

Mennesket bruger meget energi – her illustreret ved nat-telys fra områder med stor befolkningstæthed.

Foto: Shutterstock

# ENERGI OG KLIMAKRISEN

**“Negative udledninger, carbon-fangst og netto-nul-brændstoffer” er centrale begreber i bestræbelserne på at tackle klimakrisen. Men hvad dækker disse begreber egentlig over, og hvilke udfordringer står vi overfor i den forbindelse? Det får du et overblik over i denne artikel.**

**M**enneskeheden befinder sig på et kritisk punkt i historien. Effekterne af klimaforandringer bliver mere synlige for hvert år: Stigende overfladetemperatur, smeltende poler og ekstremt vejr, som bare er nogle få ud af mange tegn på, at jordens naturlige balance er truet. I midten af krisen findes ét af de mest kendte grundstoffer, carbon (kulstof). Carbon i kemiske forbindelser har evnen til at indeholde store mængder energi, som vi høster og bruger til alverdens formål, lige fra det første bål til nutidens rumrejser. Afbrændingen af carbon-forbindelser er den primære drivkraft bag menneskets store fremskridt gennem de seneste tusinder af år. Men hver gang vi høster energien, efterlader vi også en usynlig gas, der nu ligger

som en dyne i atmosfæren over jordens overflade og skaber global opvarmning og klimaforandringer: Carbondioxid eller CO<sub>2</sub>.

CO<sub>2</sub> er ét af de styrende elementer i jordens energibalance. Det har gennem hele jordens 4,5 milliarder års lange historie været i atmosfæren, hvor det fungerer som drivhusgas. CO<sub>2</sub> absorberer varmeenergi afgivet fra jorden og reflekterer den. Noget af energien reflekteres tilbage mod jorden, hvilket skaber mere opvarmning, og noget ender på den anden side af atmosfæren i rummet. Hvis vi som et tankeeksperiment tog alt CO<sub>2</sub> ud af atmosfæren, vil resultatet være en fuldkommen tilfrosset jordklode uden evnen til at opretholde højere liv, så vi har meget at takke CO<sub>2</sub> og drivhuseffekten for. Men i det omvendte scenario med forøgel-

se af CO<sub>2</sub> vil mere og mere varmeenergi blive fanget mellem jorden og atmosfæren og skabe højere og højere temperaturer. Det er det, vi oplever lige nu.

## Hvor er vi?

I 2015 underskrev 196 lande under FN Parisaftalen, der forpligter dem til at tage skridt til at reducere CO<sub>2</sub>-udledninger for at begrænse den globale temperaturstigning til under 1,5 grader Celsius i forhold til førindustrielle niveauer. FN's klimapanel, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), overvåger fremskridtet i forhold til aftalen og giver regelmæssige videnskabelige vurderinger af klimaforandringer, påvirkninger, risici samt muligheder for tilpasning og risikoreduktion.

Et vigtigt spørgsmål er nu, hvor

## Om forfatteren



Mads Lundgren Bendixen er uddannet biolog med speciale i mikrobiologi fra Aarhus Universitet. Han har arbejdet med forskningsformidling siden 2016 og er nu ansat som Director of Outreach ved The Novo Nordisk Foundation CO<sub>2</sub> Research Center, Aarhus Universitet. mlb@corc.au.dk

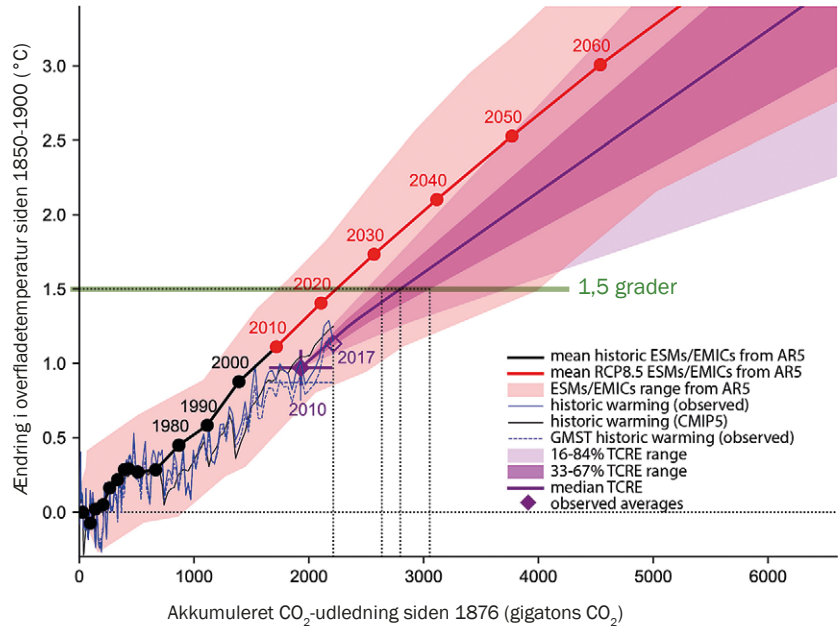
meget mere CO<sub>2</sub> atmosfæren kan optage, før vi når det fastsatte loft på 1,5 graders temperaturstigning. Ifølge IPCC har vi kun cirka 260 gigaton CO<sub>2</sub> tilbage, før vi når loftet på 1,5 grader, og omkring 1009 gigaton CO<sub>2</sub> tilbage, før vi når 2 grader (figur 1). Men det mere interessante spørgsmål er, hvor lang tid vi har til at bruge de resterende 261 gigaton CO<sub>2</sub>. Det er den tid, vi har til at løse problemet, og svaret afhænger primært af, hvordan menneskeheden håndterer CO<sub>2</sub>-udledninger.

I 2021 udledte vi i alt omkring 42,2 gigaton CO<sub>2</sub>-ækvivalenter af drivhusgasser, og udledningerne forventes at være endnu højere i 2022. Med udgangspunkt i udledningerne fra 2021 og de resterende 260 gigaton CO<sub>2</sub>, har vi groft sagt cirka 6 år tilbage, før vi rammer de 1,5 graders temperaturstigning. Heldigvis kan der stadig ske betydelige ændringer! Vi så for eksempel en betydelig reduktion af årlige udledninger under COVID-19-pandemien, hvilket viser, at vi er i stand til at påvirke udledningerne. Men der er ingen tvivl om, at det kræver en betydelig indsats.

Det er dog blevet mere usandsynligt, at vi kan holde temperaturstigningen under 1,5 grader. Mange klimamodeller arbejder dog med scenarier, hvor temperaturen i en periode kan overstige 1,5 grader for derefter at falde igen. Dette kaldes "overshoots" og kan ses som en strategi for at nå langsigtede mål. For eksempel kan man tillade en midlertidig overskridelse af 1,5 graders-målet for at opnå et klimamål i 2050 eller 2100. Dette er en risikabel klimastrategi, men den kan give mere tid til at udvikle tekniske og systemiske løsninger til at reducere CO<sub>2</sub>-udledninger, før tiden løber ud. Men hvordan kan dette opnås?

### Hvor skal vi hen?

IPCC arbejder med langsigtede mål og prøver at inkorporere al den indsamlede viden i klimamål og -strategier. Generelt er der blevet udarbejdet nogle scenarier for, hvordan man kan opnå klimaneu-



Figur 1. IPCC har observeret en næsten lineær sammenhæng mellem den samlede mængde CO<sub>2</sub> i atmosfæren og jordens overfladetemperatur. Jo mere CO<sub>2</sub>, der er i atmosfæren, desto mere varme reflekteres tilbage og mindre varme afgives til rummet. Figuren viser denne sammenhæng ved at vise den kumulative ophobning af CO<sub>2</sub>-udledninger siden 1876 og den tilsvarende stigning i overfladetemperaturen siden den industrielle revolution. Kilde: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 C

tralitet og overholde Parisaftalen til år 2100. Nogle af disse scenarier inkorporerer overshoots, mens andre opererer med ingen eller næsten ingen overshoot (se figur 2). Hvis man ser på udledningerne i år 2100 for de forskellige scenarier, er der meget stor forskel på deres størrelse. Men for dem alle gælder, at vi i år 2100 skal under det punkt udledningerne rammer nul. Vi skal

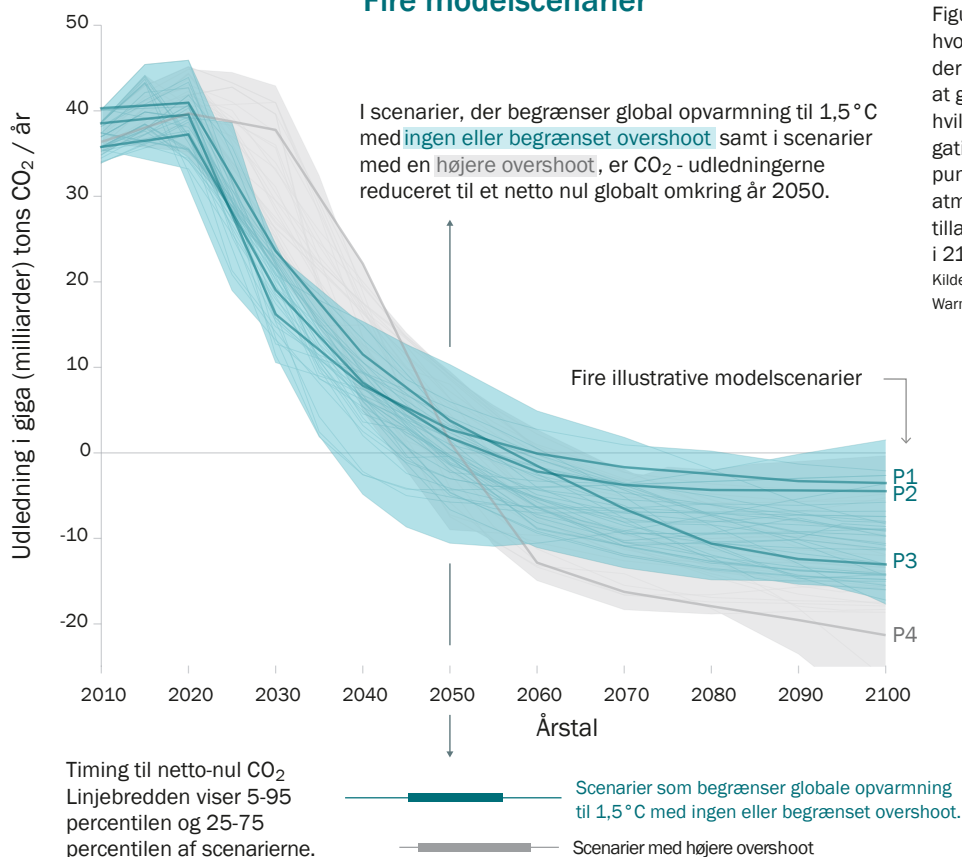
altså i minus, hvilket kaldes negative udledninger. Negative udledninger er et komplekst og omdiskuteret begreb, men i det store hele betyder det, at vi netto skal fjerne mere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, end vi udleder – på global plan. Det er altså ikke længere nok at reducere udledningerne til nul. Vi skal under nul. CO<sub>2</sub> kan fjernes fra atmosfæren enten gennem en række naturbaserede

## Tema om CO<sub>2</sub> i Aktuel Naturvidenskab

En af tidens helt store udfordringer er at nedbringe atmosfærens koncentration af CO<sub>2</sub> til et niveau, der kan begrænse den globale temperaturstigning til et acceptabelt niveau. I den såkaldte Parisaftale er dette fastsat til 1,5 °C i forhold til tiden før industrialiseringen. Vejen til dette mål går over en masse tiltag, der kan samles under forkortelsen CCUS, der står for *Carbon Capture Utilization and Storage*, dvs. Fangst, udnyttelse og lagring af carbon (kulstof). Det dækker altså over en bred palette af metoder, der alt sammen har som endemål, at der fjernes CO<sub>2</sub> fra atmosfæren eller udledes mindre, end der gør i dag.

I en række temaartikler vil vi i dette og kommende numre af Aktuel Naturvidenskab dykke ned i dette store emne og se nærmere på nogle af de mange forskningsprojekter, der udfolder sig indenfor dette område. Da det er et område, der hurtigt udvikler sig i disse år, vil vi selvfølgelig løbende følge op på emnet og samle nye artikler indenfor området i en temaindgang på hjemmesiden.

## Fire modelscenarier



Figur 2. IPCC P1-P4 er scenarier for, hvordan vi holder temperaturen under 1,5 graders stigning. Man kan se, at grafen går under nul i alle tilfælde, hvilket betyder at der er brug for negative udledninger – altså at vi når et punkt, hvor der fjernes mere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren end der tilføres. P4 (grå) tillader et større overshoot og kræver i 2100 større negative udledninger.

Kilde: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 C

løsninger (som jorde og skove) eller via menneskeskabte teknologiske løsninger designet til at fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren i stor skala.

Hvilket scenarie, man følger, har stor indvirkning på, hvor store negative udledninger, der er behov for. Som hovedregel siger man, at jo mere CO<sub>2</sub>, vi lukker ud nu, og jo større overshoot, man tillader, des større negative udledninger er der behov for i år 2100. Omvendt, jo mere vi globalt kan reducere CO<sub>2</sub>-udledninger nu, jo mindre skal der indfanges i fremtiden. Om der står minus 20 Gt om året eller 5-6 Gt om året i 2100 er faktisk ret væsentligt. Det er nemlig både besværligt og dyrt at nå frem til negative udledninger.

Foruden behovet for negative udledninger skal der også findes tekniske og systemiske løsninger på at nedbringe de udledninger, som er svære at reducere. Det kan for eksempel være grønt brændstof til flytransport eller tung trafik og indu-

stri, hvor man ikke kan elektrificere. For eksempel kan CO<sub>2</sub> fanget i biomasse eller fra atmosfæren laves til brændstof, som ved afbrænding udleder CO<sub>2</sub> til atmosfæren igen. Det giver netto nul CO<sub>2</sub> til atmosfæren og kaldes samlet set for netto-nul-udledninger.

For at opsummere skal vi have styr på tre ting for at nå Parisaftalens mål: reduktion af nuværende udledninger, netto-nul-teknologi og til sidst de negative udledninger. Faktisk er Danmarks klimamål for 2050 også negative med en målsætning på 110 % reduktion – altså 10 % negative udledninger!

### Reduktion, konvertering og negative udledninger

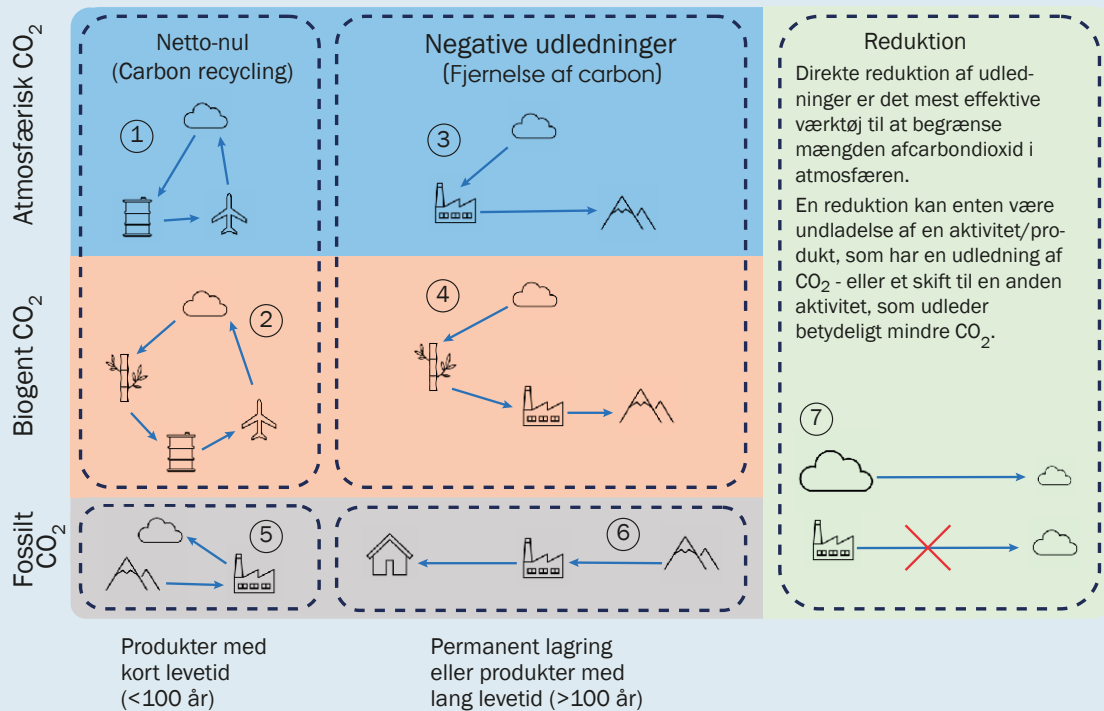
Et godt eksempel på en reduktion af CO<sub>2</sub>-udledninger på et personligt plan er at tage cyklen i stedet for bilen. Cyklings udleder næsten ingen CO<sub>2</sub>, mens bilen udleder forholdsvis meget. Udledninger, som bilkørsel ville have haft, trækkes simpelthen ud af regnskabet. Det samme kan

på sin vis siges om at tage en el-bil – dog koster både en bil, en cykel og en elbil nogle udledninger, når de bliver produceret, og den udledning skal selvfølgelig trækkes fra. Man skal altså tænke i et komplet regnestykke “fra vugge til grav”, når man opgør en aktivitets eller produkts CO<sub>2</sub>-udledning.

Hvis man derimod tager bilen og kører på fossilt brændstof, har man en direkte positiv udledning. Det er de udledninger, vi skal gøre noget ved hurtigst. Her bliver carbon, som ellers ville være bundet i olie i undergrunden, til CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

Tager man bilen, men kører på brændstof udvundet fra biomasse, er det en netto-nul-udledning. Afgrøder, som har optaget atmosfærisk CO<sub>2</sub> gennem fotosyntese og senere bliver raffineret til biobrændsel og brændt af i bilens forbrændingsmotor, vil i udgangspunktet resultere i den samme mængde CO<sub>2</sub> i atmosfæren som før. Det gælder dog kun, hvis alle

## CO<sub>2</sub>- aftryk



Illustrationen giver en oversigt over, hvordan forskellige kombinationer af carbonkilder og slutdestination kan have markant forskellige resultater, når man beregner CO<sub>2</sub>-aftrykket. Det er i den forbindelse vigtigt at forstå, at en "reduktion i udledning af CO<sub>2</sub>" ikke mindsker atmosfærens CO<sub>2</sub>-indhold – det kan vi kun opnå ved hjælp af negative emissioner.

Negative emissioner er illustreret ved 3 og 4 på figuren, hvor CO<sub>2</sub> fanget direkte fra atmosfæren eller via biomasse bruges i produkter med lang levetid eller permanent lagres.

Reduktion i CO<sub>2</sub>-udledning kan for eksempel opnås ved

at fange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren eller biomasse og udnytte det i produkter som flybrændstof, der igen frigiver CO<sub>2</sub>, når det bliver brugt (1 og 2 på figuren). Reduktioner kan også omfatte adfærdsændringer, såsom at bruge vedvarende energikilder til belysning derhjemme eller slukke for lyset, når der ikke er behov for kunstigt lys.

5 og 6 på figuren illustrerer traditionel brug af fossile carbonkilder.

For at skabe en mere bæredygtig fremtid er det vigtigt at kombinere både reduktioner og negative emissioner i vores bestræbelser på at mindske CO<sub>2</sub>-udledningen og stabilisere klimaet.

trin i raffineringen er CO<sub>2</sub>-neutrale – fra vugge til grav.

Hvis man kører bilen på biobrændsel og fanger CO<sub>2</sub>'en, man udleder, for derefter at lagre den permanent (over 1000 år), vil det blive anset for en negativ udledning, da CO<sub>2</sub>'ens oprindelse er atmosfæren, og endestationen er permanent lagring. Det er faktisk en af de metoder, som man tror meget på lige nu og bliver kaldet BECCS (som står for BioEnergy Carbon Capture and Storage). BECCS foregår på kraftvarmeverker, som opvarmer deres kedler med afbrænding af biomasse som træflis eller halm.

CO<sub>2</sub>'en i den røggas, der produceres under afbrændingen, fanges og kan derefter lagres. På den måde får man energi ud af biomassen og også en negativ udledning. Afbrænding af biomasse er dog meget udskaeldt, da det lægger beslag på arealer til produktion af "energi-afgrøder", som kunne være brugt til andre formål, for eksempel natur eller fødevarerproduktion.

Fangst af CO<sub>2</sub> er altså et centralt element i at opnå negative udledninger. Men heri ligger også udfordringen, da det desværre ikke er så ligetil at fange CO<sub>2</sub>. Det bringer os direkte tilbage til energien i det hele.

### Energien i det hele

Ifølge IPCC's beregninger er der behov for tekniske løsninger til reduktion, negative udledninger og netto-nul-løsninger. Inden 2030 bør størstedelen af reduktionerne komme fra udbygningen af sol- og vindenergi, hvilket udgør cirka 4 gigaton (Gt) for begge energityper. Dog skal der ifølge IPCC også findes næsten 1 Gt gennem fangst og lagring af CO<sub>2</sub> (CCS, Carbon Capture and Storage). På overfladen kan det virke som en smart idé, der kan løse klimaproblemet hurtigt. Men de eksisterende teknologier på området er meget energikrævende og stadig i en tidlig udviklingsfase.

**Ynderlige læsning.**  
IPCC 2018: Special Report: Global Warming of 1.5 °C.

Om carbon fjernelse: CDR Primer; skrevet af Holly Buck og Roger D. Aines, 2021: [cdrprimer.org/read](http://cdrprimer.org/read)

Remaining carbon budget; Carbon-clock: [www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html](http://www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html)

Populær formidling fra MIT: Climate Science, Risk & Solutions: [climateprimer.mit.edu](http://climateprimer.mit.edu)

Der er kun få fungerende anlæg på verdensplan, hvilket betyder, at teknologien stadig er ung. Derfor er det vigtigt, at vi i de kommende år opfører flere anlæg, så vi kan lære og reducere omkostningerne ved CO<sub>2</sub>-opsamling markant. Forskningen spiller en afgørende rolle i denne sammenhæng, da der er behov for meget mere forskning for at finde de bedste metoder og teknologier til forskellige situationer. Der er sjældent én universel løsning, så forskning er afgørende for at afdække de optimale tilgange.

Et eksempel, der illustrerer det store energibehov, er grøn produktion af metanol (CH<sub>3</sub>OH) – et brændstof, som kan bruges til tung transport i fremtiden. For at producere 1Gt metanol ud fra CO<sub>2</sub> skal der bruges 0,14 Gt hydrogen. Hydrogen bliver fremstillet ved spaltning af vand i elektrolyse, og for at producere 0,14 Gt hydrogen skal man tilføre vandet 6,710 TWh strøm. Det er rigtigt meget! Til sammenligning er USA's samlede energiforbrug om året lidt under 4000 TWh, så det vil altså kræve en mængde strøm

svarende til halvanden gang USA's samlede energiforsyning at producere blot et gigaton metanol. Og det skal vel at mærke være strøm fra vedvarende energi (i dag stammer kun 12,5% af USA's energiforsyning fra vedvarende energikilder). I Danmark har vi på grund af vindmøller og afbrænding af biomasse meget vedvarende energi i forhold til mange andre lande, og det er også en af grundene til, at vi kommer til at se mange af de såkaldte power-to-x (PtX) projekter i Danmark. Energiforbruget er nemlig ikke ens gennem alle døgnets timer og sæsoner, og nogle gange produceres mere, end vi forbruger. Det er derfor smart, at man kan producere brændstoffer og andre brugbare kemikalier med den grønne strøm, som er i overskud.

#### Vi skal vende strømmen!

I tusinder af år, siden tæmning af ilden, har menneskeheden fået sin energi fra carbon-forbindelser. Vi har udledt CO<sub>2</sub> fra biomasse og senere fra fossile kilder i en stadig større strøm af carbon til atmosfæren. Nu står vi over for en

presserende opgave med at omdirigere carbon-strømmen, så den går tilbage fra atmosfæren til biomasse og undergrunden. Det kræver, at vi frigør os fra vores afhængighed af fossile brændstoffer og skaffer enorme mængder energi for at vende processen om.

Heldigvis er forskere over hele verden engageret i at finde nye og innovative løsninger, der gør teknologierne nemmere, mere skalerbare, billigere og ikke mindst reducerer energiforbruget. Vi kan sammenligne vores situation med et budget, hvor vi som menneskehed skal investere i negative udledninger og smarte løsninger for at skabe mere tid – og vores valuta i denne sammenhæng er primært vedvarende energi.

Dog kan de teknologiske løsninger ikke redde os alene. Først og fremmest er det afgørende, at vi fokuserer på områder, hvor vi kan opnå betydelige reduktioner hurtigst muligt! Dette er ikke kun den mest omkostningseffektive tilgang, men også den mest levedygtige. ■

Roskilde Universitet

# Læs Naturvidenskabelig Bachelor

” Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor