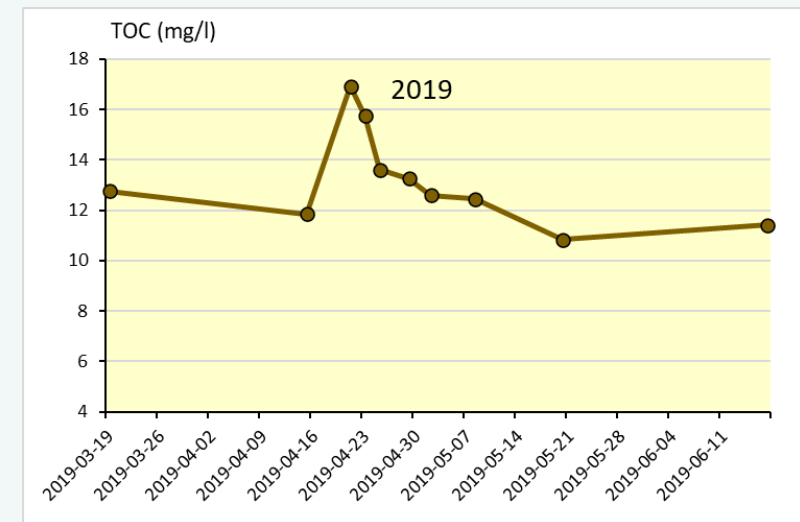
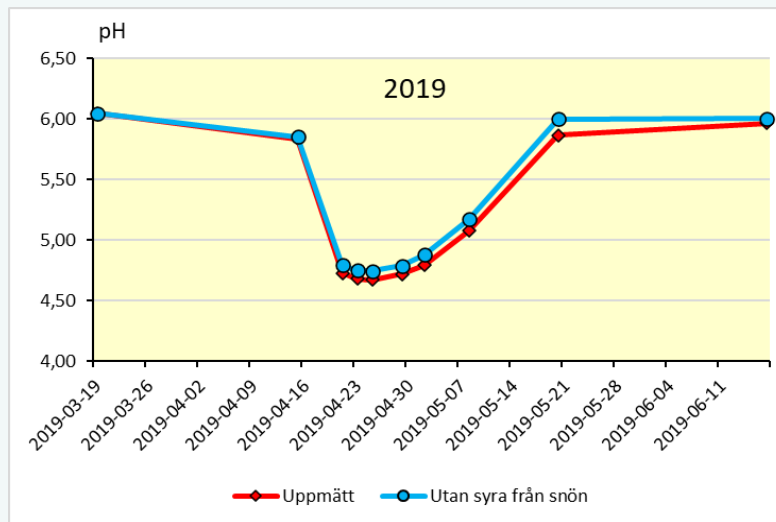
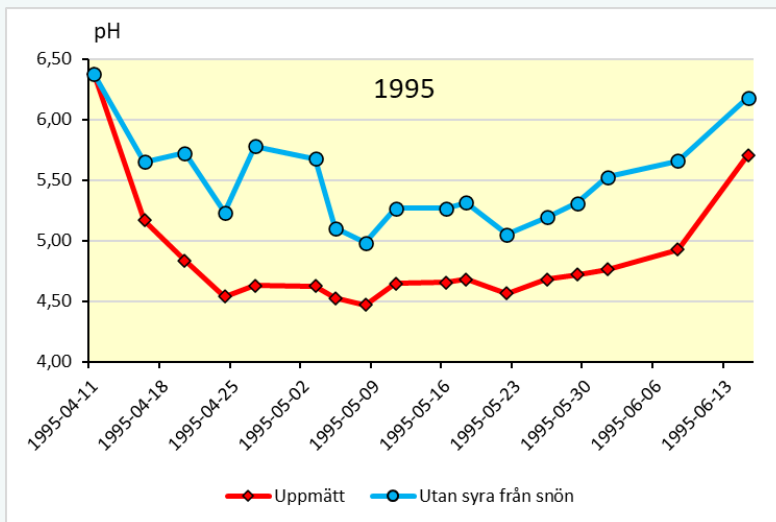
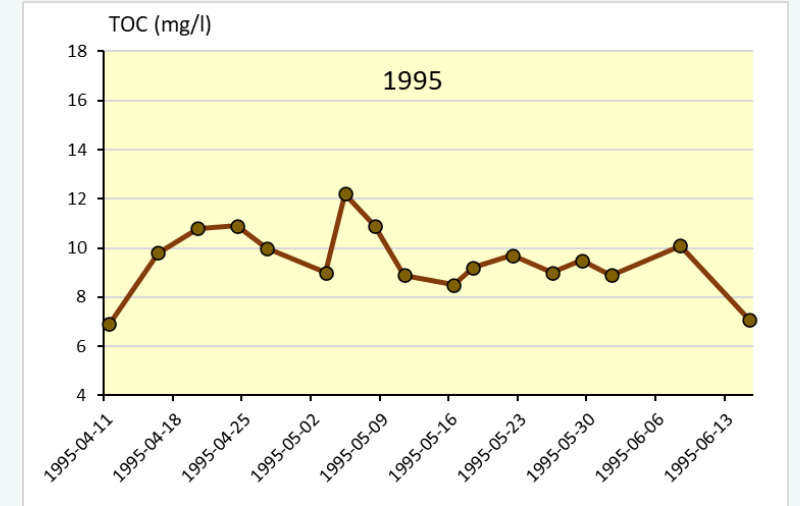
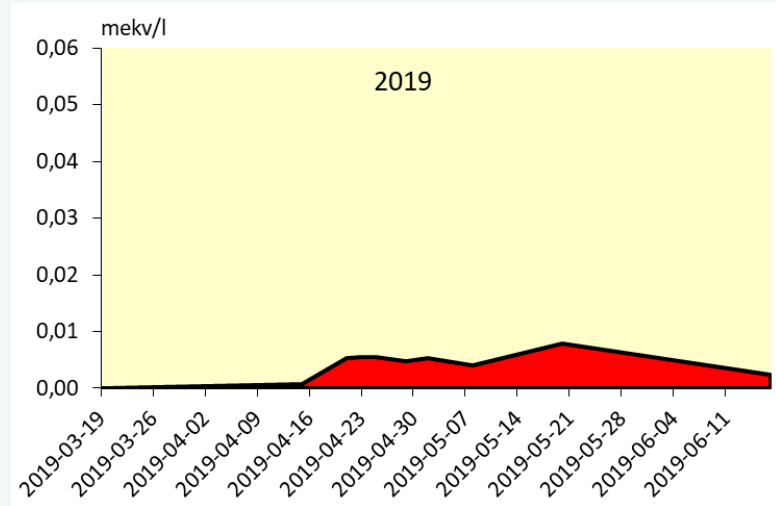
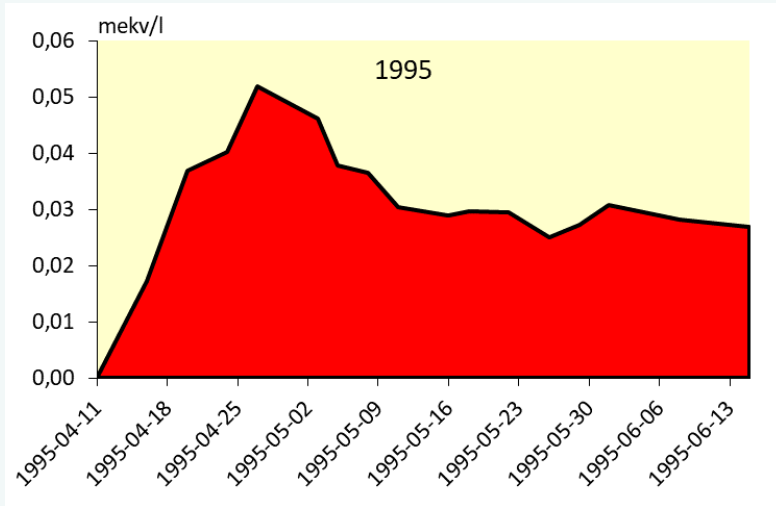
Omdrevsprogrammet: ca 5 000 sjöar  
 Försurningsbedömning med MAGIC-biblioteket  
 6,7 % försurade sjöar (år 2020)  
 Försurad: Minskning i pH >0,4 enhet sedan 1860



## Men vattendragen då?

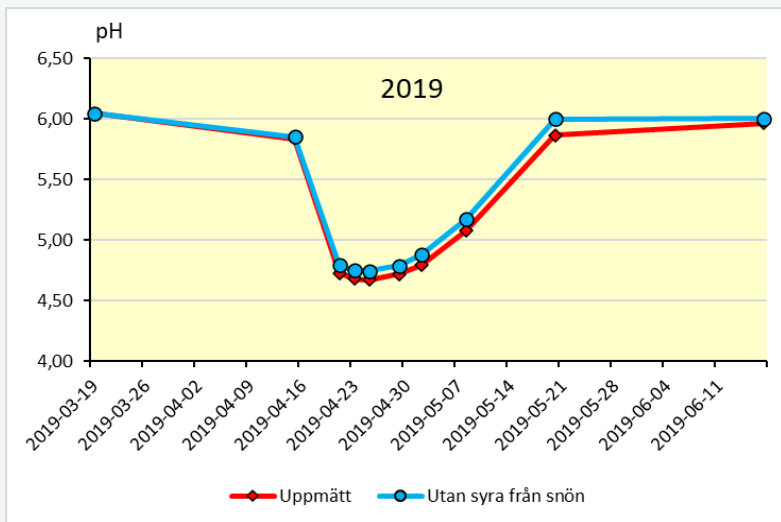
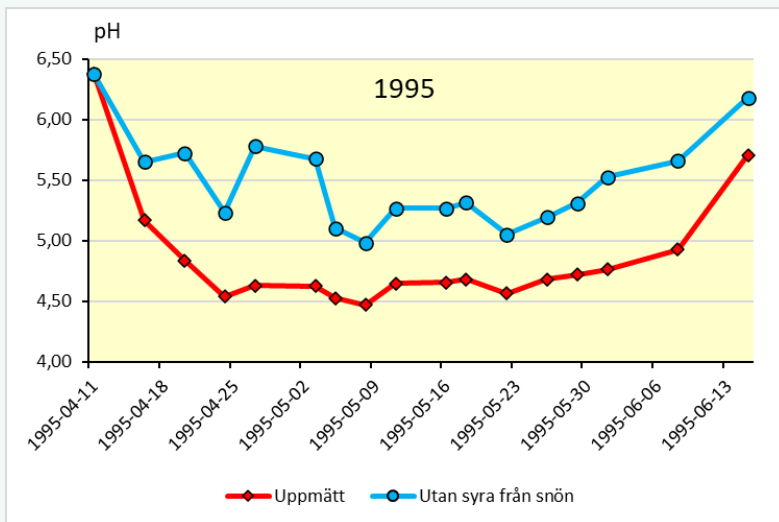
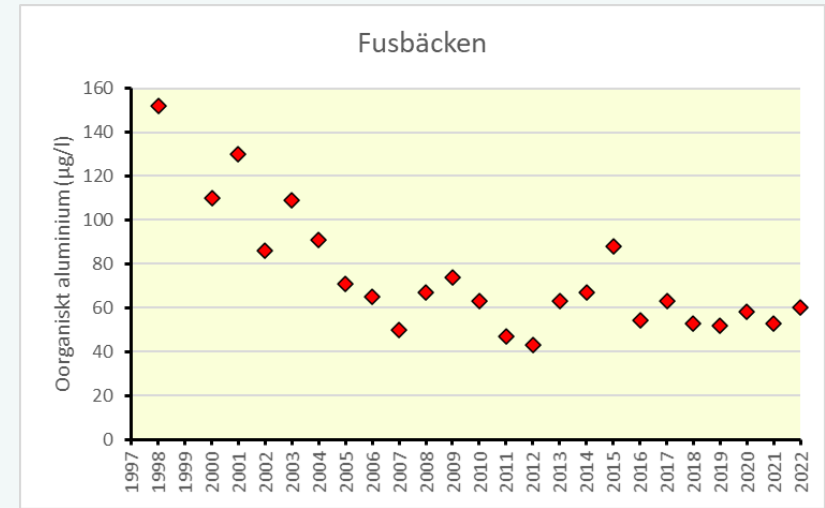
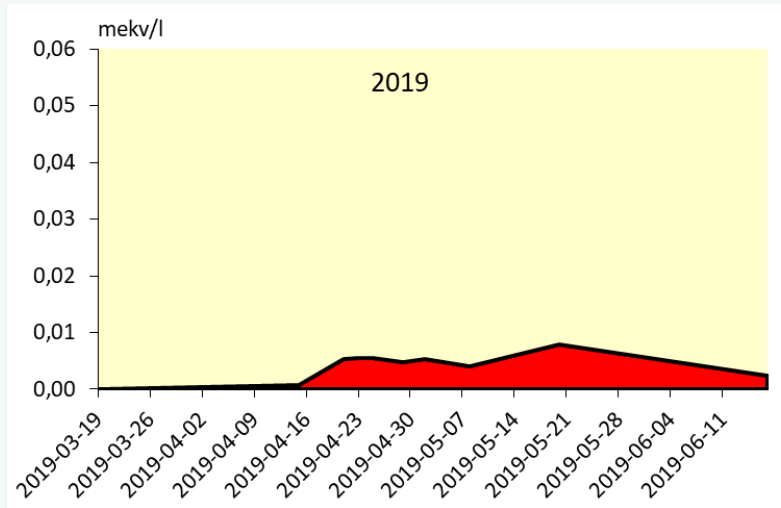
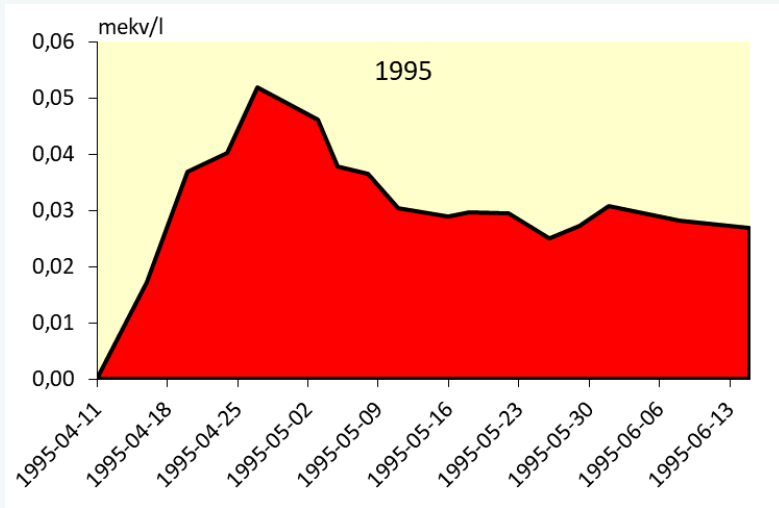
- » Ungefär lika stor (liten) återhämtning som sjöarna avseende årsmedelvärde
- » MAGIC modellerar årsmedelvärden, inte extremvärden
- » Men den biologiska effekten beror främst på förhållandena under surstötarna
- » Försurningens betydelse vid surstötar under vårfloden har minskat

# Försurningens betydelse under vårfloden





# Försurningens betydelse under vårfloden



## Men vattendragen då?

- » Ungefär lika stor (liten) återhämtning som sjöarna avseende årsmedelvärde
- » MAGIC modellerar årsmedelvärden, inte extremvärden
- » Men den biologiska effekten beror främst på förhållandena under surstötarna
- » Försurningens betydelse vid surstötar under vårfloden har minskat
- » I områden med försurad mark kan försurningseffekter uppträda efter perioder med torka och vid tillförsel av havssalter

A scenic photograph of a calm lake. In the foreground, a wooden boat is beached on a sandy shore, with its reflection clearly visible in the water. The background features a dense line of green trees under a bright blue sky with scattered white clouds. The water is still, reflecting the sky and the surrounding greenery.

**Återhämtningen i sjöar sedan 1983 har  
bara varit betydande längs västkusten**

**MAGIC överskattar återhämtningen i stora  
delar av landet**

**Försurningens betydelse under vårfloden  
har minskat kraftigt**





**Jag kör Opel och inte DeLorean och kan  
därför inte berätta för Er vilka vatten som  
är försurade och hur pH var 1860**

Havs  
och Vatten  
myndigheten