

DTU





Miljø og Bæredygtighed
Modul 2 til 4

6. februar, 2024

Anders Damgaard (Adam@dtu.dk)

Introduktion til Massestrømsanalyse

Indhold – Modul 2 til 4

Modul	Indhold	Opgaver	Læsestof og hjemmearbejde
2	<ul style="list-style-type: none"> • Introduktion, formål og anvendelse af MFA • Terminologi, begreber og definitioner • Introduktion til Afleveringsopgave – Fase 1 	1.1 til 1.4 Arb. med Afleveringsopgave	Kap. 1 Introduction pp.1-28 Afleveringsopgave Fase 1
3	<ul style="list-style-type: none"> • Kort introduktion til MFA software: STAN • Praktiske opgaver MFA • Arbejde m. Afleveringsopgave – Fase 1 	2.1 til 2.4 Arb. m. afleveringsopgave.	Kap. 2 Methodology of MFA pp. 35-53
4	<ul style="list-style-type: none"> • Arbejde m. Afleveringsopgave – Fase 1 • Gennemgang af regler for plagiering 	Arb. m. afleveringsopgave.	

Læringsmål

Efter gennemgang af modul 2 til 4, skal de studerende kunne:

- Forstå grundprincippet i MFA som metode samt kende til anvendelsesmuligheder i forbindelse med miljøforvaltning, ressource og affaldshåndtering
- Udføre MFA på simple systemer dvs. udføre en systemanalyse, designe og definere processer, flows og beholdninger for et afgrænset system
- Kende til programmet STAN

Massestrømsanalyse

- Modul 2
- 1. Introduktion, formål og anvendelse

Hvad er MFA?

- Værktøj til systematisk vurdering af materiale- og stofstrømme og beholdninger inden for et system afgrænset i tid og sted
- Følger et stofs livscyklus fra kilde (ex. mine), gennem processer og beholdninger til endelig slutsted (dræn)
- Overblik over vigtige puljer, udledninger, akkumulering, udtømning af ressourcer, mm.
- Bygger på loven om massebevarelse og udføres ved at opstille massebalancer (definerer input, output, beholdninger for processer)
- $\text{Input} = \text{output} \pm \text{ændring i beholdning}$

Hvor anvendes MFA?

- Miljøforvaltning og miljøteknologi
 - Ressourceforvaltning
 - Affaldshåndtering
 - Industriel økologi og design
-
- Anvendes på systemer af forskellig skala (menneske, tekniske anlæg, industri, by, region, national, global)
 - Eksempler:
 - Masseopgørelser (metaller (Cd, Cu, Pb), miljøfremmede stoffer (dioxiner, CFC'er), næringsstoffer (N, P, organisk stof), materialer (papir, plast, glas, drikkevand))



Preliminary assessment of plastic material flows in Denmark Technical Report

Ministry of Environment
and Food of Denmark
Environmental
Protection Agency

Environmental Project
no. 2090
June 2019

Hvor anvendes MFA?

MFA kan bruges i forbindelse med beslutningstagning, men må oftest kobles med analyse af:

- Miljøeffekter i form af LCA
- Risikovurdering
- Energistrømme
- Økonomiske forhold
- Socioøkonomiske forhold
- Fysisk planlægning

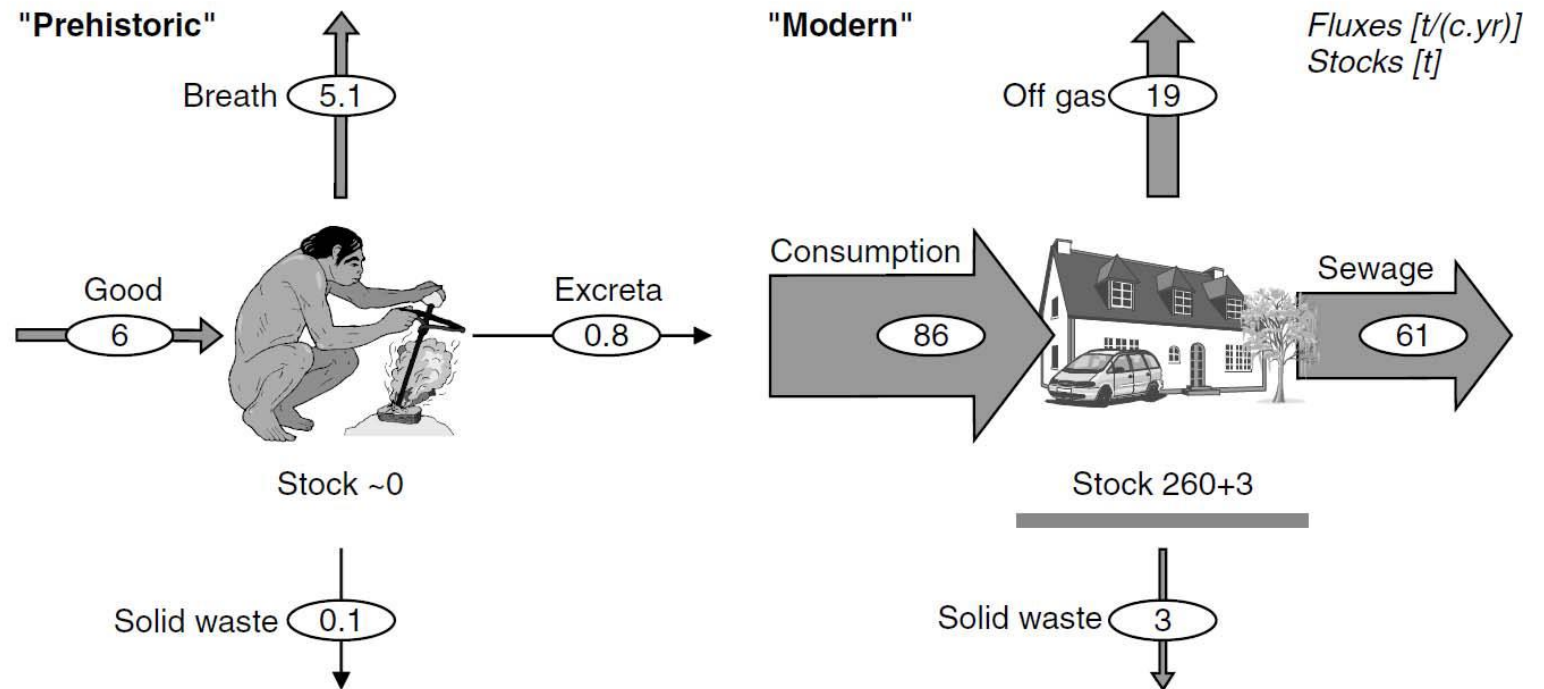
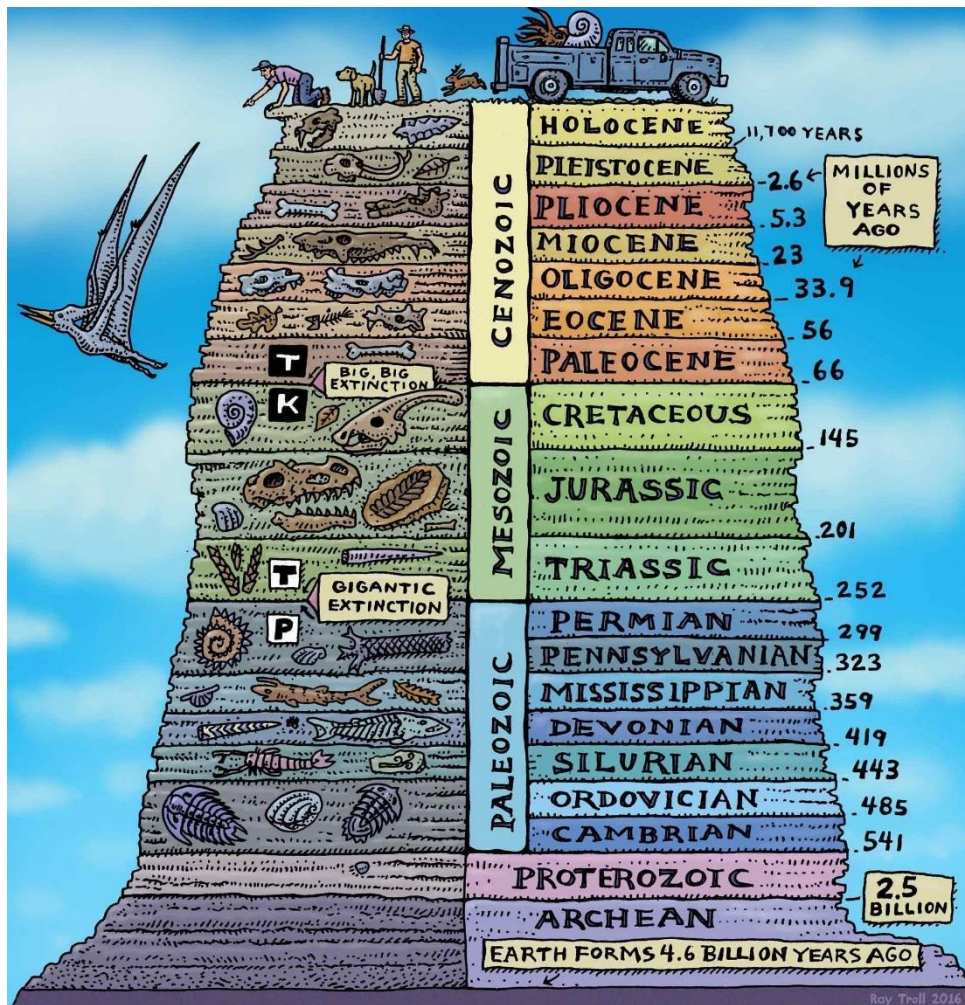
slido



**Hvilket materiale forbruger vi mest af?
Diskuter med din sideperson og skriv
et/flere svar**

① Start presenting to display the poll results on this slide.

Den antropogene metabolisme



Den antropogene metabolisme

- Større massestrømme samt akkumulering i moderne samfund

Material Flows and Stocks for Selected Activities of Modern Man

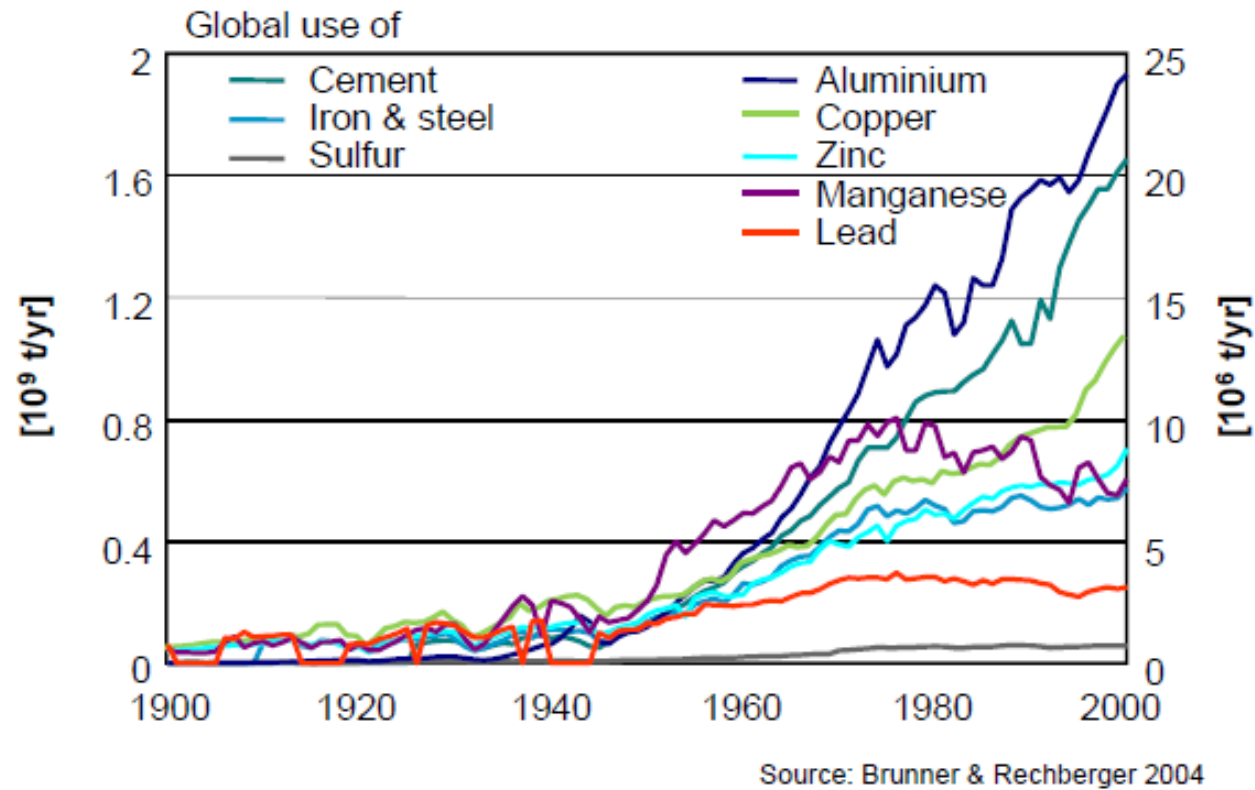
Activity	Input, t/(c.yr)	Output, t/(c.yr)			Stock, t/Capita
		Sewage	Off Gas	Solid Residues	
To nourish ^a	5.7	0.9	4.7	0.1	<0.1
To clean ^b	60	60	0	0.02	0.1
To reside ^c	10	0	7.6	1	100 + 1
To transport ^d	10	0	6	1.6	160 + 2
Total	86	61	19	2.7	260 + 3

Note: The most outstanding and unprecedented feature of today's economies is the very large stock of material that has accumulated in private households.⁶⁵

Ref: Brunner & Rechberger 2016

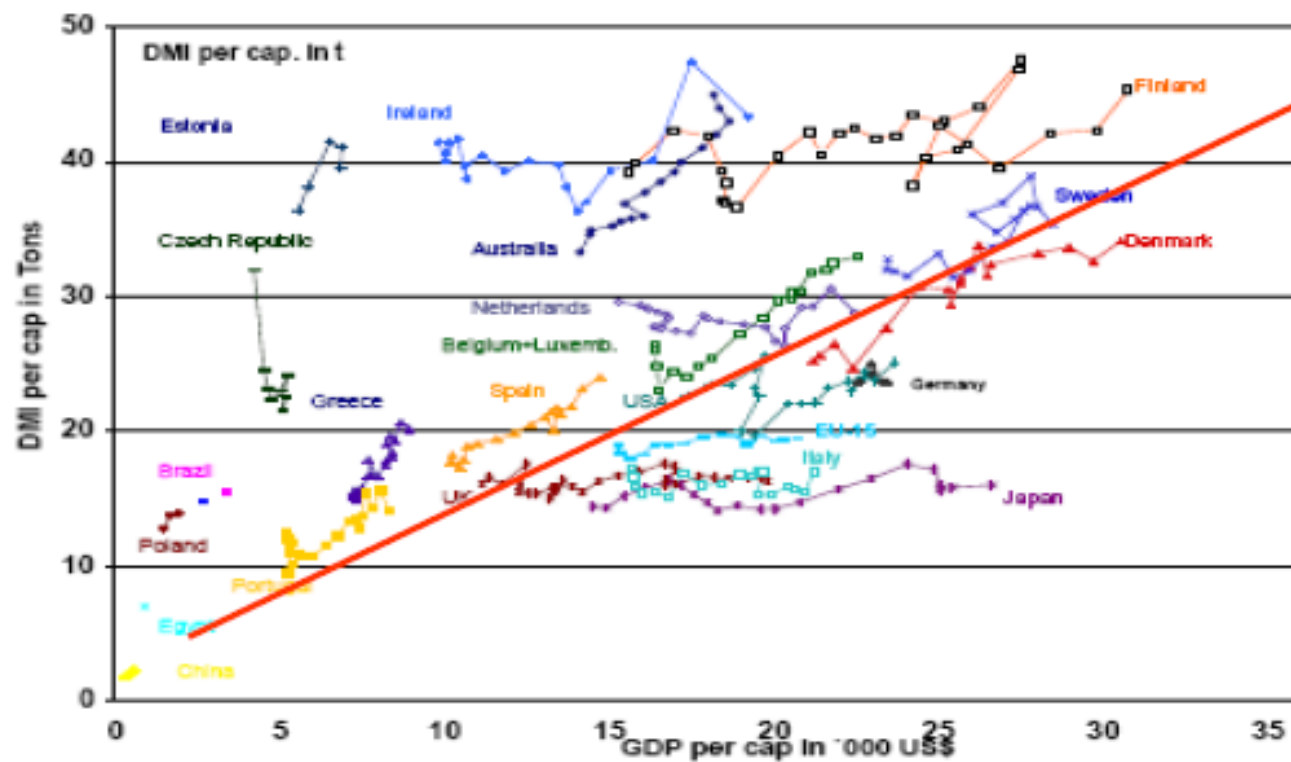
Den antropogene metabolisme

- Hurtig vækst i ressourceforbruget



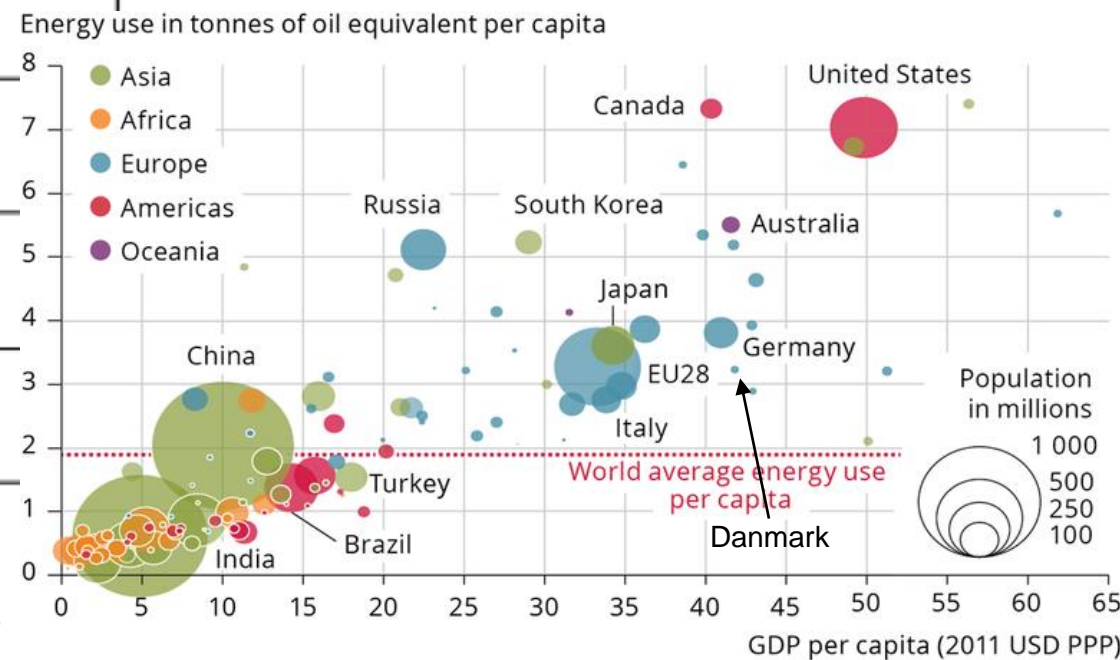
Den antropogene metabolisme

- Økonomisk vækst er stærkt koblet med ressourceforbrug



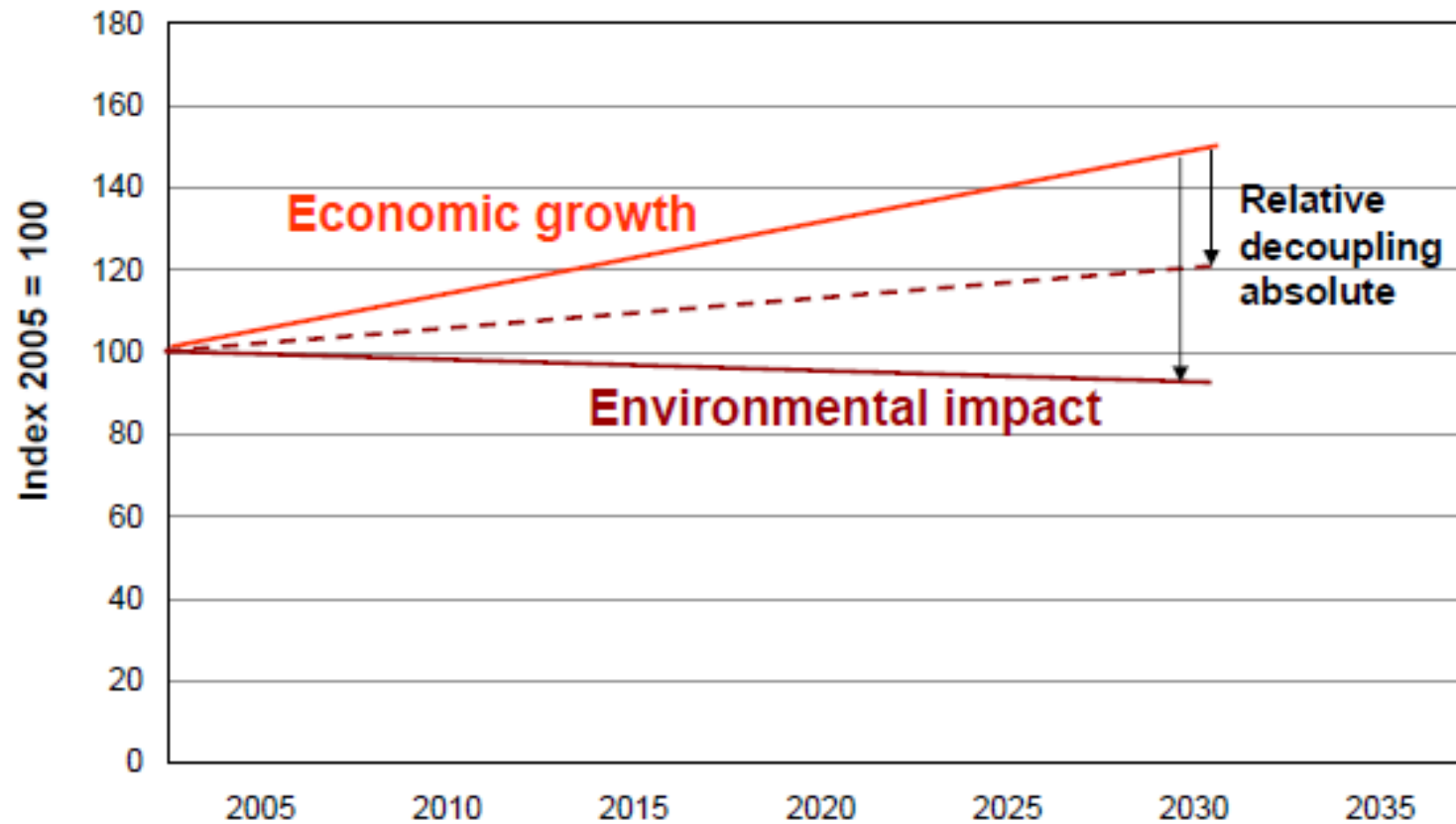
DMI: Direct Material Input, GDP: Gross Domestic Product

<https://www.eea.europa.eu/soer/data-and-maps/figures/correlation-of-per-capita-energy>

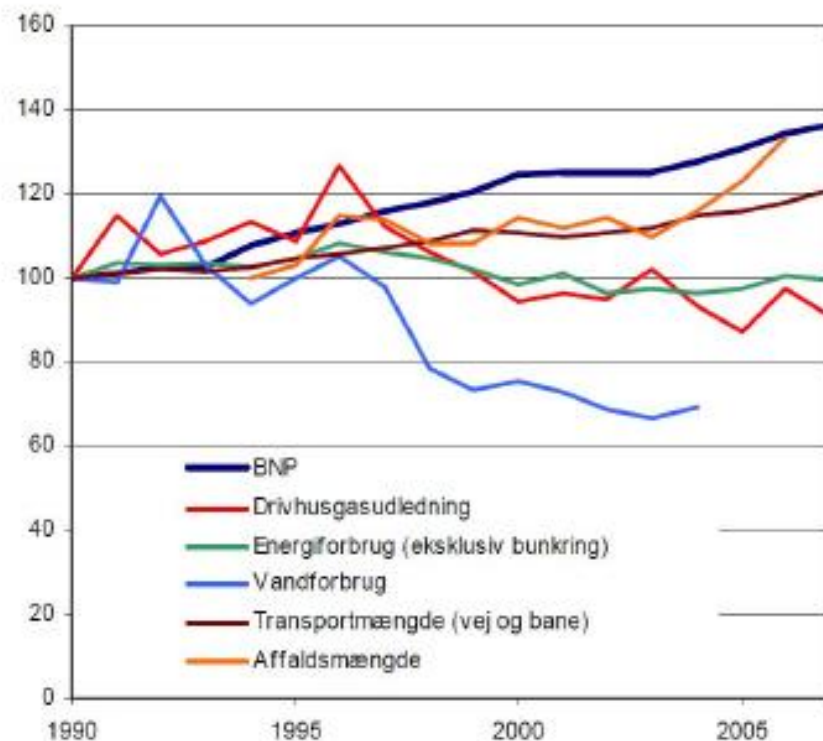


Den antropogene metabolisme

- **EU – strategy for resources:** Absolute decoupling of the environmental impact through the use of resources and the economic growth until 2030



Den antropogene metabolisme



DK: afkobling mellem BNP og forbrug målt ved forskellige miljøparametre

Figur 5.3: Udviklingen i Danmarks bruttonationalprodukt (BNP) pr. indbygger sammenholdt med forskellige miljøparametre. Alle parametre er angivet pr. indbygger og omregnet til indekstal med indeks 100 = 1990 (for affald dog indeks 100 = 1994). Kilde: Danmarks Statistik 2009 (bearbejdet af DMU).

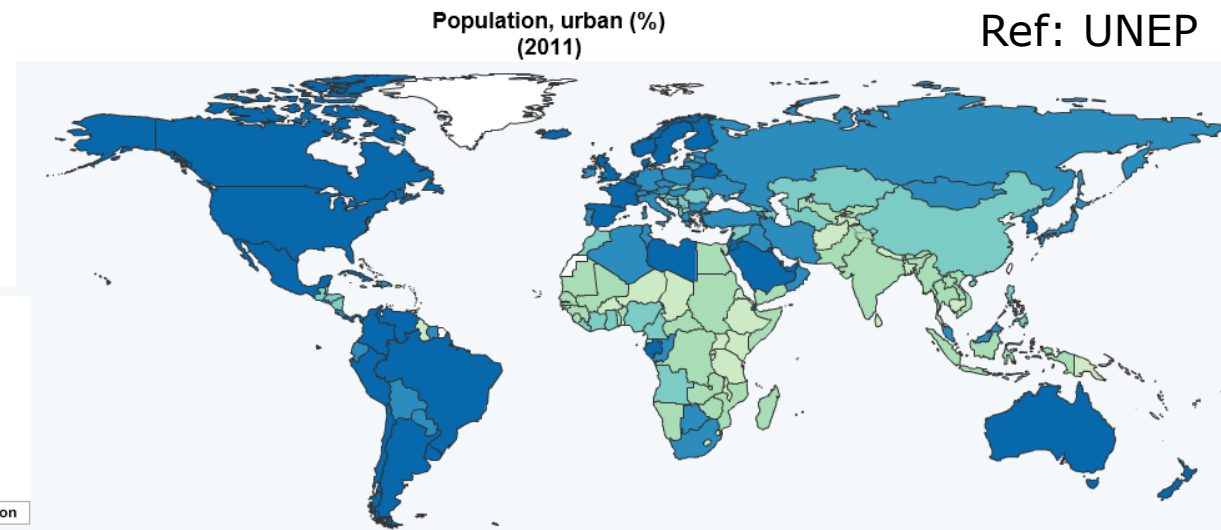
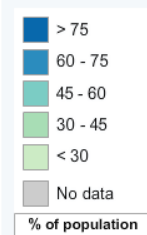
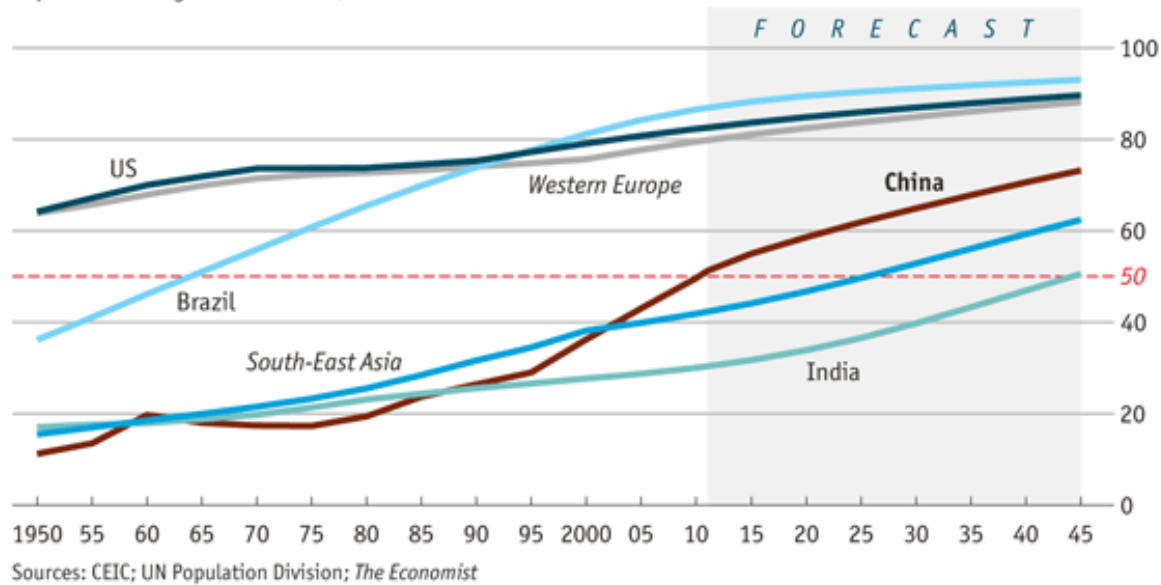
Note: Bunkring dækker over skibes og flys køb af brændstof i udlandet.

Den antropogene metabolisme

- En stadig større del af verdens befolkning bor i byer

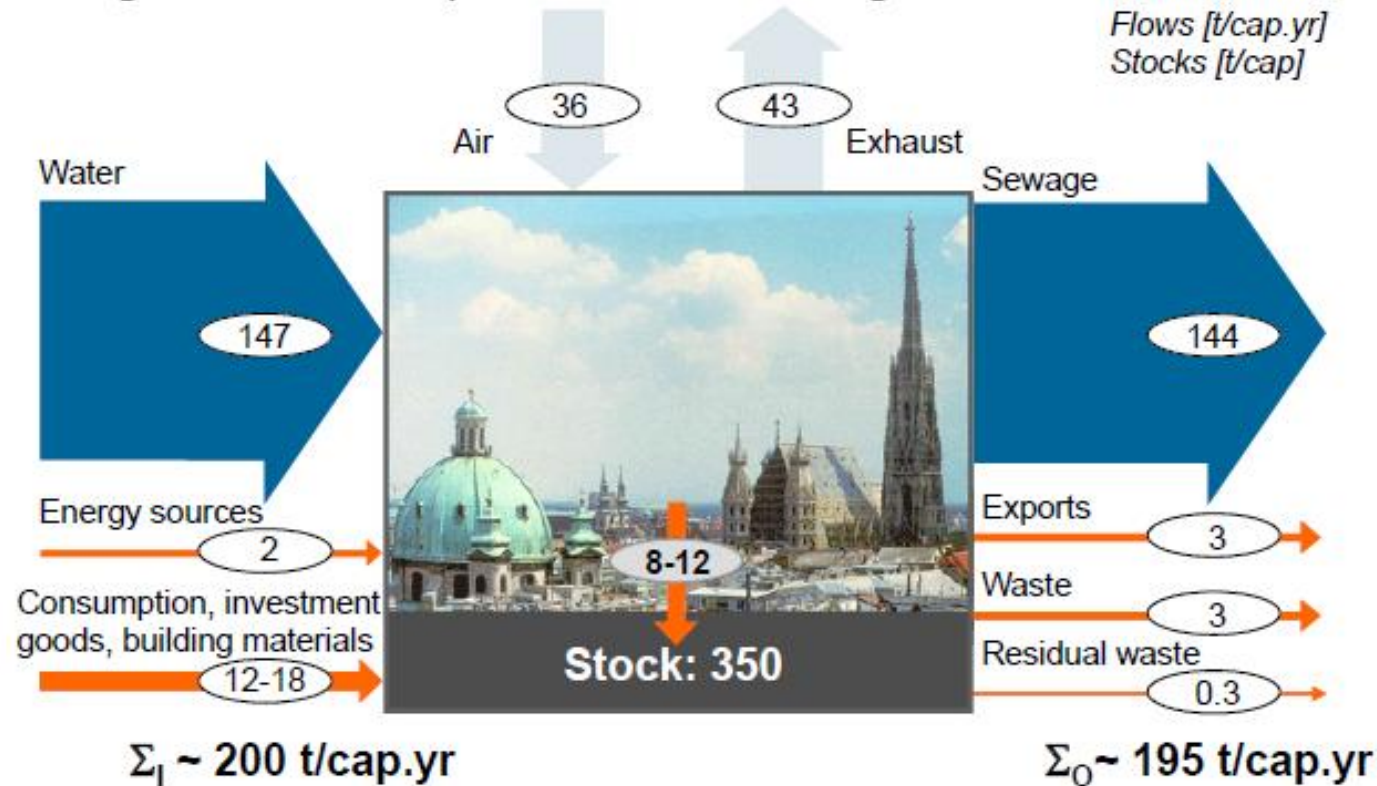
Urbanisation

Population living in urban areas, % of total



Den antropogene metabolisme

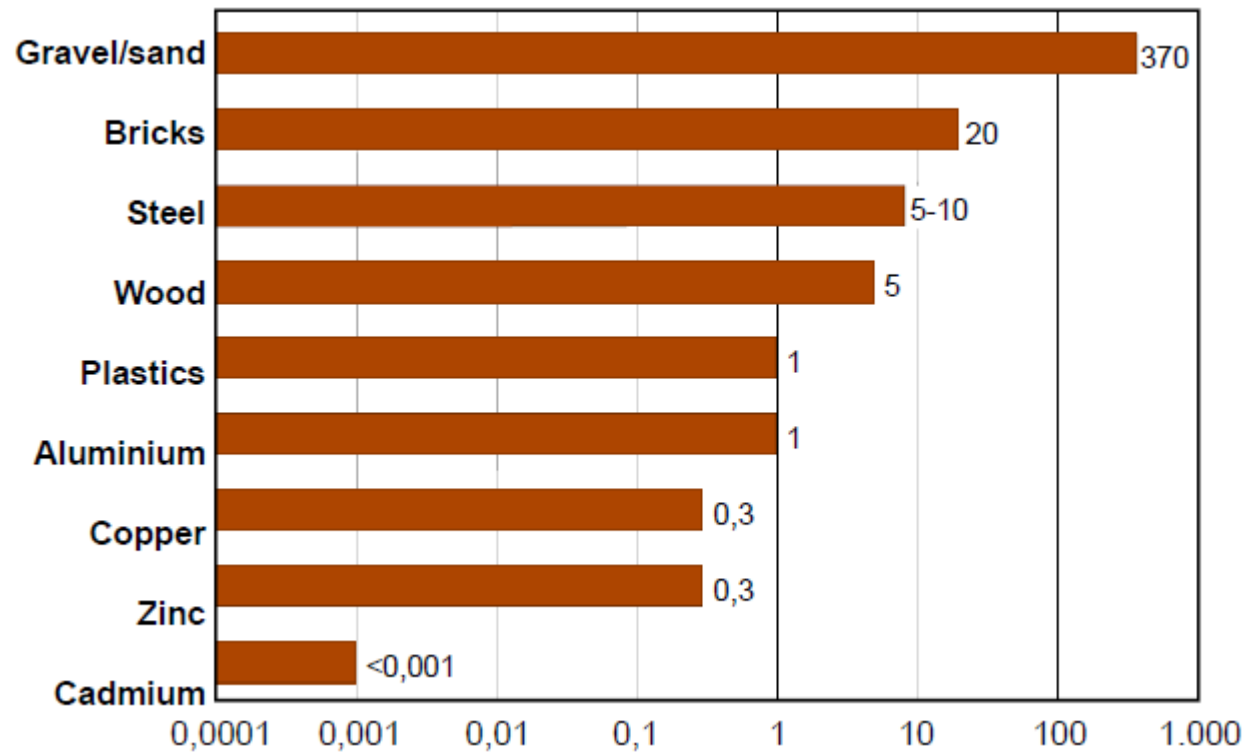
- Hurtigt voksende byer – akkumulering af materialer



Source: Daxbeck et al. 1996 (updated)

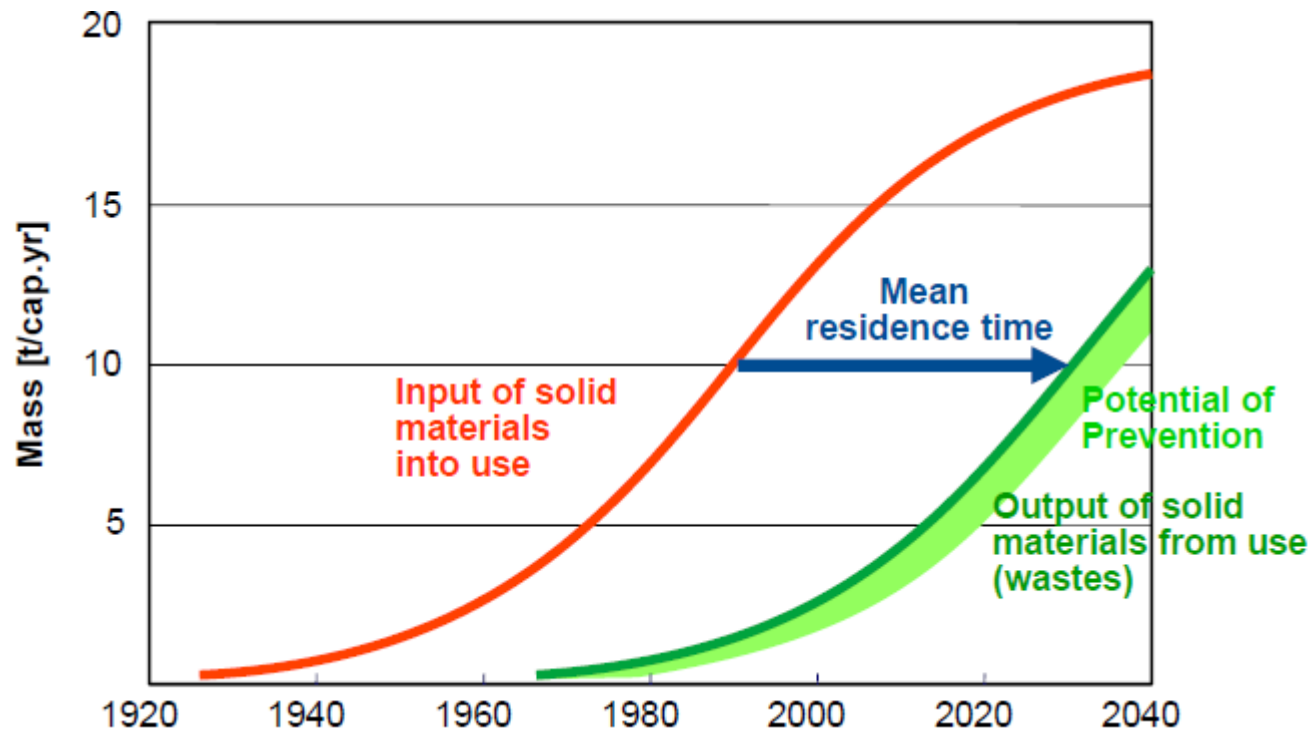
Den antropogene metabolisme

- Sammensætning af den antropogene materialebeholdning



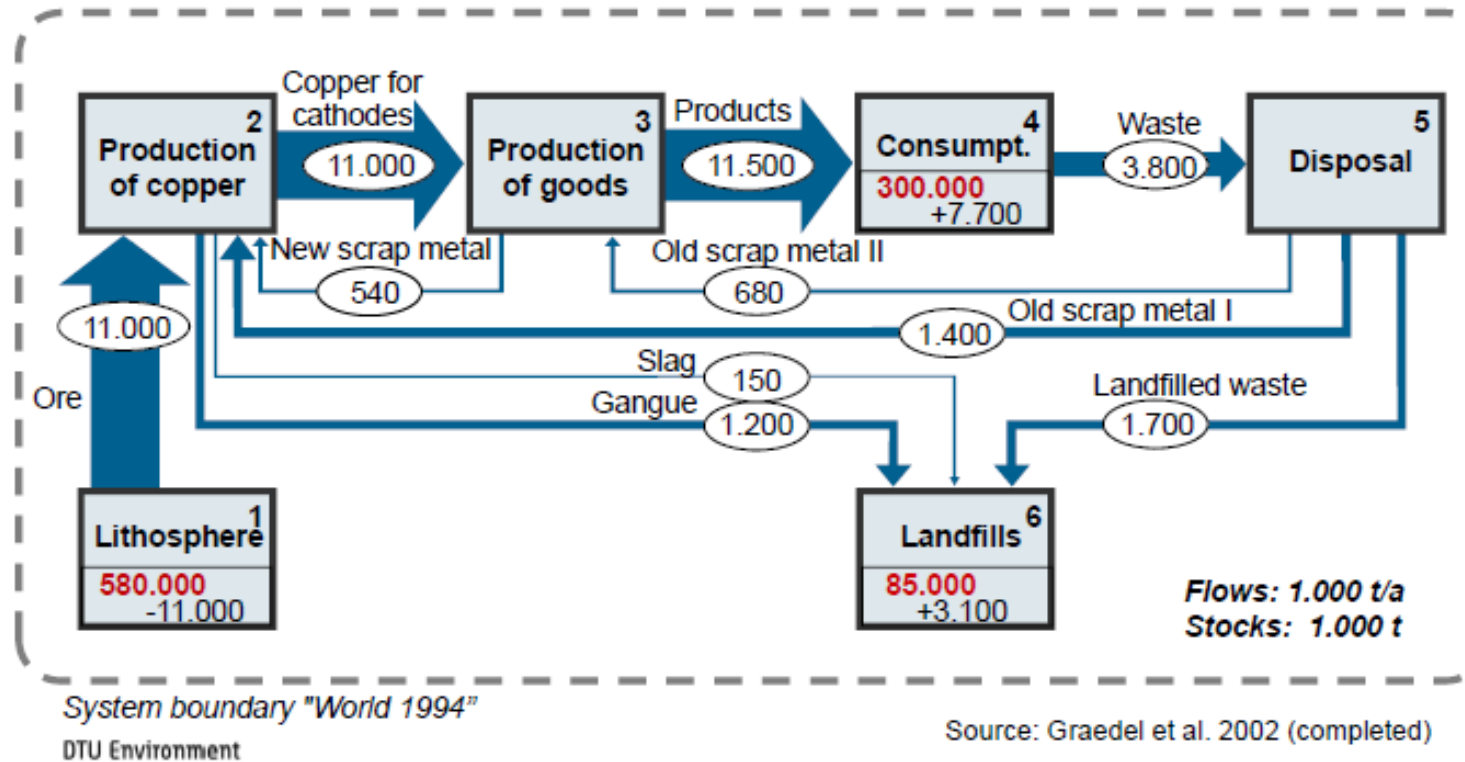
Den antropogene metabolisme

- Kraftig vækst i akkumuleringen af materialer i den urbane beholdning
→ Lange opholdstider; > 100 år



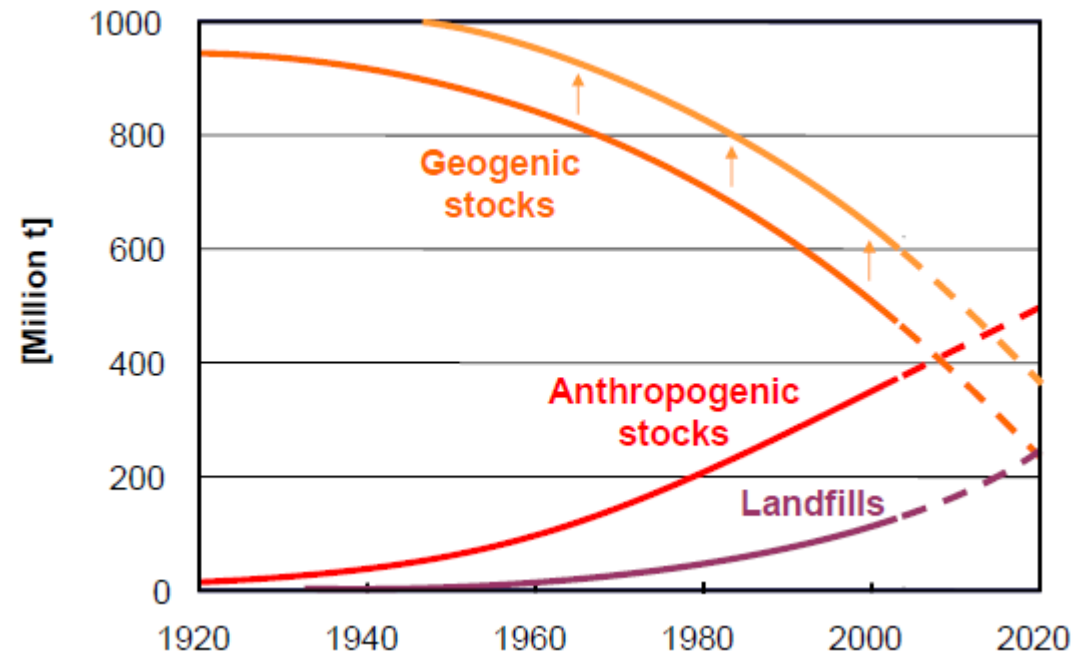
Den antropogene metabolisme

- Den urbane stofbeholdning er en potentiel ressource for fremtiden (ex. kobber)



Den antropogene metabolisme

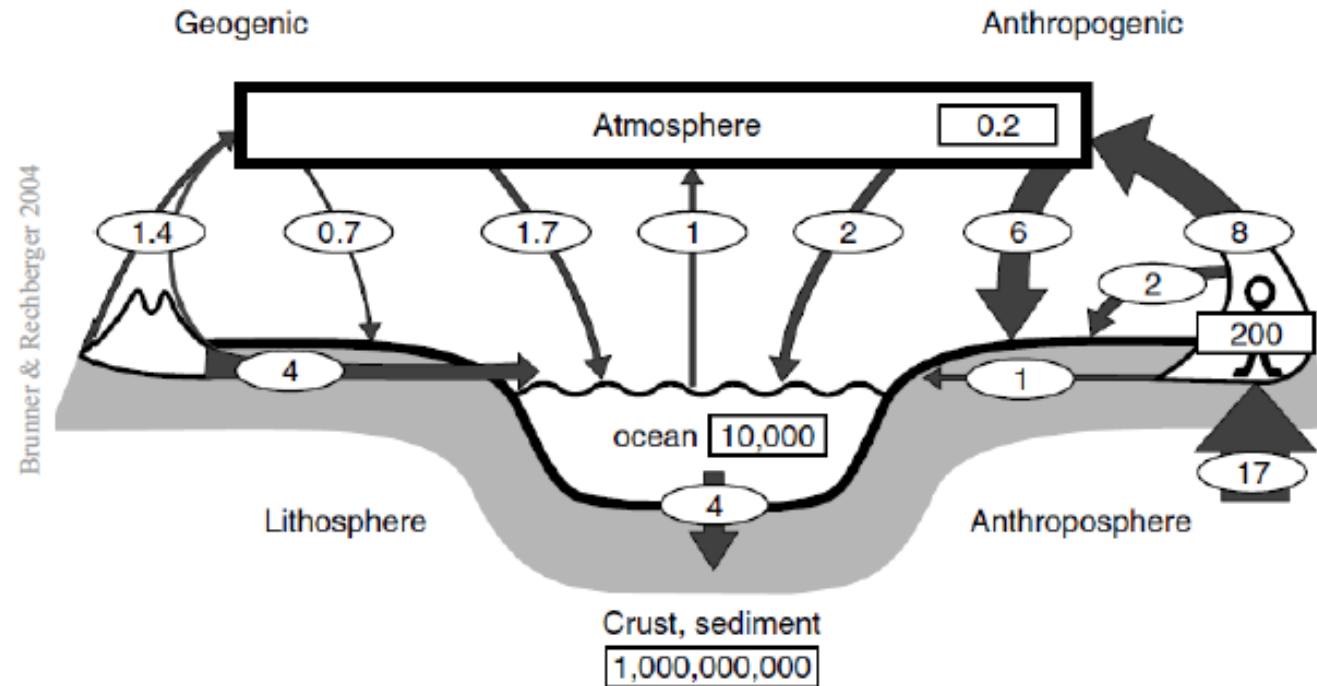
- Den naturlige globale beholdning af kobber vs. den antropogene beholdning: ikke ligevægt



Ref: Ukendt

Den antropogene metabolisme

- De antropogene massestrømme overstiger de naturlige massestrømme



Cadmium i 1980'erne: Flows 1000 tons/år, stocks 1000 tons

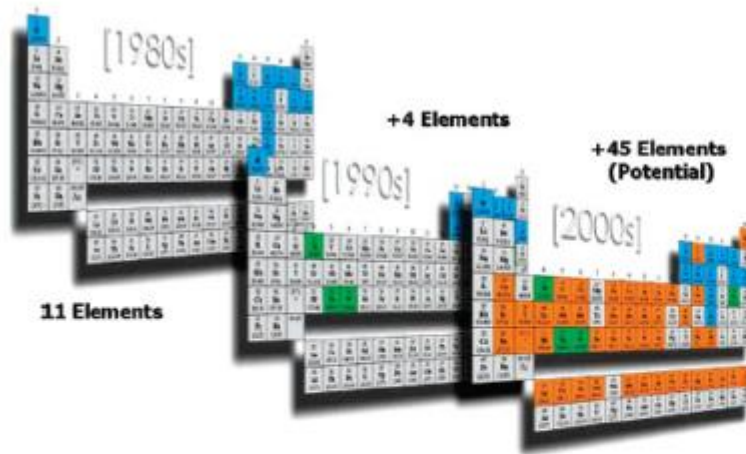
Den antropogene metabolisme

- Produkters sammensætning bliver mere komplekse



Den antropogene metabolisme

- Produkters sammensætning bliver mere komplekse

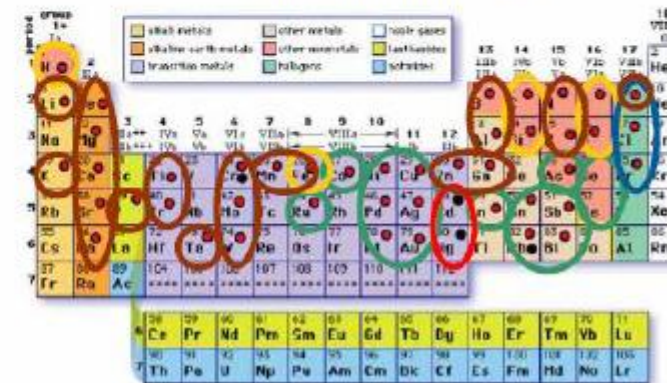


Intel circuit board

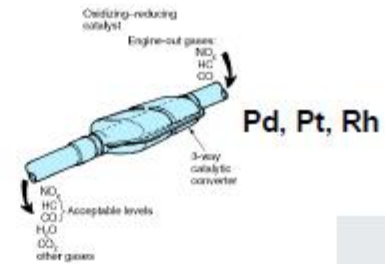
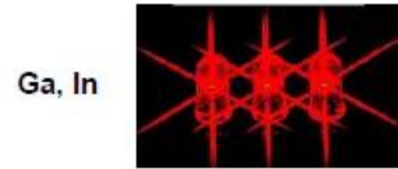
Source: Wäger 2007

Material Content of Mobile Phone

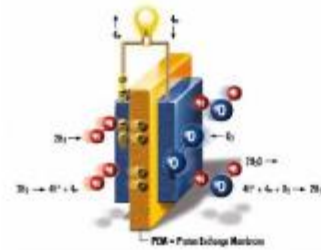
Source: Hagelüken 2006



Den antropogene metabolisme



Nb, Pt, Ru



Ag, Au, Pd, Pt, Ru, Ta, W,...



Ga, Ge, In, Ru, Te

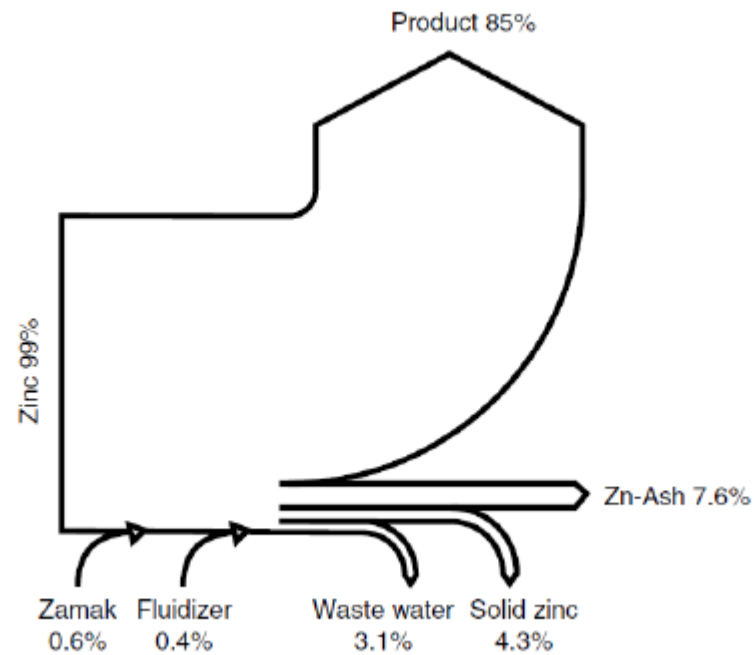


In

Source: Wäger 2007

Den antropogene metabolisme

- Emissioner fra produkter overstiger emissioner fra produktion



Zinc flow through an advanced electroplating plant

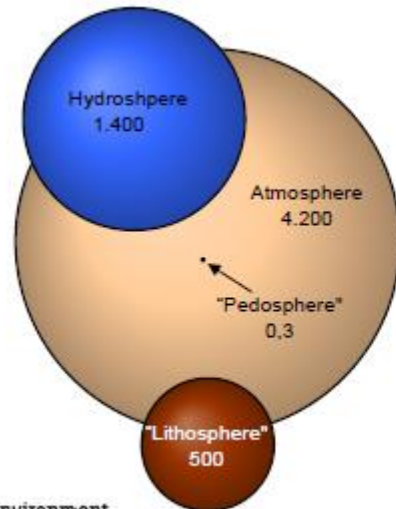
Dræn og grænser for vækst



After: Adam Nieman www.visions-of-science.co.uk

Capacity [million km³]

Earth	1.100.000
Atmosphere	4.200
Hydrosphere	1.400
"Lithosphere"	500
"Pedosphere"	0,3



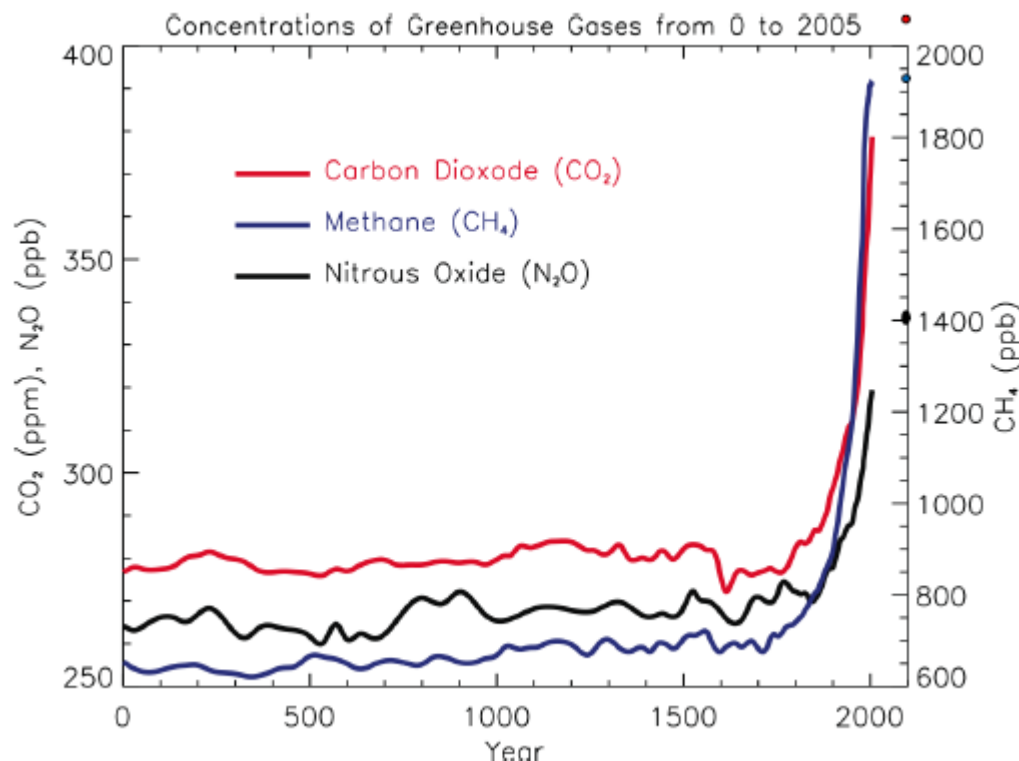
"Lithosphere": whole surface of the earth within 1 km depth

"Pedosphere": ice-free land surface within 2 m depth

J Environment
Department of Environmental Engineering

TU Vienna, AWS 2005

Dræn og grænser for vækst

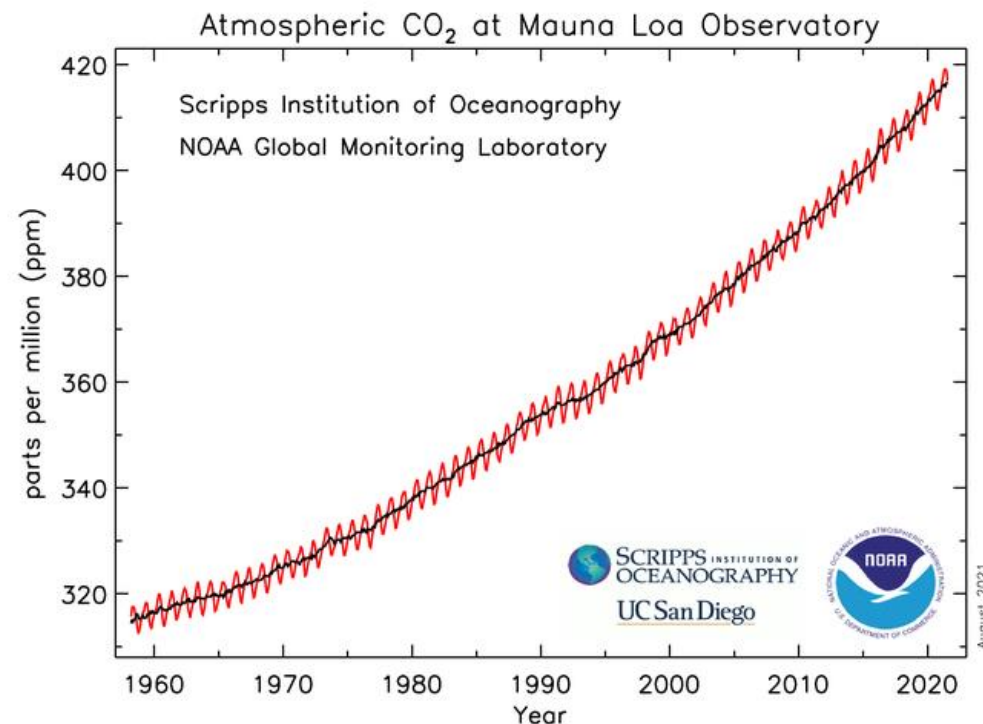


Ref: U.S. National Climate Assessment (2014).

	2021	2022	2023
CO ₂ - December	416.67	418.99	421.86

senest værdi 426.21ppm (dags måling)
som opdateret 5 februar 2024

<https://www.co2.earth/>



Dræn og grænser for vækst

Eksempler:

- Carbon – globale klimaforandringer
- CFCs – nedbrydning af ozonlaget
- DDT – persistens i jord og følgende akkumulering i fødekæden
- Pb som additiv i brændstof – diffus udledning og dispersion af bly til miljøet
- Plutonium – endelig lagring af radioaktivt affald

slido



Med din sideperson diskuter andre grænser og dræn for vores liv på Jorden

① Start presenting to display the poll results on this slide.

Opsummering

Illustreret ved MFA har vi set:

- Større massestrømme samt akkumulering i moderne samfund
- Hurtig vækst i ressourceforbruget
- Økonomisk vækst er stærkt koblet med ressourceforbrug
- Den urbane stofbeholdning vokser og er en potentiel ressource
- for fremtiden
- De antropogene massestrømme overstiger de naturlige
- massestrømme
- Primær lineær massestrømme – marginal cirkulær økonomi
- Produkters sammensætning bliver mere komplekse
- Vi har set at der er grænser for vækst

PAUSE, efter Kahoot!!!!

- www.kahoot.it

Massestrømsanalyse

Modul 2

2. Terminologi, begreber og definitioner

MFA

- Massestrømsanalyse (Material flow analysis - MFA) er en systematisk metode til at beskrive, undersøge og evaluere stofomsætningen (metabolismen) i et antropogent eller naturligt system
- MFA anvendes til vurdering af massestrømme og beholdninger i komplekse systemer afgrænset i tid og sted
- MFA definerer termer og procedure til at udføre massebalancer på systemer - 5 fundamentale termer:
 - System
 - Proces
 - Materiale
 - Stof
 - Strøm/flux

Terminologi anvendt i MFA

- Masse (material)
- Stof (substance)
- Materiale (good)
- Proces (process)
- System (system)
- Systemafgræsning (system boundaries)
- Strøm (flow)
- Beholdning/lager/pulje (stock)
- Massestrømsanalyse (material flow analysis, MFA)
- Stofstrømsanalyse (substance flow analysis, SFA)
- Balance (balance, balance of goods and materials)
- Input-output-analyse (input-output-analysis)

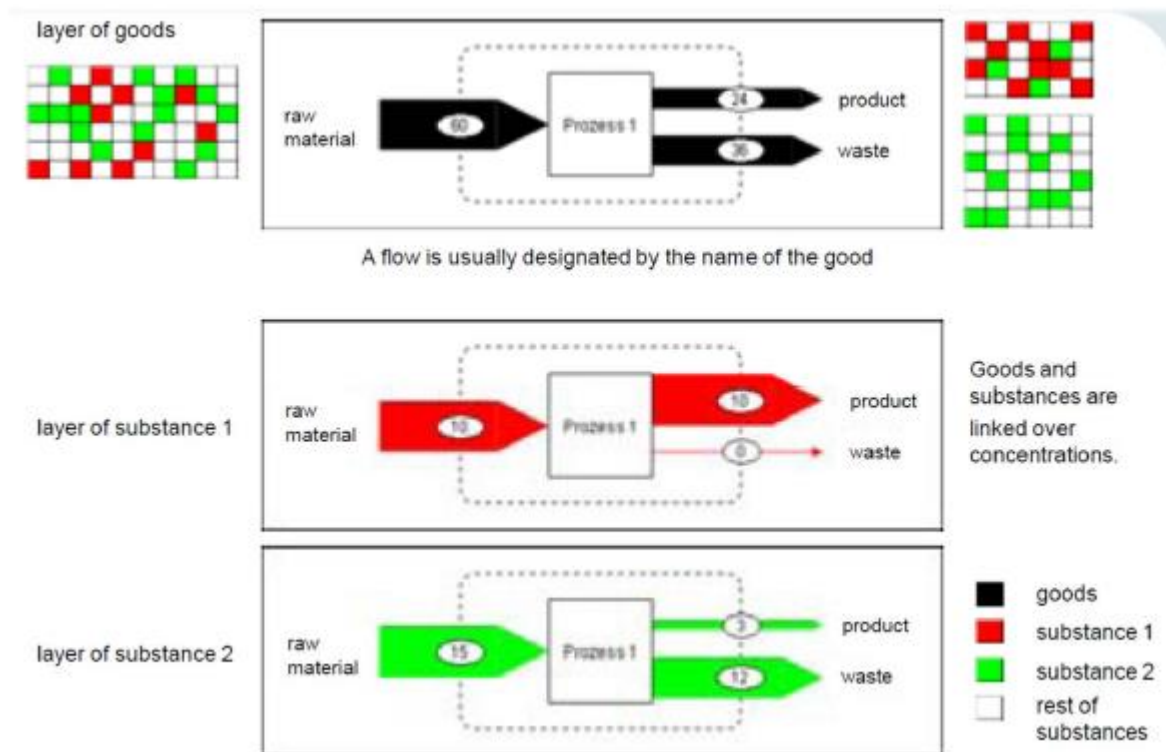
Terminologi anvendt i MFA

- Overførselsfunktion (transfer function)
- Overførselskoefficient (transfer coefficient $k_{x,j}$)
- Masseopgørelse (materials accounting)
- Aktivitet (activity)
- Antroposfæren (anthroposphere)
- Antropogen stofstrøm (anthropogenic substance flow)
- Geologisk stofstrøm (geogenic substance flow)
- Regional stofstrøm (regional substance flow)
- Kilde (source)
- Dræn (sink)
- Slutdræn (final sink)

Masse: stof og materialer

- I MFA dækker masse (material) over både stof (substance) og materialer (goods)
- Et stof er ethvert kemisk grundstof eller kemisk forbindelse bestående af samme grundstoffer. Alle stoffer er karakteriseret ved en enhed, og er identiske og homogene i opbygning (ex. N, C, Cu, CO₂, CH₄)
- Et materiale er defineret som enheder af stoffer (med negativ, neutral eller positiv økonomisk værdi) (ex. drikkevand, brændstof, affald, slam)

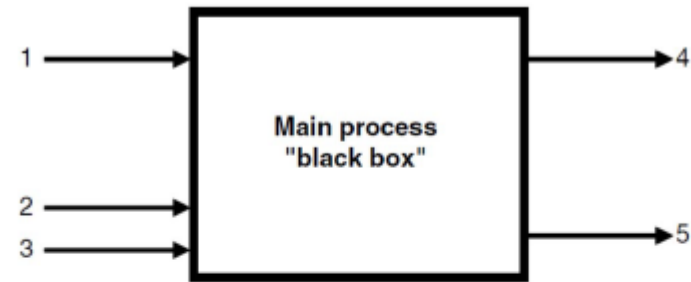
Stof vs. Masse



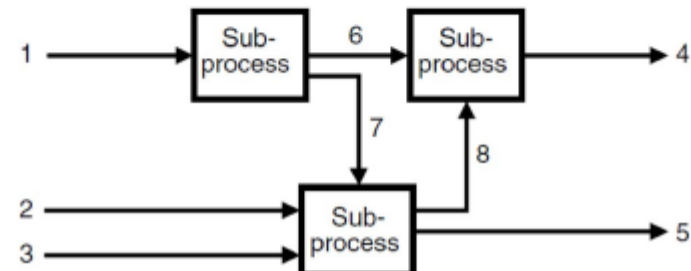
Proces

- En proces (masse per tid) er defineret som transport (transporting), omsætning (transforming), eller lagring (storing) af masse i systemet. Naturlige eller antropogene.
- Processer:
 - En bys, et menneskes eller et dyrs stofomsætning (metabolisme)
 - Stofomsætning i en industri eller teknologi
 - En aktivitet i en sfære (ex. atmosfæren, hydrosfæren, eller i jorden)
 - En service (ex. indsamling af affald)

Processer og under-processer



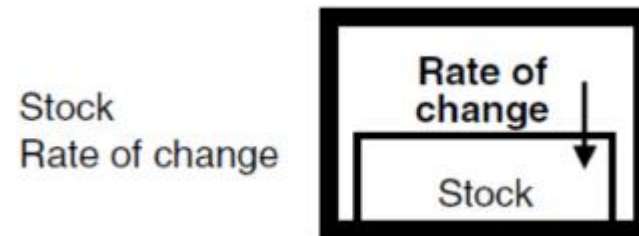
Disintegration ↓ ↑ Integration



Ref Brunner & Rechberger 2016

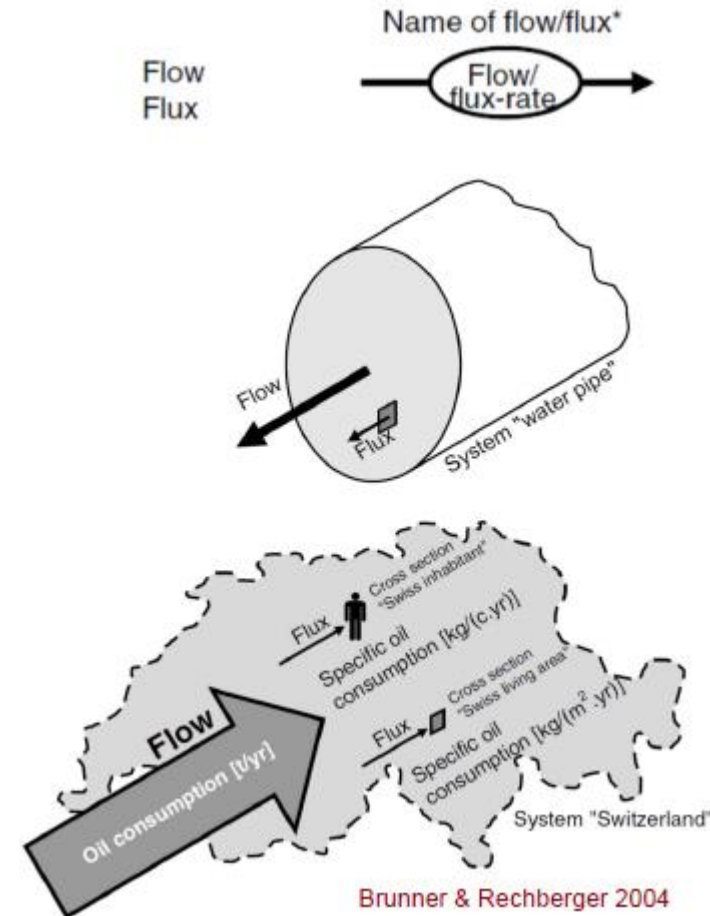
Beholdning/lager

- En beholdning er den totale masse af et materiale lagret i en proces. Naturlige eller antropogene. Et lager kan øges, mindskes eller være i ligevægt (steady state)
- En beholdning beskrives ved en masse af lagret materiale og en rate for ændringen i beholdningen
- Ved ligevægt er opholdstiden i en beholdning lig beholdningen (masse) divideret med stofstrømmen (masse per tid)



Strømme og fluxe

- Strøm (flow) (masse per tid)
- Flux (masse per tid per enhed). Fluxe er specifikke strømme
- Forbinder processer i systemet (input og output flows/fluxes)
- Strømme ind og ud af systemet kaldes import og export flows/fluxes



Strømme og fluxe

Examples of Flows and Fluxes

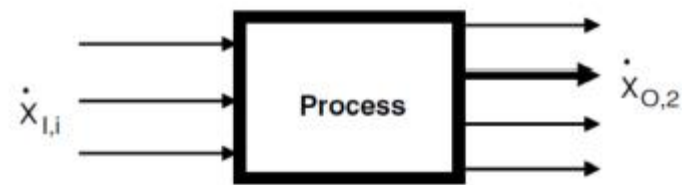
	System	Cross Section	Numerical Value of Cross Section	Flow	Flux
Paper consumption	Switzerland	Swiss population	7.3 million	1.8 million t paper/year ^a	246 kg paper/ (c·yr)
Waste treatment	MSW incinerator	grate	50 m ²	15 t MSW/h	300 kg MSW/(m ² ·h)
Emission of SO ₂	Switzerland	area of state	42,000 km ²	30,000 t SO ₂ / year ^a	0.7 g SO ₂ / (m ² ·year)
Total deposition of nitrogen	Vienna	area of city	415 km ²	1,400 t N/year ¹²⁹	3.4 g N/ (m ² ·year)

^a In 2000.

Brunner & Rechberger 2004

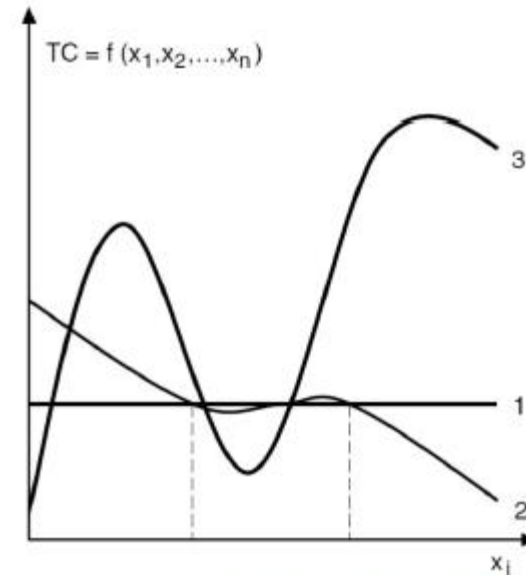
Overførselskoefficienter

- Overførselskoefficienter (transfer coef.) beskriver fordelingen af en inputstrøm til forskellige outputstrømme
- Defineres for hvert output flow fra en proces – summen af output flows er 1



$$TC_i = \frac{\dot{X}_{O,i}}{\sum_{i=1}^{k_I} \dot{X}_{I,i}} \quad \sum_{i=1}^{k_O} TC_i = 1$$

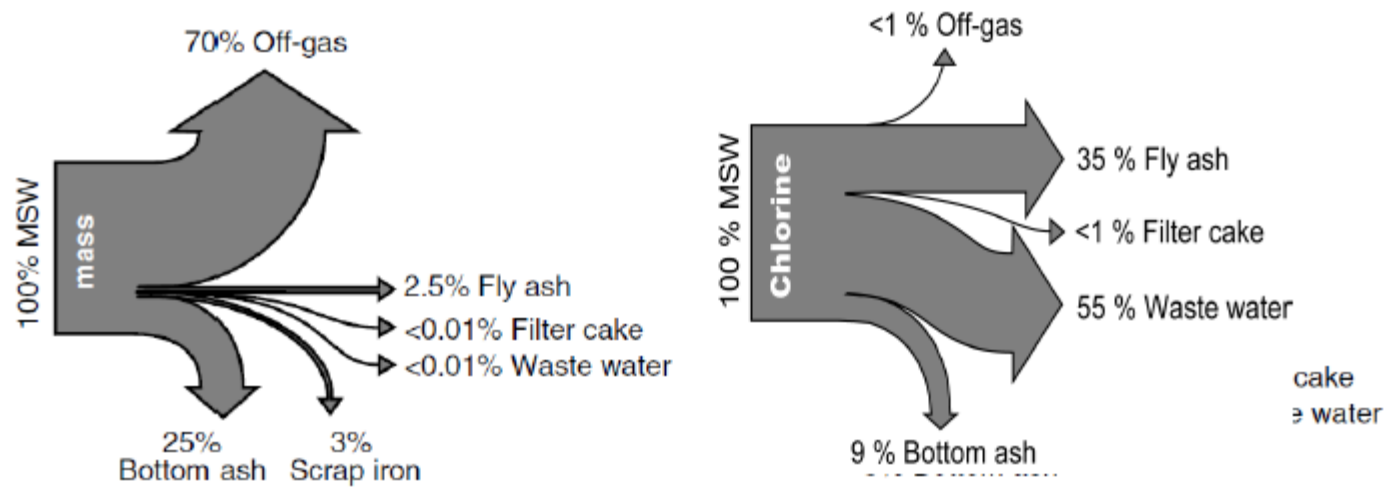
k_I = number of input flows
 k_O = number of output flows



Brunner & Rechberger 2004

Overførselskoefficienter

- Eksempel: MFA/SFA for et affaldsforbrændingsanlæg

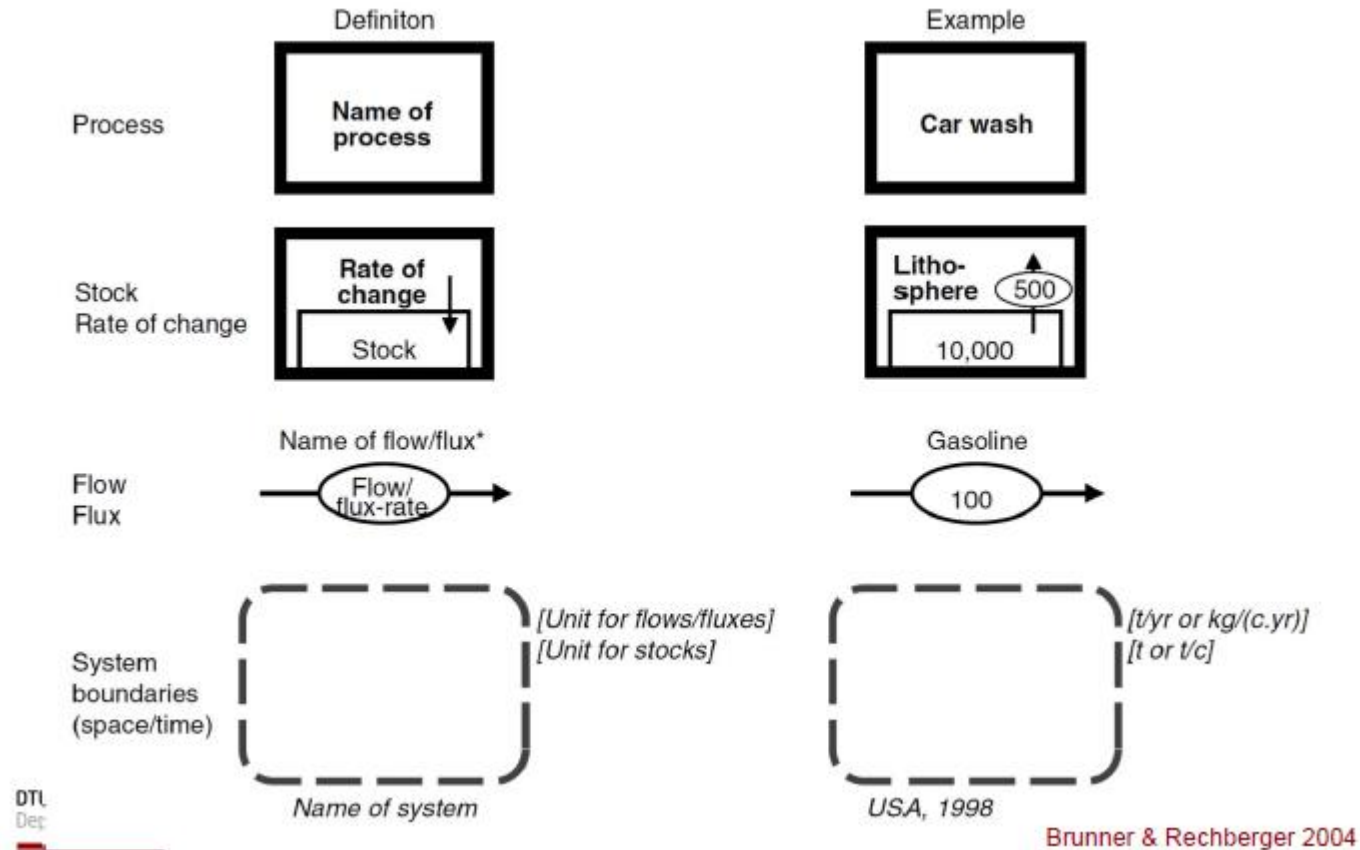


Brunner & Rechberger 2004

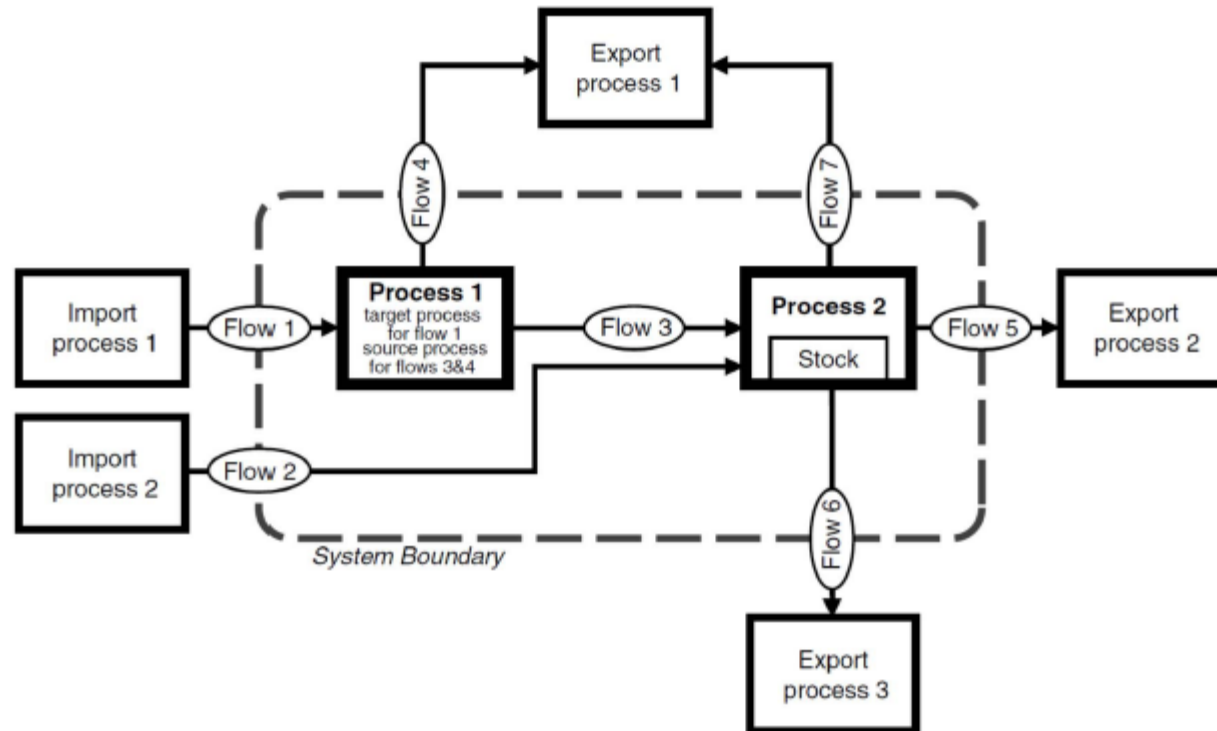
System og systemafgrænsning

- Et system består af stofstrømme, processer, beholdninger i et afgrænset system
- Systemets grænser er defineret i tid og rum/sted og er afhængig af formål og tilgængelige data
- Ofte anvendes en tidsperiode på et år
- Den stedlige afgrænsning kan være et geografisk område (en nation, en region, en by, en fabrik) eller en mere virtuel afgrænsning (et affaldshåndteringssystem, en gennemsnitshusholdning)
- Ofte er en afgrænsning i den 3. dimension også nødvendig (ex. 10 km over jordens overflade)

Symboler anvendt i MFA



MFA illustration af termen



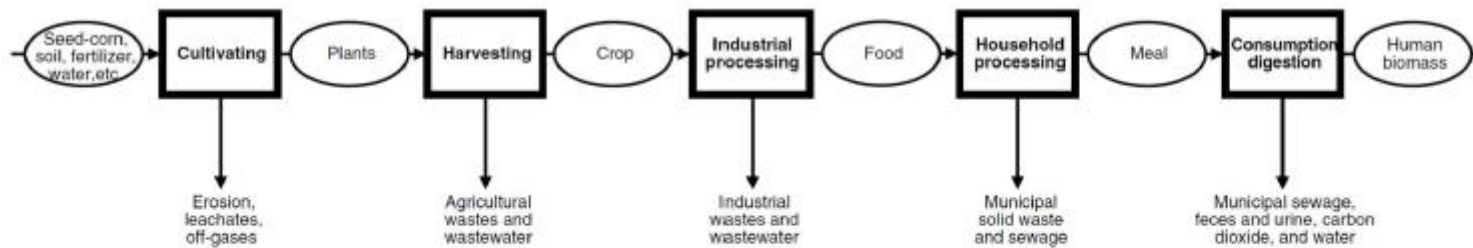
Brunner & Rechberger 2004

Aktiviteter

- En aktivitet består af alle processer, stof- og materialestrømme og beholdninger, der er nødvendige for at dække et bestemt menneskeligt behov
- Eksempler:
 - At ernære; alle P og S/M til at producere, forarbejde, distribuere, og forbruge fødevarer (faste og flydende)
 - At rense; alle P og S/M til rense/rengøre, separere unødvendige stoffer fra nødvendige
 - At bo og arbejde; alle P og S/M til at bygge, drive og vedligeholde boliger og arbejdspladser
 - At transportere og kommunikere; alle P og S/M udviklet til at transportere energi, materialer, personer og information

Eksempel på en aktivitet

- At ernære:



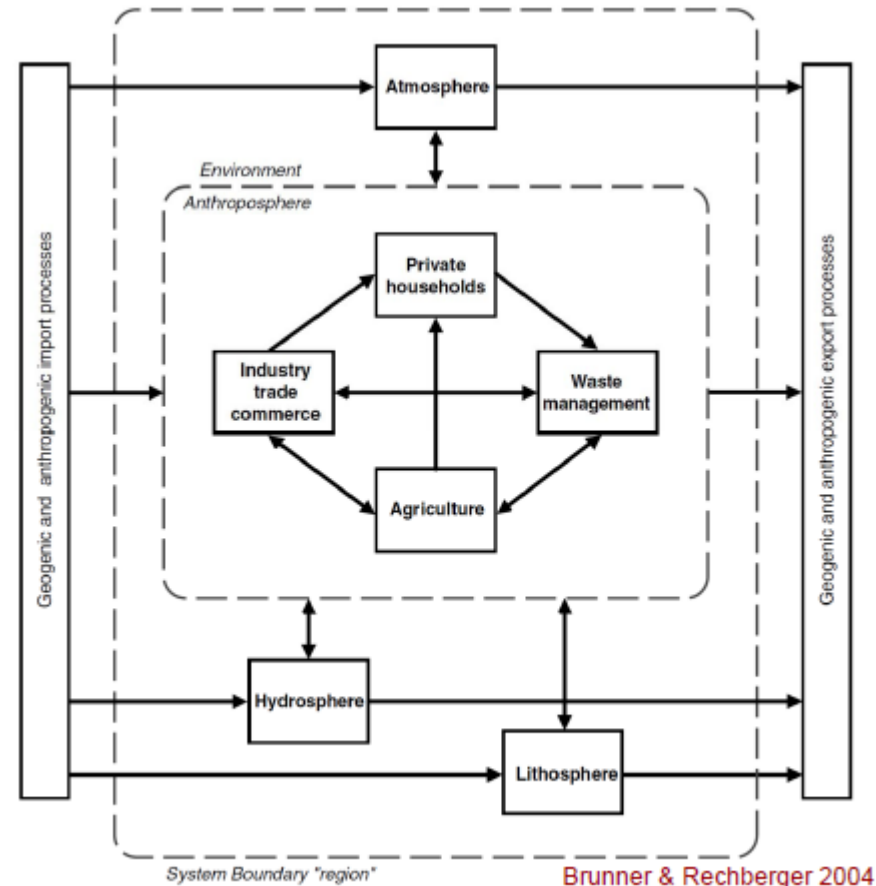
Note: Required goods to operate the processes (energy, machinery, tools, etc.) are omitted

Brunner & Rechberger 2004

Antroposfæren og miljøet

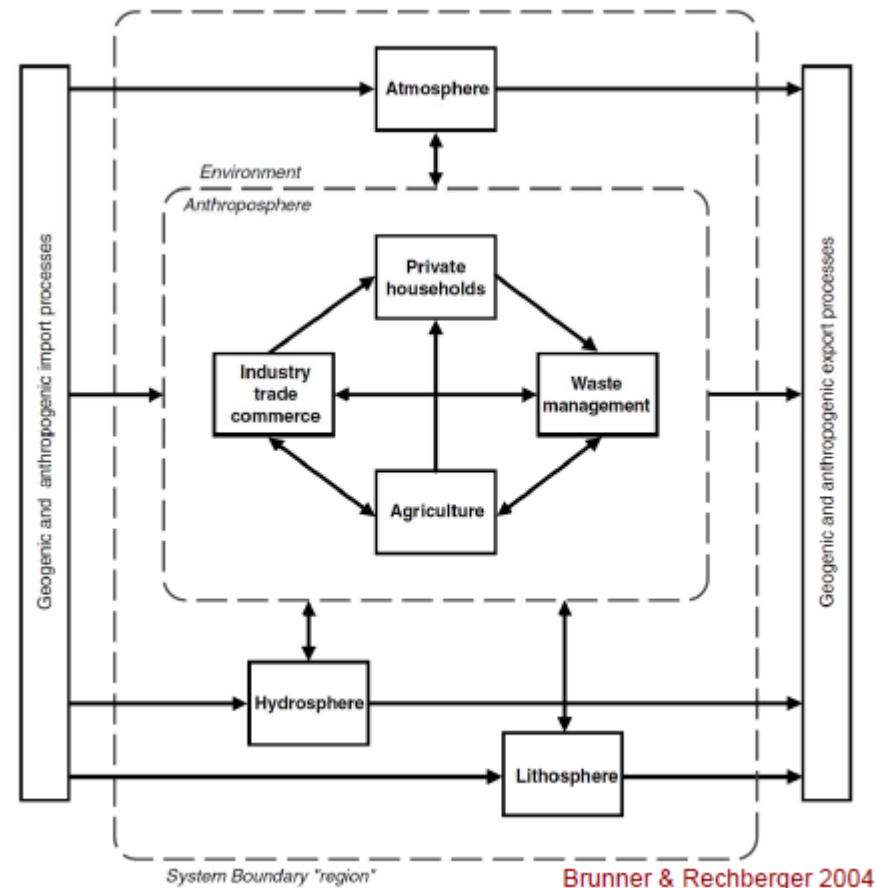
Antroposfæren:

- den menneskeskabte sfære (også kaldet teknosfæren)
- indbefatter alle menneskedrevne processer
- udgør et kompleks system af strømme af energi, materialer og informationer

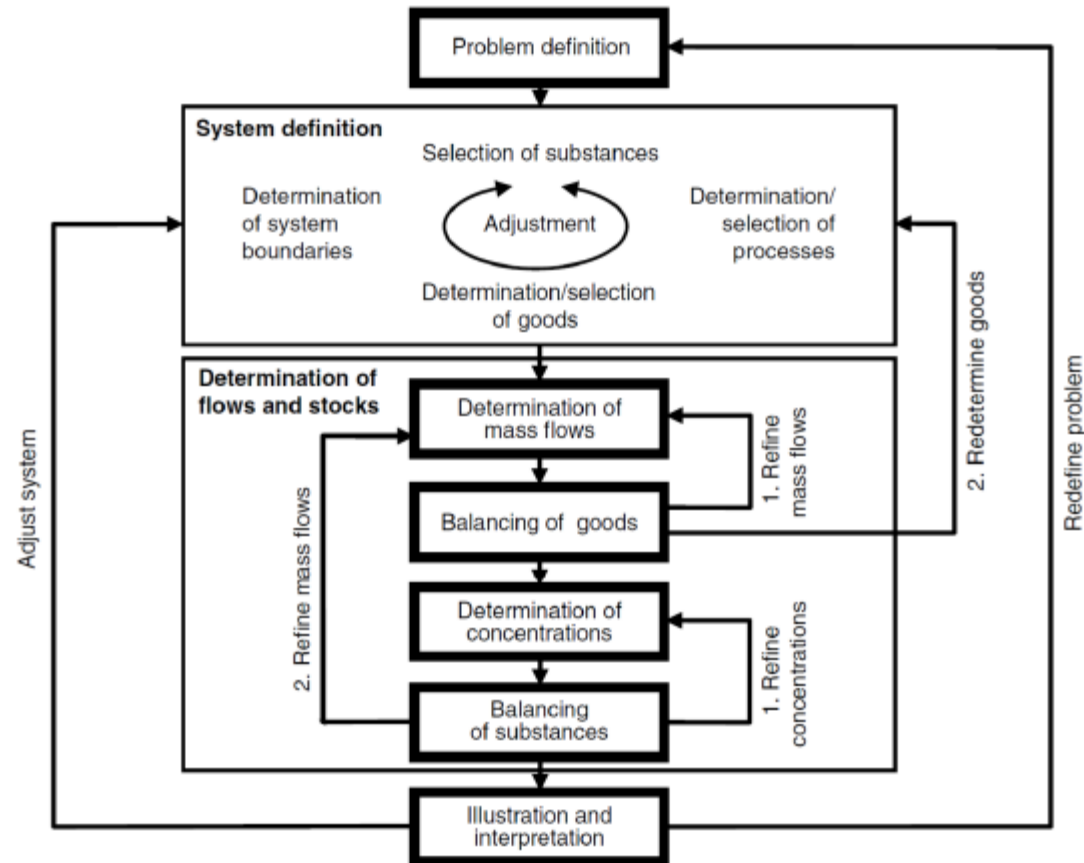


Metabolisme

- Metabolisme:
- Et systems metabolisme indbefatter overførsel, lagring, og omsætning af materiale indenfor systemet samt udveksling af materialer med det omgivende miljø
- Anvendes i forbindelse med processer i både den naturlige og menneskeskabte sfære



Procedure for udførelse af MFA



Eksempler på massestrømsanalyser udført i Danmark

- 4-nitrotoluen (2004)
- Lead (2000)
- Chromium (2002)
- Chlorinated aliphatics (1998)
- Dioxins (2003)
- Copper (1996)
- Brominated flame retardants (1999)
- Mercury (2001)
- Cadmium (1980, 1993, 2000)
- Recorcinol (2004)
- Glycolether (2003)
- Aluminium (1999)
- Phosphor (2016)

Pause, efter Kahoot!!!!