

Klimat 2P: Fossilt kol med Koldioxidinfångning = CCS = Carbon Capture & Storage

(På 3ⁱ minuter hinner du läsa det som står med fetstil och staplarna samt sista paragrafen.

Den som börjar med "Alternativ för att fylla energi-gapet ...". **Gör det nu.** ⁱⁱ⁾

Om du hör till dem som vill veta mer, så bygger informationen i detta mail på rapporten "Carbon Dioxide Capture and Storage" från FN:s klimatpanel ⁱⁱⁱ All information kommer därifrån om inget annat anges.

För att jorden ska ha värmas upp två grader eller mindre så som världens länder lovade i Paris så behöver vi samla in och lagra en del av den koldioxid vi har släppt ut. ^{iv} Om 35 år behöver vi ta bort 6 miljoner ton koldioxid från atmosfären varje år. Om 85 år kommer vi att behöva ta bort mer än 10 miljarder ton koldioxid från atmosfären varje år. ^v

Fossilt kol med Koldioxidinfångning = CCS = Carbon Capture & Storage

CCS innebär i princip att man tar upp fossilt kol ur underjorden, förbränner det till koldioxid, och sedan stoppar tillbaka koldioxiden i underjorden igen så att den aldrig når atmosfären (eller kol-cykeln).

Notera att denna teknik bygger på att kolet/koldioxiden ALDRIG NÅGONSIN får slippa ut eller användas. Inte på 100 år. Inte på 1000 år, och helst inte ens på en miljon år.

Biobränsle med Koldioxidinfångning = BECCS = Bio Energy Carbon Capture & Storage

Ett av de få sätt som finns för att ta bort CO₂ ur luften är BECCS. Det innebär att man eldar biobränsle för att producera el och att man fångar in och lagrar CO₂ från röken. På så sätt kan man lagra den CO₂ som de eldade växterna har bundit under sin livstid. ^{vi}

Att fånga in luftens CO₂ med hjälp av BECCS är ett av de effektivaste kända sätten. ^{vii} Ändå kommer det att gå åt mycket energi för att fånga in koldioxiden igen.

För varje fyra kWh fossilenergi som vi förbrukar nu så kommer våra barnbarn att behöva producera eller avstå en kWh åt oss i ett biobränslekraftverk om 80 år. ^{viii}

BECCS kräver utrymme. För att våra barnbarn ska kunna ta bort vår koldioxid i tillräckligt snabb takt om 80 år så behöver en yta motsvarande en femtedel av jordens jordbruksmark användas till odling av energigröda. ^{ix} (Ungefär lika mycket koldioxid kan man binda genom att istället plantera skogar som aldrig mer ska avverkas på marken. ^x)

För varje 2,5 ton CO₂ som vi släpper ut kommer våra barnbarn om 80 år att tvingas odla energigröda på en hektar i ett år. ^{xi} (En genomsnittlig svensk släpper ut motsvarande 10 ton CO₂ per år, alltså motsvarande 4 ha. ^{xii})

Att lagra koldioxiden kräver också utrymme. Varje decennium kommer det att produceras 150 kubik-kilometer komprimerad koldioxid som ska lagras.^{xiii}

Att fånga in koldioxiden kräver energi, även om man tar den direkt från rökgaserna, och det går inte i praktiken att fånga in koldioxiden hundraprocentigt. (Det skulle kosta tre gånger så mycket energi att istället ta koldioxiden direkt från luften.^{xiv}) Ett kraftverk med CCS behöver 110%-140% så mycket bränsle på grund av det extra energibehovet. Det betyder också att ett kraftverk med CCS producerar 110%-140% så mycket koldioxid. Samtidigt släpper det ut bara 10%-20% av vad ett normalt kraftverk släpper ut.^{xv} Resten av koldioxiden måste lagras för all framtid.

Den extra bränsleförbrukningen gör att energin från kraftverket är dyrare innan man ens har börjat titta på lagringen av koldioxiden. Den extra kostnaden är skälet till att CSS inte används mycket idag. Det är billigare att köpa (eller få) utsläppsrätter och fortsätta släppa ut koldioxid.

Vi skulle kunna fylla Sveriges energi-gap på 21 kWh per person och dygn under 200 år med energi från kolkraftverk med CCS. Då kommer de kolkraftverken att producera motsvarande 146 km³ koldioxid (förvarad under 50 atmosfärers tryck) (eller 22 km³ superkritisk koldioxid).^{xvi}

I mailet "Klimat 2K: 350 ppm, eller kan vi ta bort koldioxid ur luften?"^{xvii} så räknade vi med att ta bort koldioxid som vi redan har släppt ut i atmosfären. Det innebär ytterligare drygt 40 km³ koldioxid som Sverige måste lagra (under 50 atmosfärers tryck) (eller ytterligare 6 km³ superkritisk koldioxid).^{xviii}

För att lagra både det vi redan har släppt ut och dessutom täcka energi-gapet i 200 år så behöver vi alltså lagra totalt ca 146 + 40 ~ 187 km³ koldioxid förvarad under 50 atmosfärers tryck eller 28 km³ superkritisk koldioxid

Man tittar på några olika alternativ för lagring av koldioxid. Huvudsakligen lagring i geologiska formationer, lagring som mineral, och lagring i haven.

Lagring i geologiska formationer

Naturgas har legat i underjorden i miljoner år och det kan koldioxid också göra. Problemet är att hitta tillräckligt många, och tillräckligt säkra, platser att lagra det på. FN:s klimatpanel bedömer att om lämpliga platser väljs, och om dessa platser kontinuerligt **övervakas**^{xix} så att alla eventuella läckor tätas, så kommer koldioxiden med minst 90% sannolikhet att fortfarande finnas kvar i lagren efter 100 år.^{xx}

Det är inte lätt att upptäcka koldioxid-läckor. I låga koncentrationer är koldioxid en färglös gas utan lukt eller smak. Den går därför inte att skilja från vanlig luft utan särskilda instrument. (I högre koncentrationer orsakar koldioxid huvudvärk och andnöd.)^{xxi} Om koldioxiden kan lagras under trycket av mer än 800 meter berg, så minskar risken för läckor, eftersom koldioxiden då blir superkritisk och uppför sig nästan som en vätska. (Notera att inget hål får finnas i berget, eftersom koldioxiden då lagras under trycket av 800 meter luft (eller vatten) och inte berg.)

Lagring som mineral

Koldioxiden kan bindas till kiselhaltiga mineraler. Det krävs ca 2,6 ton sten för att binda ett ton koldioxid och processen som binder koldioxiden till mineralerna kräver en hel del energi. Det innebär att man kan täcka gapet genom att bryta 94 kg sten per person och dygn. Stenen ska sedan krossas till ungefär dubbla volymen sten-mjöl, behandlas med koldioxid och därefter slutförvaras. Totalt skulle ca 40 kubik-kilometer stenmjöl behöva slutförvaras för att täcka det svenska energi-gapet i 200 år. (40 km³ motsvarar mer än en fjärdedel av Vänerens volym, eller att täcka hela Sverige med ett 1 dm tjockt lager stenmjöl.)^{xxii} Till det kommer 11 km³ stenmjöl^{xxiii} som krävs för att lagra koldioxiden som vi redan har släppt ut och som måste lagras för att vi ska ta oss tillbaka till 350 ppm. Stenmjölet är en stabil förening som inte behöver övervakas, så det kan t.ex. användas som fyllningsmassor eller dumpas i havet.^{xxiv}

Bearbetningen av mineralerna kräver drygt hälften till i energi^{xxv}, vilket troligen innebär att det här alternativet kostar ungefär hälften till jämfört med de andra två alternativen. (Oräknat kostnaden för övervakning i 1000-tals år.)

Lagring i haven

Koldioxid som lagras i haven är kvar i kolcykeln. Det betyder att den förr eller senare kommer tillbaka till atmosfären igen. FN:s Klimatpanel räknar med att 15%-70% av koldioxiden är tillbaka inom 500 år. (Mer än en tredjedel kan vara tillbaka redan inom 100 år.)^{xxvi}

Lagring av CO₂ i haven löser alltså inte utsläppsproblemen, utan fördröjer dem bara. Tidigare har vi räknat med att de olika teknikerna måste täcka gapet i minst 200 år. Det är uppenbarligen tveksamt om lagring av koldioxid i havet kan göra det. Ytterligare ett problem med att lagra koldioxid i haven, är att koldioxiden förvandlas till kolsyra som försurar haven. Det kan leda till problem för (läs "utrotning av") t.ex. djur med kalkskal.^{xxvii}

CCS med lagring i geologiska formationer kanske kan täcka gapet, men kräver avancerad övervakning i 1000-tals år

CCS med lagring i mineraler kan täcka gapet för Sverige, om vi är villiga att betala den extra kostnaden, och att bryta och slutförvara ca 50 kubik-kilometer stenhöj.

CCS med lagring i havet kan knappast täcka gapet eftersom kolet blir kvar i kolcykeln.

Energiförbrukning (kWh/person och dygn):

Apparater, IT, Media & Underhållning: 5 kWh/pp&d ^{xxviii}

Ljus: 3 kWh/pp&d ^{xxix}

Bil: 14 kWh/pp&d ^{xxx}

Flyg: 4,9 kWh/pp&d ^{xxxi}

Övrig persontransport: 1,7 kWh/pp&d ^{xxxii}

Mat: 12 kWh/pp&d ^{xxxiii}

Vatten: 0,4 kWh/pp&d ^{xxxiv}

Jordbruk: 2,9 kWh/pp&d ^{xxxv}

Värme och kyla: 33 kWh/pp&d ^{xxxvi}

Grejer: 22 kWh/pp&d ^{xxxvii}

Frakt: 19 kWh/pp&d ^{xxxviii}

Offentlig sektor: 22 kWh/pp&d ^{xxxix}

CO2 minskning: 10 kWh/pp&d ^{xl}

 150 kWh/pp&d ^{xli}

Total mängd förnybar energi vid full utbyggnad (kWh/person och dygn):

Vattenkraft: 29 kWh/pp&d ^{xlii}

Energi-grödor: 12 kWh/pp&d ^{xliiii}

Skogsavfall: 36 kWh/pp&d ^{xliiii}

Torv: 7 kWh/pp&d ^{xliiii}

Biogas: 4,4 kWh/pp&d ^{xliiii}

Sopförbränning: 1 kWh/pp&d ^{xliiii}

Värmepumpar: 18 kWh/pp&d ^{xliiii}

Vindkraft: 13 kWh/pp&d ^{xliiii}

Vindkraft till havs: 4,8 kWh/pp&d ⁱ

Sol på tak: 3 kWh/pp&d ^{li}

Vätgas: 0 kWh/pp&d ^{lii}

Metanol: 0 kWh/pp&d ^{liii}

Trädplantering: 0 kWh/pp&d ^{liiii}

 129 kWh/pp&d

Energi-gap: ca 21 kWh per person och dygn

Alternativ för att fylla energi-gapet på 21 kWh per person och dygn:

104 m2 solkraftverk per person i Sverige (2 promille av Sveriges yta): **21 kWh/pp&d**^{lv}

Maximal potential för effektivisering av fullt utbyggd förnybar energiproduktion: **22 kWh/pp&d**^{lvi}

Energi-import från hela Sahara: **420 kWh/pp&d**^{lvii}

"Vanlig" kärnkraft: **2,7 kWh/pp&d** i 200 år^{lviii}

Kärnkraft från torium-reaktorer: **19?** kWh/pp&d i 200 år^{lix}

Kärnkraft från brid-reaktorer: **160?** kWh/pp&d i 200 år^{lx}

Fossilt kol med Koldioxidinfångning = CCS = Carbon Capture & Storage: **21 kWh/pp&d**

Bonus: Litet men positivt: Koldioxidlagring idag:

<http://www.globalccsinstitute.com/projects/browse>

Humor-bonus^{lxi}: <http://klimatcbt.yolasite.com/resources/1thirdCCS.gif>

Mer information om denna klimat-utbildning finns på:

<http://klimatcbt.yolasite.com/>

Dagens uppgift är att i det här mailet läsa det som står med fetstil, samt den sista paragrafen. (Den som börjar med "Alternativ för att")

Försök att alltid utföra dagens uppgift direkt när du får mailet. Om du bara har 3 minuter, så slutför uppgiften så bra som den hinner bli på 3 minuter.^{lxii}

Detta mail kan även laddas ner som PDF från:

http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2P_CCS.pdf

Nästa mail kommer om 3 dagar. Det kan även laddas ner som PDF från:

<http://klimatcbt.yolasite.com/ftpservercbt3.php>

Det som står i fotnoterna är alltid bonusmaterial.

ⁱ Fotnot 0.14: Tre minuter per mail räcker för att följa kursen Klimat-CBT. (Fotnot 0.20:)
På tre minuter per mail får man en översiktlig helhetsbild. För den som önskar en djupare förståelse finns möjligheten att läsa resten av mailet. De flesta mail innehåller följande typer av information:

- 3-minuters: På 3 minuter hinner man läsa de viktigaste rubrikerna och slutsatserna så att man kan följa kursen.
- Brödtext: Den löpande texten ger en fördjupad beskrivning av ämnet i mailet.
- Bonus: Intressant information som berör ämnet men inte egentligen hör till kursen.
- Footer: Nedanför brödtexten finns lite information om kursen. Den är i princip likadan i alla mail.
- Fotnoter: I fotnoterna finns alla beräkningar och källor. Läs i fotnoterna (bara) om du vill veta hur jag har räknat, tänkt och resonerat eller vilka källor jag har använt.

Mer information om kursen finns på <http://klimatcbt.yolasite.com/>

ⁱⁱ Fotnot 0.20: Detta är det rekommenderade upplägget: Ägna 3 minuter åt att göra den obligatoriska delen direkt när du får e-mailet. Avsluta den obligatoriska delen då även om du inte är säker på att du gör den på det bästa sättet. Om du har tid och lust (det kan vara omedelbart, senare, eller en annan dag) så kan du göra bonusdelen, eller göra om den obligatoriska delen på ett bättre sätt.

ⁱⁱⁱ Fotnot LXXIV: IPCC Special Report "Carbon Dioxide Capture and Storage" Summary for Policymakers (http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf) (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml "Carbon Dioxide Capture and Storage")

^{iv} Fotnot 2.2.BZ: CDR plays a major role in many mitigation scenarios. Bioenergy with carbon dioxide capture and storage (BECCS) and afforestation are the only CDR methods included in these scenarios. CDR technologies are particularly important in scenarios that temporarily overshoot atmospheric concentrations, but they are also prevalent in many scenarios without overshoot to compensate for residual emissions from sectors where mitigation is more expensive. Similar to mitigation, CDR would need to be deployed on a large scale and over a long time period to be able to significantly reduce CO₂ concentrations
Källa: FN:s klimatpanel AR5 (Fotnot 1.AE:)

Fotnot 1.AE: FN:s klimatpanels senaste rapport AR5 från år 2014:
(http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf) (http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)

^v Fotnot 2.2.BY: För att jorden ska ha värmas upp två grader eller mindre så som världens länder lovade i Paris så behöver vi samla in och lagra en del av den koldioxid vi har släppt ut. Enligt FN:s klimatpanel behöver vi år 2050 ta bort 600 miljoner ton koldioxid från atmosfären varje år och år 2100 kommer vi att behöva ta bort mer än 10 miljarder ton koldioxid från atmosfären varje år.
Källa: (http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf Figure SPM.14 & Figure 4.1) (Fotnot 1.AE:)

^{vi} Fotnot 2.2.BZ: CDR plays a major role in many mitigation scenarios. Bioenergy with carbon dioxide capture and storage (BECCS) and afforestation are the only CDR methods included in these scenarios. CDR technologies are particularly important in scenarios that temporarily overshoot atmospheric concentrations, but they are also prevalent in many scenarios without overshoot to compensate for residual emissions from sectors where mitigation is more expensive. Similar to mitigation, CDR would need to be deployed on a large scale and over a long time period to be able to significantly reduce CO2 concentrations

Källa: FN:s klimatpanel AR5 (Fotnot 1.AE:)

^{vii} Fotnot 1.AP: "Mitigation scenarios reaching about 450 ppm CO2-eq in 2100 (consistent with a likely chance to keep warming below 2°C relative to pre-industrial level) typically involve temporary overshoot of atmospheric concentrations, as do many scenarios reaching about 500 ppm CO2-eq to about 550 ppm CO2-eq by 2100 (Table 3.1). Depending on the level of overshoot, overshoot scenarios typically rely on the availability and widespread deployment of bioenergy with carbon dioxide capture and storage (BECCS) and afforestation in the second half of the century (high confidence)."

"Scenarier som når ca 450 ppm CO2-ekvivalenter år 2100 ... innebär oftast ett tillfällig överskridande av halterna i atmosfären ... omfattande tillämpning av bioenergi med koldioxidavskiljning och lagring (BECCS) och åter-skogning under andra halvan av seklet"

Källa: FN:s klimatpanel. Se (Fotnot 1.AE:)

Se även (Fotnot KM.2P:)

Fotnot KM.2P: Kurs-mail "Klimat 2P: Fossilt kol med Koldioxidinfångning = CCS = Carbon Capture & Storage" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2P_CCS.pdf)

^{viii} Fotnot 2.2.CF: En kWh räcker för att fånga in och komprimera drygt 4 kg CO2 från rökgaser. Drygt 1 kg CO2 kan lagras för varje användbar kWh i ett kolkraftverk med CCS (Fotnot IC:) 25% mer energi krävs för CCS i ett kolkraftverk (huvudsakligen infångning och komprimering) (Fotnot IC:)

$1,1\text{kgCO}_2/\text{kWh} / 25\% \sim 4,4 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$

Fotnot IC: Ett kolkraftverk producerar ca 1 kg koldioxid per kWh. (Fotnot 2.1.AK:)

Ett kolkraftverk med CCS producerar 125% så mycket CO2 som ett vanligt kolkraftverk, men 15% läcker ut i atmosfären direkt. Det betyder att ca 110% måste lagras. (Fotnot LXXV:) Det är:

$110\% * 1\text{kgCO}_2/\text{kWh} = 1,1 \text{ kg CO}_2 \text{ per kWh producerad i ett kolkraftverk med CCS}$

Om 'gapet' är 24 kWh per person och dygn, så blir det alltså på 200 år så här mycket koldioxid som behöver lagras:

$24\text{kWh/pp\&d} * 200\text{år} * 9500000\text{svenskar} * 1,1\text{kgCO}_2/\text{kWh} \approx 16 \text{ miljarder ton CO}_2$

Fotnot 2.1.AK: "The average emission rates in the United States from coal-fired generation are: 2,249 lbs/MWh of carbon dioxide, 13 lbs/MWh of sulfur dioxide, and 6 lbs/MWh of nitrogen oxides." (

<http://www.epa.gov/cleanrgy/energy-and-you/affect/coal.html>)

Enheten lbs eller lb (pounds) är 0,45 kg. ([http://en.wikipedia.org/wiki/Pound_\(mass\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pound_(mass)))

Koldioxidutsläppen från produktionen av 1kWh elektricitet producerad i kolkraftverk är alltså ca: $1\text{kWh} * 0,45\text{kg}/\text{lb} * 2,249\text{lbs}/\text{MWh} \approx 1,02\text{kg koldioxid}$

^{ix} Fotnot 2.2.CD: Mer än en femtedel av jordens jordbruksmark behöver användas till odling av energigröda för BECCS mot slutet av det här århundradet:

- År 2100 kommer vi att behöva ta bort mer än 10 miljarder ton koldioxid från atmosfären varje år (och redan 2050 behöver vi ta bort 6 miljarder ton koldioxid från atmosfären varje år). (Fotnot 2.2.BY:)

- En tiondel av jordbruksmarken behövs till BECCS för att ta bort 1,25 giga-ton kol i form av koldioxid ur atmosfären per år. (Fotnot 2.2.CB:)

- Varje 3,7 ton CO₂ innehåller 1 ton C (Fotnot 1.C:)

$10\text{GtonCO}_2 * 10\% \text{ jordbruksmark} / (1,25\text{GtonC} * 3,7\text{tonCO}_2/\text{tonC}) \sim 22\%$ av jordbruksmarken

Fotnot 2.2.CB: "If 2.5 tC yr⁻¹ per hectare can be harvested on a sustainable basis on about 4% (~500 million hectares, about one tenth of global agricultural land area) of global land (13.4 billion hectares) for BECCS, approximately 1.25 PgC yr⁻¹ could be removed"

Källa: FN:s klimatpanel AR5 WGI (Fotnot 2.2.CA:)

Fotnot 1.C: När kol förbränns till koldioxid så binder varje kol-atom två syre-atomer. Atomvikten är 12 för kol och 16 för syre. 12 kg kol förbränns alltså till: $12 + 2 * 16 = 44$ kg koldioxid
Det betyder alltså att varje kg kol blir $44/12 \approx 3,7$ kg koldioxid

Fotnot 2.2.CA: Climate Change 2013 The Physical Science Basis - FN:s klimatpanels senaste rapport AR5 WGI http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

^x Fotnot 2.2.CE:

^{xi} Fotnot 2.2.CE: Ungefär 3 ton kol per hektar och år (0,4-8tC/ha&år) kan man binda genom att plantera skogar som aldrig mer avverkas.

(IPCC <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf> Table 3)

Med BECCS kan 500 miljarder hektar ta bort 1,25 miljarder ton kol per år (Fotnot 2.2.CB:) vilket motsvarar:

$1,25\text{GtonC} / 500\text{Mha} \sim 2,5$ ton kol per hektar

^{xii} Fotnot 2.2.AJ: Utsläppen inom Sveriges gränser var 11,5 ton per person 1970 och 5,7 ton per person 2005. (http://www.google.com/publicdata?ds=wb-wdi&met=en_atm_co2e_pc&tdim=true&tstart=-315619200000&tunit=Y&tlen=45#ctype=l&strail=false&nسلم=h&met_y=en_atm_co2e_pc&scale_y=lin&ind_y=false&rdim=country&idim=country:SWE&ifdim=country&tdim=true&tstart=-315619200000&tunit=Y&tlen=45&hl=en&dl=en) Det motsvarar en minskning med 2% per år. Ett skäl till den här minskningen är att Sverige satsade på kärnkraft i stället för fossila bränslen, bl.a. just för att minska utsläppen av växthusgaser. Idag producerar Sverige ingen elektricitet från fossila bränslen utom när vi startar upp "nödkraftverk" för att täcka extrema toppar. (Som t.ex. vintern 2010-2011 när det var extremt kallt samtidigt som ett kärnkraftverk stod stilla.)

Svenskarnas utsläpp:

Naturvårdsverkets rapport 5903 "Konsumtionens klimatpåverkan":

"i Sverige motsvarar utsläppen i ett konsumtionsperspektiv drygt 10 ton CO₂e per capita" (<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5903-3.pdf>)

Det motsvarar:

10tonCO₂e/pp&år / 365dygn/år ≈ 27 kg koldioxid-ekvivalenter per person och dygn

Våra konsumtionsbaserade utsläpp har ökat och fortsätter att öka:

(<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6503-4.pdf> Figur 24.)

(http://www.scb.se/statistik/publikationer/MI1305_2012A01_BR_MI72BR1201.pdf "Figur 3.

Utsläpp av växthusgaser förorsakade av svensk konsumtion")

^{xiii} Fotnot 2.2.CG: Vi behöver lagra mer än 10 miljarder ton koldioxid varje år (Fotnot 2.2.BY:) Det är 15 kubik-kilometer komprimerad koldioxid per år:

Om koldioxiden komprimeras maximalt väger den ca 650 kg/m³ (Fotnot 2.1.BA:)

Då blir volymen:

10GtonCO₂/år / 0,65tonCO₂/m³ ~ 15 kubik-kilometer koldioxid per år

Fotnot 2.1.BA: Vid normalt tryck på en atmosfär väger koldioxid 1,977 g per liter. (http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide)

Låt oss säga att vi lagrar koldioxiden under 50 atmosfärers tryck. Då blir densiteten: 1,977g/l * 50atm ≈ 10 miljoner ton/km³

-

Om koldioxiden istället lagras under 150 atmosfärers tryck så blir den superkritisk och uppför sig nästan som en vätska.

"At depths below 800–1,000 m, CO₂ becomes supercritical and has a liquid-like density (about 500–800 kg m⁻³) that provides the potential for efficient utilization of underground storage space and improves storage security"

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf) (Fotnot LXXIV:)

Låt oss räkna med den genomsnittliga densiteten på 650 kg/m³

^{xiv} Fotnot 2.2.X.14: "Ratio of minimum work of air capture at various capture percentages to 90% capture in CCS" är ca 2,8. (Fotnot 2.2.X.110:)

Fotnot 2.2.X.110: Feasibility of Air Capture

(https://sequestration.mit.edu/pdf/ManyaRanjan_Thesis_June2010.pdf)

^{xv} Fotnot LXXV: Figure SPM.2 i rapporten

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf) (Fotnot LXXIV:) visar hur koldioxidutsläppen från ett kraftverk förändras när man inför CCS.

Nästan inga tillämpar CCS idag, men knappt hälften av världens koldioxidutsläpp kommer från stora energiproducerande kraftverk som skulle kunna tillämpa CCS:

“process or industrial activity of worldwide large stationary CO₂ sources ... 13466 MtCO₂/yr” (Fotnot LXXIV: Table SPM.1.)

Världens koldioxid-utsläpp var 30649 miljoner ton koldioxid år 2007 (Fotnot 3.A:)

Källor som lämpar sig för CCS stod alltså för:

13466MtCO₂/yr / 30649MtCO₂/yr ≈ 44% av CO₂-utsläppen

Fotnot 3.A: De totala utsläppen av fossil koldioxid år 2011 var 34,8 miljarder ton. (

http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf "In 2011, annual CO₂ emissions from fossil fuel combustion, cement production and flaring were 34.8 ± 2.9 GtCO₂/yr")

34,8 Giga-ton koldioxid motsvarar 9,5 Giga-ton kol

(Dessutom släpper vi ut andra växthusgaser än koldioxid. (Fotnot 2.1.BE:))

Utsläpp för fler år finns här. Ladda ner data som Excel och titta på landet "World" för en fullständig lista: (<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=graph>)

Fotnot 2.1.BE: Världens samlade utsläpp av koldioxid-ekvivalenter (Fotnot 2.1.BS:) var 44907 miljoner ton år 2010:

- Koldioxid: 33516 (

<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=graph>)

- Metan: 7515 (

<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.METH.KT.CE/countries/1W?display=graph>)

- Kväveoxid: 2860 (

<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.NOXE.KT.CE/countries/1W?display=graph>)

- Övriga växthusgaser: 1015 (

<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGO.KT.CE/countries/1W?display=graph>)

(Enhet: miljoner ton koldioxid-ekvivalenter (Fotnot 2.1.BS:))

Fotnot 2.1.BS: Om Koldioxidekvivalenter: Det finns fler växthusgaser än koldioxid och metan. Man kan beskriva den värmande effekten som var och en av de här gaserna har, men man vill också gärna kunna beskriva den totala sammanlagda effekten. Det gör man genom att räkna ut hur mycket koldioxid som skulle ha samma effekt som de andra gaserna och sedan addera de uträkningarna till den faktiska koldioxidhalten. Summan kallas koldioxidekvivalenter.

Koldioxidekvivalenterna anges för att ge ett snabbt och enkelt mått på den totala växthuseffekten som jorden utsätts för.

Olika växthusgaser är inte direkt jämförbara, eftersom de bryts ner olika snabbt. När man räknar ut koldioxidekvivalenten för en viss mängd växthusgas så anger man "den mängd koldioxid som skulle behöva släppas ut för att ha samma effekt under hundra års tid". Om en växthusgas skulle brytas ner på exakt ett år så skulle den alltså behöva ha 100 gånger så stor effekt molekyl för molekyl, för att anses lika kraftfull räknat i ppm koldioxidekvivalenter, jämfört med en gas som bryts ner på 100 år eller mer.

^{xvi} Fotnot C: För att täcka ett energi-gap på 24 kWh per person och dygn i 200 år med kolkraft och CCS så krävs att Sverige lagrar 16 miljarder ton koldioxid. (Fotnot IC:)

Vid 50 atmosfärers tryck är koldioxidens densitet ca 10 miljoner ton/km³ (Fotnot 2.1.BA:)

Det betyder att vi behöver lagra:

$16\text{GtonCO}_2 / 10\text{Mton/km}^3 \approx 167 \text{ km}^3 \text{ CO}_2$ vid 50 atmosfärers tryck

Om koldioxiden istället lagras under 150 atmosfärers tryck så blir den superkritisk och uppför sig nästan som en vätska. Då är densiteten 650 miljoner ton per m³ (Fotnot 2.1.BA:), så volymen blir:

$16\text{GtonCO}_2 / 650\text{Mton/km}^3 \approx 25 \text{ km}^3$ superkritisk koldioxid.

(Det motsvarar 17% av Vänerens volym på 153 km³.) (<http://sv.wikipedia.org/wiki/V%C3%A4nern>)

^{xvii} Fotnot KM.2K: Kurs-mail "Klimat 2K: 350 ppm, eller kan vi ta bort koldioxid ur luften?" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2K_350ppm.pdf)

^{xviii} Fotnot 2.1.BB: Vi räknade med att ta bort motsvarande 80 ppm m.h.a. CCS och biobränsle, och 24 ppm m.h.a. industriell koldioxidinfångning. Alltså totalt 104 ppm koldioxid som ska lagras i världen. (Fotnot KM.2K:)

Vikten av en ppm CO₂ är 7,8 miljarder ton (Fotnot 2.1.K:)

För att ta oss tillbaka till 350 ppm så behöver vi i hela världen lagra:

$7,8\text{GtonCO}_2 * 104\text{ppm} \approx 818$ miljarder ton koldioxid

Låt oss anta att Sverige ska ta om hand 0,5% av det. (Vi återkommer i sektion 3 till vad som är Sveriges rimliga andel. (Fotnot KM.3J:)) Då ska Sverige lagra:

$0,5\% * 818\text{GtonCO}_2 \approx 4$ miljarder ton koldioxid

Vid 50 atmosfärers tryck är koldioxidens densitet ca 10 miljoner ton/km³ (Fotnot 2.1.BA:)

Det betyder att vi behöver lagra:

$4\text{GtonCO}_2 / 10\text{Mton/km}^3 \approx 41 \text{ km}^3 \text{ CO}_2$ vid 50 atmosfärers tryck

Om koldioxiden istället lagras under 150 atmosfärers tryck så blir den superkritisk och uppför sig nästan som en vätska. Då är densiteten 650 miljoner ton per km³ (Fotnot 2.1.BA:), så volymen blir:

$4\text{GtonCO}_2 / 650\text{Mton/km}^3 \approx 6,2 \text{ km}^3$ superkritisk koldioxid.

Fotnot 2.1.K: Hur många ton CO₂ motsvarar en ppm i atmosfären?

Atmosfären väger ca $5 * 10^{18}$ kg (en femma följd av 18 nollor) (

http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth#Density_and_mass)

Atmosfären består huvudsakligen av 21% syre och 79% kväve.

Molekylvikten för O₂ är: $2 * 16\text{g/mol} \approx 32\text{g/mol}$ (<http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen>)

Molekylvikten för N₂ är: $2 * 14\text{g/mol} \approx 28\text{g/mol}$ (<http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen>)

En mol atmosfär väger alltså: $21\% * 32\text{g/mol} + 79\% * 28\text{g/mol} \approx 29\text{g/mol}$

I atmosfären finns det då totalt: $5 * 10^{18}\text{kg} / 29\text{g/mol} \approx 1,8 * 10^{20}\text{mol}$

ppm betyder "Parts Per Million", d.v.s. miljondelar. (Fotnot 2.1.AQ:) En ppm koldioxid är följaktligen:

$1,8 * 10^{20}\text{mol} / 1000000 \approx 178000$ miljarder mol

Molekylvikten för CO₂ är 44 g/mol (http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide)

Vikten av en ppm CO₂ är alltså: $178000\text{Gmol} * 44\text{g/mol} \approx 7,8$ miljarder ton CO₂

Fotnot KM.3J: Kurs-mail "Klimat 3J: RCI" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat3J_RCI.pdf)

Fotnot 2.1.AQ: Förkortningen ppm står för Parts Per Million, alltså miljondelar. Om koldioxidhalten i atmosfären vore 390 ppm så skulle 390 stycken av varje 1000000 molekyler i luften vara koldioxid-molekyler.

(Jämför med % som betyder 100-delar. Om koldioxidhalten i atmosfären vore 1% så skulle 1 stycken av varje 100 molekyler i luften ha varit koldioxid-molekyler.)

^{xix} Fotnot 2.2.X.78: Om lämpliga platser väljs för lagring av koldioxid, och om dessa platser kontinuerligt övervakas, så att alla eventuella läckor tätas, så kommer med 90% sannolikhet (mer än 99% av) koldioxiden att fortfarande finnas kvar i lagren efter 100 år. Med 66% sannolikhet kommer (mer än 99% av) koldioxiden att fortfarande finnas kvar i lagren efter 1000 år:

FN:s klimatpanel skriver: "the fraction retained in appropriately selected and managed geological reservoirs is very likely to exceed 99% over 100 years and is likely to exceed 99% over 1,000 years." "geochemical trapping ... First, CO₂ dissolves in the in situ water ... over time scales of hundreds of years to thousands of years ... sinks down ... converted to solid carbonate minerals over millions of years."

"can ongoing monitoring and verification be assured and who will pay for these actions? How will information on storage locations be tracked ... What are the time frames for storage? Is it realistic (or necessary) to put monitoring or information systems in place for hundreds of years?"

"Any discussion of long-term CO₂ geological storage also involves intergenerational liability and thus justification of such activities involves an ethical dimension. Some aspects of storage security, such as leakage up abandoned wells, may be realized only over a long time frame, thus posing a risk to future generations."

(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml "Carbon Dioxide Capture and Storage" "Full report in English")

Se (Fotnot 1.U:) för betydelsen av sannolikhetstermerna i texten från FN:s klimatpanel.

Fotnot 1.U: Sannolikhets-termer enligt FN:s klimatpanel AR4

"Virtually certain" - >99% probability of occurrence

"Very likely" - >90% probability

"Likely" - >66% probability

"More likely than not" - >50% probability

"About as likely as not" - 33 to 66% probability

"Unlikely" - <33% probability

"Very unlikely" - <10% probability

"Exceptionally unlikely" - <1% probability

"Very high confidence" - At least 9 out of 10 chance of being correct

"High confidence" - About 8 out of 10 chance

"Medium confidence" - About 5 out of 10 chance

"Low confidence" - About 2 out of 10 chance

"Very low confidence" - Less than 1 out of 10 chance

"Glossary ... IPCC Fourth Assessment Report "

(http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_appendix.pdf)

^{xx} Fotnot 2.2.BG: Låt oss säga att vi som en övergångslösning väljer att lagra koldioxid motsvarande det Svenska energigapet i 200 år (20Gton (Fotnot IC:)), och dessutom Sveriges andel av det vi räknade med att lagra för att ta oss tillbaka till 350 ppm (4Gton (Fotnot 2.1.BB:)). Det motsvarar $20+4 \approx 24$ miljarder ton CO₂.

"the fraction retained in appropriately selected and managed geological reservoirs ... is likely to exceed 99% over 1,000 years."

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf) (Fotnot LXXIV:)

"Likely" betyder "med minst 66% sannolikhet" (Fotnot 1.U:)

Låt oss säga att 95% finns kvar efter 100 år. Det motsvarar att 0,05% läcker ut per år. D.v.s. varje dygn läcker det ut:

$0,05\% * 24\text{GtonCO}_2/\text{år} / 365\text{dygn} \approx 23000 \text{ ton CO}_2 \text{ per dygn}$

16 miljarder ton CO₂ per år kan vi ta bort ur atmosfären till en kostnad av 10 kWh/pp&d i världen men vi har redan använt den fulla potentialen av återskogning, terra preta och biologiskt bränsle till att ta hand om koldioxiden första gången, så nu återstår bara calcinering. (Fotnot KM.2K:) Med calcinering kan man ta bort 0,23 kgCO₂/kWh, så energin som går åt för att fånga in den läckande koldioxiden skulle bli:

$23000\text{tonCO}_2/\text{dag} / 0,23\text{kgCO}_2/\text{kWh} / 9500000\text{svenskar} \approx 10 \text{ kWh/pp\&d}$

^{xxi} Fotnot 2.2.X.77: "Colorless gas ... Odorless ... In higher concentrations 1% (10,000 ppm) will make some people feel drowsy. Concentrations of 7% to 10% may cause suffocation, manifesting as dizziness, headache, visual and hearing dysfunction, and unconsciousness within a few minutes to an hour." (http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide)

^{xxii} Fotnot 2.2.X.57: När koldioxiden binds till mineraler behövs 0,0031 m³ stenmjöl per kWh. Det väger 4,7 kg. (Fotnot 2.2.AN:)

För att täcka det dagliga energi-gapet på 24 kWh för en person, respektive energi-gapet för hela Sverige i 200 år, behöver man alltså så här mycket stenmjöl:

$24\text{kWh/pp\&d} * 4,7\text{kgSten/kWh} \approx 108 \text{ kg Sten per person och dygn}$

$24\text{kWh/pp\&d} * 9500000\text{personer} * 365\text{dygn} * 200\text{år} * 0,0031\text{m}^3\text{Stenmjöl/kWh} \approx 50 \text{ km}^3 \text{ Stenmjöl}$
för att täcka Sveriges energi-gap i 200 år

Vänerns volym är 153 km³ (<http://extra.lansstyrelsen.se/vanern/Sv/fakta-om-vanern/Pages/index.aspx>), så 50 km³ motsvarar: $50 / 153 \approx 32\%$ av Vänerns volym.

Sveriges yta är 450295 km². (Fotnot 2.1.N:) Om man breder ut 50 km³ över den ytan så blir lagret: $50\text{km}^3 / 450295\text{km}^2 \approx 11 \text{ cm tjockt.}$

Fotnot 2.2.AN: Mineralerna behöver bearbetas om de ska binda koldioxiden tillräckligt snabbt. Det kostar ca 322 extra kWh per ton lagrad CO₂

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_chapter7.pdf Table 7.1)

Om man i vanliga fall får ut 1 kWh per 1,1 kg koldioxid (Fotnot IC:) eller 1000 kWh per 1,1 ton lagrad CO₂, så får man med lagring i mineraler alltså ut:

1000kWh - 1,1ton * 322kWh ≈ 639kWh per 1,1 ton CO₂ bundet i mineraler. (Det förbrukar alltså ca 1,7 ggr mer bränsle per kWh än ett kraftverk utan CCS.)

Det motsvarar:

1,1tonCO₂ / 639kWh ≈ 1,8kgCO₂/kWh

Varje ton koldioxid kräver 1,6 – 3,7 ton mineral att bindas till.

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf Paragraf 24, sid 14) (Fotnot LXXIV:) Låt oss använda genomsnittet på 2,65 ton.

Att binda koldioxiden kräver alltså så här mycket sten:

1,8kgCO₂/kWh * 2,65tonSten/tonCO₂ ≈ 4,7 kg sten per kWh

Mineralerna (om det är "silicate rock") har en densitet på ca 3 ton per m³. (2,5-3,5 gånger vattnets specifika vikt http://en.wikipedia.org/wiki/Mineral#Specific_gravity) Volymen sten blir alltså:

4,7kgSten/kWh / 3 ton/m³ ≈ 0,0016 m³ sten per kWh

Stenen ska krossas till stenhjul och behandlas med koldioxid. Låt oss säga att volymen fördubblas av det:

2 * 0,0016m³Sten/kWh ≈ 0,0031 m³ stenhjul per kWh

Fotnot 2.1.N: Marktäckedata för riket som helhet omkr. år 2000. (

http://www.scb.se/Pages/PressRelease_106451.aspx)

27469,29km² Åkermark

7091,2km² Betesmark

221376,45km² Skog

12695,85km² Myr, skogsklädd

38956km² Myr, ej skogsklädd

34855,18km² Gräsmark, hedmark, busksnår, osv.

4486,19km² Berg i dagen och blockmark, ej skogsklädd

177,36km² Grus- och sandtag

147,48km² Flygplats och flygfält

229,95km² Golfbana

5210,4km² Tätortsmark

31034,1km² Inlandsvatten exkl. de fyra största sjöarna

8926km² Vätern, Vättern, Mälaren och Hjälmaren

450295km² Totalareal

^{xxiii} Fotnot 2.2.X.58: För att komma tillbaka till 350 ppm behöver Sverige lagra 4 miljarder ton koldioxid. (Fotnot 2.1.BB:)

Att lagra ett ton koldioxid som mineral kräver 2,65 ton sten. (Fotnot 2.2.AN:)

Densiteten för sten är 3 ton per m³ och vi gissade att densiteten för stenmjöl är hälften av det. (Fotnot 2.2.AN:)

För att binda koldioxiden krävs alltså så här mycket stenmjöl:

$4\text{GtonCO}_2 * 2,65\text{tonSten/tonCO}_2 / (3/2)\text{ton/m}^3\text{stenmjöl} \approx 7,1 \text{ km}^3 \text{ stenmjöl}$

Stenmjölet behöver behandlas för att kunna binda koldioxiden tillräckligt fort. Den behandlingen kräver ca 322 extra kWh per ton lagrad CO₂. (Fotnot 2.2.AN:) Om den energin också ska produceras i kolkraftverk med CCS så skapas 0,0031 m³ stenmjöl per kWh. (Fotnot 2.2.AN:) Det blir ytterligare:

$4\text{GtonCO}_2 * 322\text{kWh/ton} * 0,004\text{m}^3\text{stenmjöl/kWh} \approx 4 \text{ km}^3 \text{ stenmjöl}$

I Sveriges andel av arbetet med att komma tillbaka till 350 ppm ingår alltså att lagra:

$7,1 + 4 \approx 11 \text{ km}^3 \text{ stenmjöl}$

^{xxiv} Fotnot 2.2.X.15: Fundering (Fotnot 0.5:): Skulle det gå att använda en del stenmjöl till konstgjorda öar med sandstränder? (<http://sv.wikipedia.org/wiki/Pepparholm>) (

http://en.wikipedia.org/wiki/Palm_Jumeirah) Eller måste stenmjölet bli finkornigt som lera?

Fotnot 0.5: Det är viktigt att skilja mellan åsikter och vetenskapliga fakta. Avsikten är att alla påståenden i den här kursen ska vara verifierbara vetenskapliga fakta. Det är därför jag är så noga med att inkludera alla källor i fotnoterna. När jag skriver något som är min egen personliga åsikt så markerar jag det så här.

Mina åsikter är naturligtvis alltid bonusmaterial och inte en obligatorisk del av kursen.

^{xxv} Fotnot CII: Med CCS och lagring i mineraler produceras 1,8 kg CO₂ per kWh. (Fotnot 2.2.AN:)

Med CCS utan lagring produceras 1,1 kg CO₂ per kWh. (Fotnot IC:)

Det produceras alltså $1,8 / 1,1 \approx 1,7$ gånger så mycket koldioxid med mineralagring. Det motsvarar att bränsleförbrukningen är 1,7 gånger så stor.

(De andra lagringsalternativen drar förstås också energi för t.ex. borrhning, pumpar, etc.

Komprimeringen av gasen är dock inräknad, så den extra energiåtgången blir troligen liten räknat per kWh.)

^{xxvi} Fotnot LXXVI: "Ocean tracer data and model calculations indicate that, in the case of ocean storage, depending on the depth of injection and the location, the fraction retained is 65–100% after 100 years and 30–85% after 500 years (a lower percentage for injection at a depth of 1,000 m, a higher percentage at 3,000 m)"

(http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summaryforpolicymakers.pdf) (Fotnot LXXIV:)

^{xxvii} Fotnot 2.2.X.16: Rekommenderad läsning för den som bryr sig om haven
What Corals are Dying to Tell Us About CO2 and Ocean Acidification: (http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/eas3030/303_temp/Caldeira_2007_acidification.pdf)
Haven har redan blivit surare, och foraminifererna har redan förlorat en tredjedel av sin skaltjocklek:
(<http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n4/abs/ngeo460.html>)
Ett föredrag på engelska: (http://www.ted.com/talks/lang/en/rob_dunbar.html)
Nyare forskning kan hittas här: (http://scholar.google.se/scholar?as_ylo=2011&q=ocean+acidification&hl=en&as_sdt=0,5)

^{xxviii} Fotnot KM.2C:

^{xxix} Fotnot KM.2C: Kurs-mail "Klimat 2C: Apparater, IT, Media, Ljus och Vattenkraft" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2C_ApparaterITMediaLjusVattenkraft.pdf)

^{xxx} Fotnot KM.2D:

^{xxxi} Fotnot KM.2D:

^{xxxii} Fotnot KM.2D: Kurs-mail "Klimat 2D: Persontransporter, Energigröda, Skogsavfall och Torv" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2D_PersontransporterEnergigrodaSkogsavfallTorv.pdf)

^{xxxiii} Fotnot KM.2E:

^{xxxiv} Fotnot KM.2E:

^{xxxv} Fotnot KM.2E: Kurs-mail "Klimat 2E: Mat, Vatten, Jordbruk, Biogas och Söföbränning" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2E_MatJordbrukBiogasSopforbranning.pdf)

^{xxxvi} Fotnot KM.2F: Kurs-mail: "Klimat 2F: Värme, Kyla, Värmepumpar" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2F_VarmeKylaVarmepumpar.pdf)

^{xxxvii} Fotnot KM.2G:

^{xxxviii} Fotnot KM.2G: Kurs-mail: "Klimat 2G: Grejer, Frakt och Vindkraft" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2G_GrejerFraktVindkraft.pdf)

^{xxxix} Fotnot KM.2H: Kurs-mail: "Klimat 2H: Offentlig sektor och Solenergi" (http://klimatcbt.yolasite.com/resources/Klimat2H_OffentligsektorSolenergi.pdf)

^{xi} Fotnot KM.2K: Kurs-mail "Klimat 2K: 350 ppm, eller kan vi ta bort koldioxid ur luften?" (http://klimatcht.yolasite.com/resources/Klimat2K_350ppm.pdf)

^{xli} Fotnot 2.2.BQ: Enligt SCB så är Sveriges inrikes bruttotillförsel av energi 139 kWh/pp&d och Sveriges inrikes nettotillförsel av energi är 112 kWh/pp&d. (Fotnot 2.1.CG:)
Till det ska läggas ca 25 kWh/pp&d för utrikes resor och transporter samt utrikes producerade varor. (Fotnot 2.1.CI:) Ytterligare 10 kWh/pp&d tillkommer för att ta bort koldioxid som vi redan har släppt ut i atmosfären. (Fotnot KM.2K:)
Den svenska energikonsumtionen är då ca 147kWh/pp&d netto och ca 173 kWh/pp&d brutto.
Se även sammanställning på: (http://klimatcht.yolasite.com/resources/KlimatSammanst_Energibalans.pdf)

Fotnot 2.1.CG: Bruttotillförseln av energi i Sverige var 1721,8 PJ 2011 enligt SCB. (http://www.scb.se/Pages/TableAndChart_24656.aspx) Det motsvarar ca 139 kWh/pp&d: 1721,8PJ / 9500000svenskar / 365dygn ~ 499MJ/pp&d ~ 139 kWh/pp&d
Nettotillförseln av energi i Sverige var 1394,2 PJ 2011 enligt SCB. (http://www.scb.se/Pages/TableAndChart_24662.aspx) Det motsvarar ca 112 kWh/pp&d: 1394,2PJ / 9500000svenskar / 365dygn ~ 404MJ/pp&d ~ 112 kWh/pp&d
(Mellanskillnaden är energiförluster, t.ex. till följd av EROEI, förluster i elnätet etc.)
Dessutom medför vår konsumtion en del energiförbrukning utomlands och vår export medför att en del av vår inrikes energi konsumeras utomlands. Se sammanställning på: (http://klimatcht.yolasite.com/resources/KlimatSammanst_Energibalans.pdf)

Fotnot 2.1.CI: Utrikes energikonsumtion:

- 91% av flygresorna är utrikes ~ 4,5 kWh/pp&d (Fotnot 2.1.CJ:)
- Importerade Grejer ~ 11 kWh/pp&d (Fotnot KM.2G:)
- Drygt hälften av frakten? ~ 10 kWh/pp&d (Fotnot KM.2G:)

Summa ca 25 kWh/pp&d

Fotnot 2.1.CJ: En svensk flyger i genomsnitt ca 32 mil per år inrikes:
2,98Gpkm / 9500000svenskar ~ 32 mil per person och år
En svensk flyger i genomsnitt ca 328 mil per år utrikes:
31Gpkm / 9500000svenskar ~ 328 mil per person och år
En svensk flyger i genomsnitt ca 360 mil per år sammanlagt:
32mil/pp&år + 328mil/pp&år ~ 360mil/pp&år
... varav 91% utrikes:
32mil/pp&år / 360mil/pp&år ~ 91%
Utsläppen av växthusgaser vid utrikesresor är ca :
7,3MtonCO₂e / 31Gpkm ~ 2,4 kg CO₂e per personmil
4,1MtonCO₂ / 31Gpkm ~ 1,3 kg CO₂ per personmil
Varje kg CO₂ motsvarar ca 3,8 kWh förbrukat bränsle (Fotnot 2.1.BG:) så energiförbrukningen per mil är ca:
1,3kgCO₂/pp&mil * 3,8kWh/kgCO₂ ~ 5 kWh per personmil
Energiförbrukningen i genomsnitt är ca 4,9 kWh per person och dag:
360mil/pp&år * 5kWh/personmil / 365dagar/år ~ 4,9 kWh/pp&d
... varav 4,5 kWh per person och dag utrikes:
328mil/pp&år * 5kWh/personmil / 365dagar/år ~ 4,5 kWh/pp&d
En tur och retur resa till Thailand för en person motsvarar ensam ca 25 kWh per dag i ett helt år.
(Fotnot 2.1.CK:)

Källor:

"Inrikes passagerarkilometer ... Antalet passagerarkilometer uppgick under 2010 till 2,98 miljarder" (http://trafa.se/PageDocuments/Luftfart_2010.pdf) (<http://www.trafa.se/sv/Statistik/Luftfart/>)
"Den svenska befolkningens utrikesresande under ett år ... Flyg ... Resande 31 mdr p-km ... Utsläpp av koldioxid 4,1 Mton CO₂ ... Utsläpp totalt av växthusgaser 7,3 Mton CO₂e" (<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5903-3.pdf> Tabell 4:)

Fotnot 2.1.BG: "Petroleum diesel ... carbon chains that typically contain between 8 and 21 carbon atoms per molecule." (http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_fuel#Refining)
Låt oss räkna med att diesel i genomsnitt är en enkel kolvätekedja med 15 kolatomer och 32 väteatomer, och att den förbränns fullständigt.
Atomvikten är 12 för kol och 1 för väte.
Andelen som är kol av dieselnsvikt är alltså: $(15 \cdot 12) / (15 \cdot 12 + 32 \cdot 1) \approx 85\%$
Densiteten för diesel är ca 0,9 kg per liter (Fotnot 2.1.CH:) så en liter diesel innehåller:
 $85\% \cdot 0,9\text{kg/liter} \approx 0,76 \text{ kg kol per liter diesel}$
Ett kg kol förbränns till 3,7 kg koldioxid (Fotnot 1.C:)
En liter diesel förbränns alltså till: $0,76\text{kg/liter} \cdot 3,7 \approx 2,8 \text{ kg CO}_2$
Det motsvarar 0,36 l diesel per kg CO₂:
Diesel innehåller drygt 10 kWh/l (Fotnot 2.1.AB:) så 1 kg CO₂ motsvarar också:
 $10,5\text{kWh/l} \cdot 0,36\text{ldiesel/kgCO}_2 \sim 3,8 \text{ kWh/kgCO}_2$

Fotnot 2.1.CK: Fågelvägen Göteborg-Phuket är det 900 mil. Fågelvägen Stockholm-San Fransisco är också nästan 900 mil.
Ett flygplan förbrukar ca 5 kWh per resenär och mil. (Fotnot 2.1.CJ:)
En interkontinental flygresa ToR förbrukar alltså ca 9 tusen kWh:
 $2 \cdot 900\text{mil} \cdot 5\text{kWh/pp\&mil} \sim 9000 \text{ kWh}$
Utslaget över hela året blir det ca 25 kWh per dag:
 $9000\text{kWh} / 360\text{dagar/år} \sim 25 \text{ kWh/dag}$

Fotnot 2.1.CH: "Petrol's density is 0.737. Diesel's is 0.820–0.950" kg per litre (http://www.withouthotair.com/c3/page_31.shtml) (Fotnot 0.3:)

Fotnot 2.1.AB: Flytande bränsle innehåller en kemisk energi motsvarande ca 10 kWh per liter. "the actual value of 10 kWh per litre. ORNL [2hcgdh] provide the following calorific values: diesel: 10.7 kWh/l; jet fuel: 10.4 kWh/l; petrol: 9.7 kWh/l" (http://www.withouthotair.com/c3/page_31.shtml) (Fotnot 0.3:)

Fotnot 0.3: Boken "Sustainable Energy – without the hot air" beskrivs under Källor. (<http://klimatchbt.yolasite.com/kallor.php>)
Det här är en föreläsning på engelska där professor David MacKay som har författat boken sammanfattar mycket av de slutsatser vi kommer att komma fram till. (<http://www.youtube.com/watch?v=GFosQtEqzSE>) Filmen är drygt en timme lång. Föredraget är 47 minuter, och resten av tiden är en frågestund efter filmen.
I föredraget nämner han den här kalkylatorn: (<http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/>)
Detta är ett annat föredrag av professor David MacKay som också är väl värt att titta på. Det är knappt 20 minuter långt (<http://www.youtube.com/watch?v=-5bVbfWuq-Q>) och detta är de slides han visar under presentationen (<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/presentations/tef/>)
Det finns även en föreläsningsserie som bygger på boken (<http://www.youtube.com/watch?v=sHJyH7j2n4w&list=PL1gduOj1Ehq53NGs0nDjcQooVhcjIG2>)

^{xlii} Fotnot KM.2C: Kurs-mail "Klimat 2C: Apparater, IT, Media, Ljus och Vattenkraft" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2C_ApparaterITMediaLjusVattenkraft.pdf)

^{xliii} Fotnot KM.2D:

^{xliv} Fotnot KM.2D:

^{xliv} Fotnot KM.2D: Kurs-mail "Klimat 2D: Persontransporter, Energigröda, Skogsavfall och Torv" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2D_PersontransporterEnergigrodaSkogsavfallTorv.pdf)

^{xlvi} Fotnot KM.2E:

^{xlvi} Fotnot KM.2E: Kurs-mail "Klimat 2E: Mat, Vatten, Jordbruk, Biogas och Söföbränning" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2E_MatJordbrukBiogasSoforbranning.pdf)

^{xlvi} Fotnot KM.2F: Kurs-mail: "Klimat 2F: Värme, Kyla, Värmepumpar" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2F_VarmeKylaVarmepumpar.pdf)

^{xlix} Fotnot KM.2G:

^l Fotnot KM.2G: Kurs-mail: "Klimat 2G: Grejer, Frakt och Vindkraft" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2G_GrejerFraktVindkraft.pdf)

^{li} Fotnot KM.2H: Kurs-mail: "Klimat 2H: Offentlig sektor och Solenergi" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2H_OffentligsektorSolenergi.pdf)

^{lii} Fotnot KM.2I:

^{liii} Fotnot KM.2I:

^{liv} Fotnot KM.2I: Kurs-mail: "Klimat 2I: Vätgas, Metanol och Trädplantering" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2I_VatgasMetanolTradplantering.pdf)

^{lv} Fotnot KM.2L: Kurs-mail "Klimat 2L: Hur fyller vi gapet?" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2L_HurFyllerViGapet.pdf)

^{lvi} Fotnot KM.2M: Kurs-mail "Klimat 2M: Effektivare energiproduktion" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2M_EffektivareEnergiproduktion.pdf)

^{lvii} Fotnot KM.2N: Kurs-mail "Klimat 2N: Energi-import" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2N_Energiimport.pdf)

^{lviii} Fotnot KM.2O:

^{lix} Fotnot KM.2O:

^{lx} Fotnot KM.2O: Kurs-mail "Klimat 2O: Kärnkraft" (http://klimatchbt.yolasite.com/resources/Klimat2O_Karnkraft.pdf)

^{lxi} Fotnot 0.13: Det som inte tål att skrattas åt är väl inte heller värt att ta på allvar :-)

^{lxii} Fotnot 0.20: Detta är det rekommenderade upplägget: Ägna 3 minuter åt att göra den obligatoriska delen direkt när du får e-målet. Avsluta den obligatoriska delen då även om du inte är säker på att du gör den på det bästa sättet. Om du har tid och lust (det kan vara omedelbart, senare, eller en annan dag) så kan du göra bonusdelen, eller göra om den obligatoriska delen på ett bättre sätt.