



# EKONOMI- HÖGSKOLAN

## Grön produktion och fortsatt ekonomisk tillväxt?

En simuleringsstudie av EU:s framtida ekonomiska tillväxt och  
växthusgasutsläpp

Nationalekonomiska institutionen

Lunds Universitet

Författare: Elvira Wiktorsson & Karin Östling Svensson

Handledare: Pontus Hansson

NEKH03 Examensarbete – Kandidatnivå

VT2020

## **Abstract**

The intertemporal relationship between economic growth and climate change represents a major challenge for the economies of today. The growth in production based on carbon-intensive inputs has contributed to a continuous increase in greenhouse gas emissions since the Industrial Revolution. The aim of this essay is to analyse the relationship between climate change and economic growth within the European Union (EU) and how it will continue to evolve over the course of the coming century. The essay examines how growth and greenhouse gas emissions are affected by maintaining the current carbon-intensive production system and analyses whether the EU can reach its goal of becoming a climate-neutral economy by 2050, using existing resources to invest in green capital and green technological development. By developing an endogenous growth model based on the Romer model, where greenhouse gas emissions are endogenised and growth is driven by both carbon intensive and green technological change, the essay assesses how environmental policy will affect GDP per capita growth and the accumulation of greenhouse gases. The main conclusions are that continued production through a carbon-intensive system will have a negative impact on both the climate and economic performance. However, investing in green capital and green technology will induce a stabilisation of atmospheric greenhouse gas levels and help ensure sustained long-term economic growth. Achieving the objective of climate neutrality by 2050 will however require the EU to increase investment in capital and technological development.

Key words: climate change, economic growth, European Union, endogenous growth model, greenhouse gas emissions, green technology, green capital.

Word count: 12 521

## Innehållsförteckning

1. Inledning .....	5
1.1 Syfte och frågeställning .....	5
1.2 Metodologiskt upplägg .....	6
1.3 Disposition .....	6
2. Tidigare forskning .....	7
3. Bakgrund.....	9
3.1 En grön omställning av produktionen.....	9
3.1.1 Realkapital och infrastruktur .....	9
3.1.2 Teknologi.....	10
3.2 EU:s klimatarbete .....	11
4. Ekonomisk tillväxt.....	12
4.1 Teoretisk introduktion .....	12
4.1.1 Romer-modellen .....	12
5. Tillväxtmodellen.....	15
5.1. Introduktion till modellen .....	15
5.2 Notation .....	17
5.3 Modellens produktionsfunktion och antaganden.....	17
5.3.1 Produktionsfunktion .....	17
5.3.2 Realkapital .....	18
5.3.3 Arbetskraft.....	19
5.3.4 Teknologisk utveckling .....	20
5.3.5 Utvecklingen av ackumulerade växthusgaser.....	21
5.4 Modellen i jämvikt.....	21
5.4.1 Tillväxttakt i BNP per capita i jämvikt.....	22
5.4.2 En miljömässigt hållbar ekonomi .....	23
5.4.3 BNP per capita i jämvikt.....	24
6. Simuleringar .....	25
6.1 Framtidsprognoser .....	26
6.1.1 Klimatåtgärder .....	26
6.1.2 Scenarier .....	27
6.2 Skattningar av variabler och parametrar.....	29
6.2.1 Skattningar av variabler.....	29
6.2.2 Skattningar av parametrar.....	30
7. Resultat och analys .....	32

7.1 BNP per capita och tillväxttakt i BNP per capita .....	33
7.2 Ackumulerade växthusgaser och tillväxttakt i ackumulerade växthusgaser .....	36
7.3 Att kombinera klimatåtgärder .....	39
7.4 Reflektioner om modellen .....	39
8. Sammanfattande slutsatser.....	41
Referenslista .....	44
Appendix I .....	46
Appendix II.....	48

## **1. Inledning**

Att säkerställa framtida generationers välfärd, både miljömässigt och ekonomiskt, är en av vår tids mest utmanande frågor. Om dagens ekonomiska tillväxt sker på bekostnad av klimatet äventyras framtida generationers levnadsstandard.

Den globala ekonomiska tillväxten har varit hög sedan den industriella revolutionen, vilket har möjliggjort en markant förhöjning av människors levnadsstandard världen över (IPCC, 2018, s.4). Världsekonomin har växt i takt med att populationen och efterfrågan av producerade varor och tjänster har ökat. Eftersom produktionen till stor del har baserats på teknologi som är beroende av fossila bränslen har den ekonomiska tillväxten inte endast medfört en förhöjd levnadsstandard utan också resulterat i en stor ökning av växthusgaser i atmosfären. Detta har i sin tur orsakat en förhöjning av den globala medeltemperaturen. Om produktionen fortsätter att släppa ut stora mängder växthusgaser, i synnerhet koldioxid, riskerar det att leda till stora klimatförändringar (OECD, 2017, s.18,40-41).

Mänsklig aktivitet har hittills orsakat en global uppvärmning på 1°C över förindustriella nivåer och temperaturen kommer att fortsätta att stiga om inga åtgärder vidtas (IPCC, 2018, s.4). I takt med att temperaturen stiger ökar risken för irreversibla klimateffekter som kan ha stor negativ påverkan på den ekonomiska tillväxten. I Parisavtalet har världens länder enats om att begränsa höjningen av den globala medeltemperaturen till 2°C över förindustriell nivå. I enlighet med detta har Europeiska Unionen (EU) satt upp målet att vara klimatneutralt 2050 (Europeiska kommissionen, 2018). Dagens koldioxidintensiva produktionssystem skapar en motsättning mellan fortsatt produktion och minskade växthusgasutsläpp. Kan en omställning till en mer utsläppsnål produktion, genom satsningar på grön teknologi och grönt realkapital, minska denna motsättning och göra det möjligt för EU att uppnå målet om klimatneutralitet vid seklets mitt?

### **1.1 Syfte och frågeställning**

Denna uppsats syftar till att undersöka förhållandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar. Uppsatsen avser analysera om dagens koldioxidintensiva produktionssystem är förenligt med en fortsatt ekonomisk tillväxt eller om produktionens växthusgasutsläpp istället leder till negativa effekter på ekonomins långsiktiga utveckling. Med EU som utgångspunkt ämnar uppsatsen även analysera vilka effekter en grön omställning av produktionen, genom satsningar på grön teknologi och grönt realkapital, skulle ha på klimatet

och den ekonomiska tillväxten. Dessutom undersöks om EU kan uppnå målet om klimatneutralitet 2050 genom en grön omställning av produktionen.

För att undersöka uppsatsens syfte besvaras följande frågeställningar:

- Hur kommer den ekonomiska tillväxten och nivån av växthusgaser i atmosfären att påverkas om produktionen är fortsatt koldioxidintensiv?
- På vilket sätt påverkas EU:s ekonomiska tillväxt av satsningar på grönt realkapital och grön forskning? Kan sådana satsningar leda till att EU når målet om klimatneutralitet 2050?

## **1.2 Metodologiskt upplägg**

För att förklara förhållandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar har vi skapat en tillväxtmodell. I modellen inkorporeras nivån av växthusgaser i atmosfären i syfte att kunna beskriva relationen mellan produktion och klimat. För att beskriva hur produktionen bidrar till växthusgasutsläpp har realkapital och teknologi delats upp i två sektorer: en grön sektor och en koldioxidintensiv sektor. I modellen är både ackumulerade växthusgaser och teknologi endogena variabler. Den ekonomiska tillväxten drivs i modellen av teknologisk utveckling inom både den koldioxidintensiva och den gröna forskningssektorn.

Med modellen som grund har vi genom simuleringar gjort framtidsprognoser i syfte att få en förståelse för utvecklingen av EU:s ekonomi och växthusgasutsläpp fram till 2100. Ett scenario där dagens koldioxidintensiva produktionssystem bibehålls jämförs med ett flertal scenarier där det istället sker en grön omställning av produktionen. I scenarierna sker omställningen genom att omallokera både realkapital och forskare från den koldioxidintensiva sektorn till den gröna sektorn. Simuleringarna ämnar undersöka om satsningar på grönt realkapital och grön teknologi kan leda till en minskning av produktionens växthusgasutsläpp utan att undvara ekonomisk tillväxt.

## **1.3 Disposition**

I uppsatsen presenteras till att börja med tidigare forskning inom området. Forskningen som lyfts fram är av betydelse för att förstå sambandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar. I kapitel tre presenteras sedan EU:s strategier för att minska produktionens växthusgasutsläpp. I samma kapitel redogörs också för förhållandet mellan produktion och

klimatförändringar. I kapitel fyra ges en introduktion till den tillväxtteori som ligger till grund för denna uppsats. I det efterföljande kapitlet presenteras den tillväxtmodell som vi har skapat för att beskriva det komplexa sambandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar. I kapitel sex beskrivs de simuleringar som gjorts för att skapa framtidsprognoser av utvecklingen för EU:s ekonomi och växthusgasutsläpp fram till 2100. I kapitel sju presenteras och analyseras resultaten av simuleringarna och reflektioner om modellen görs. I kapitel åtta görs avslutningsvis några sammanfattande slutsatser.

## **2. Tidigare forskning**

I detta kapitel presenteras forskning som är av stor betydelse för förståelsen av relationen mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar. Till att börja med ges en kort introduktion till William D. Nordhaus forskning, som ligger till grund för stor del av dagens forskning på området. Därefter presenteras forskning som har byggt vidare på hans arbete och som belyser element som är av relevans för den tillväxtmodell som vi har utvecklat.

William D. Nordhaus har i sin forskning sökt förstå och beskriva förhållandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar genom att inkludera klimatförändringar i tillväxtanalysen. År 1994 presenterade Nordhaus DICE-modellen (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy). Denna modell ligger till grund för en stor del av dagens forskning på området och har även varit ett viktigt verktyg för arbetet i FN:s klimatpanel (IPCC) (Hassler et al., 2018). DICE-modellen beskriver relationen mellan klimatet och ekonomin och kan användas som instrument för att utforma ekonomiska åtgärder som tar hänsyn till både ekonomisk tillväxt och klimatförändringar. Genom att väga kostnaderna för utsläppsminskningar idag mot negativa effekter på ekonomin i framtiden, beräknar modellen hur mycket konsumtion som är optimalt att avstå från idag för att kunna investera i att minska växthusgasutsläppen. I modellen antas att de ekonomiska effekterna av klimatförändringarna blir allt större i takt med att temperaturen ökar. Nordhaus betonar därför vikten av att minska utsläppsnivåerna idag för att säkerställa framtida generationers möjlighet till konsumtion. Takten av utsläppsminskning, konsumtion, och investering i realkapital är endogena variabler i modellen, medan teknologin är exogen (Nordhaus, 1994, s.5-9). Modellen som presenteras i denna uppsats har influerats av DICE-modellen på så sätt att den tar hänsyn till klimatförändringar i tillväxtanalysen genom att inkorporera mängden av växthusgaser i atmosfären. Till skillnad från Nordhaus modell beskrivs dock inte geofysiska effekter och samband i vår modell.

Andra forskare, som exempelvis Bosetti et al. (2006) och Acemoglu et al. (2012), har utvecklat Nordhaus modell genom att endogenisera den teknologiska utvecklingen. I likhet med vår modell inkluderar Bosetti et al. och Acemoglu et al. både klimatförändring och endogen teknologisk utveckling i sina tillväxtmodeller. Bosetti et al. har utvecklat WITCH-modellen (World Induced Technical Change Hybrid model). Denna modell analyserar, liksom DICE-modellen, optimala klimatåtgärder för att mildra och stabilisera utsläppen av växthusgaser. Genom att inkorporera endogen tillväxt i modellen, både genom investering i forskning och utveckling (FoU) och genom större erfarenhet av grön teknologi, beskriver modellen betydelsen av utveckling i miljövänlig teknologi för att minska utsläppen av växthusgaser (Bosetti et al. 2006). Denna uppdelning av teknologin återfinns även i vår modell. Till skillnad från WITCH-modellen utvecklas dock den gröna teknologin i vår modell endast genom satsning på FoU.

Med hjälp av spelteori belyser WITCH-modellen även vikten av samarbete mellan länder för att undvika free rider-problematiken, som innebär att vissa länder inte själva genomför klimatåtgärder utan istället drar nytta av andra länders åtgärder för att minska utsläppen av växthusgaser. Bosetti et al. menar att internationellt och regionalt samarbete kan lösa free rider-problemet och därför är samarbete mellan länder av stor vikt för främjandet av satsningar på miljövänlig teknologisk utveckling (Bosetti et al., 2006). Detta resonemang belyser vikten av EU som en internationell aktör i arbetet mot klimatförändringar. Medlemsländernas samarbete kring klimatåtgärder gör att free rider-problemet kan undvikas. Därmed kan arbetet mot klimatförändringar bli mer effektivt om klimatåtgärder genomförs gemensamt av EU än om medlemsländerna agerar enskilt.

Acemoglu et al. (2012) presenterar en modell med endogen teknologisk utveckling och klimatrestriktioner. I modellen produceras output med hjälp av gröna eller koldioxidintensiva insatsfaktorer. I vår modell delas insatsfaktorerna upp på samma sätt. Acemoglu et al. undersöker hur ekonomiskt och miljömässigt optimala åtgärder för utsläppsminskning kan utformas. Författarna menar att utan insatser för att ställa om till en grön produktion kommer klimatet att nå en kritisk nivå. Hur stora och permanenta insatser som behöver göras för att undvika en sådan klimatkatastrof beror enligt Acemoglu et al. på graden av substituerbarhet mellan de gröna och koldioxidintensiva insatsfaktorerna. Om insatsfaktorerna har en hög grad av substituerbarhet kommer åtgärder initialt att krävas för att ställa om till en grön produktion, men de behöver inte vara permanenta. Om inga åtgärder vidtas kommer dock produktionen och



den teknologiska utvecklingen till största del fortsätta att vara koldioxidintensiv. Detta beror bland annat på att de koldioxidintensiva insatsfaktorerna initialt har en högre produktivitet än de gröna insatsfaktorerna (Acemoglu et al., 2012). Även i den modell vi har utvecklat har graden av substituerbarhet mellan koldioxidintensivt och grönt realkapital betydelse. Substituerbarheten antas i denna uppsats vara relativt hög, men hur permanenta klimatåtgärderna behöver vara undersöks inte. I likhet med Acemoglu et al. belyser vår modell det koldioxidintensiva realkapitalets högre produktivitet, men skiljer sig på så sätt att produktivitetsovertaget antas vara konstant över tid och därför inte avtar när mängden grönt realkapital ökar i produktionen.

Enligt Acemoglu et al. kommer det att vara kostsamt att skjuta insatserna på framtiden, eftersom teknologigapet mellan grön och koldioxidintensiv teknologi då hinner växa sig större. Författarna framhåller även att den optimala utformningen av klimatåtgärder är en kombination av koldioxidskatt och främjande av FoU i grön teknologi (Acemoglu et al., 2012). Kostnaden av att vänta med att vidta klimatåtgärder, samt vikten av att satsa på grön teknologisk utveckling är på samma sätt som i Acemoglu et al. en viktig del i det resonemang som förs i denna uppsats.

### **3. Bakgrund**

För att få en förståelse för förhållandet mellan produktion och klimatförändringar kommer detta kapitel att ge en översikt av hur produktionen både bidrar till och påverkas negativt av växthusgasutsläpp. Dessutom ges en bakgrund till hur en grön omställning av produktionen kan genomföras. Slutligen presenteras hur EU påverkas av klimatförändringar och hur de arbetar för att minska växthusgasutsläpp.

#### **3.1 En grön omställning av produktionen**

En grön omställning av produktionen kan genomföras genom ökat användande av mer utsläppsnåla produktionsfaktorer och genom att anpassa produktionsfaktorerna till nya klimatförhållanden. Vilken typ av realkapital, infrastruktur och teknologi som används i produktionen är av stor betydelse för att den gröna omställningen ska vara möjlig.

##### *3.1.1 Realkapital och infrastruktur*

Vilken typ av realkapital och infrastruktur som används i produktionen har stor påverkan på dess utsläpp av växthusgaser. Samtidigt kan dessa produktionsfaktorer också påverkas negativt

av de klimatförändringar som växthusgasutsläppen orsakar. Därför har valet av dem stor betydelse för omställningen till en grönare och mer hållbar produktion.

För att skapa en klimatomfattande hållbar ekonomisk utveckling kommer stora förändringar av det totala realkapitalet och infrastrukturen att krävas. För att minska produktionens utsläpp behöver dessa produktionsfaktorer bli mer utsläppsnåla. De investeringar i realkapital och infrastruktur som görs idag har en betydande roll för den framtida ekonomiska utvecklingen. Eftersom realkapital och infrastruktur ofta har en lång livslängd, kommer dagens investeringar att vara i bruk under lång tid. Koldioxidintensiva investeringar som görs idag riskerar därför att låsa in utsläpp i realkapital och infrastruktur under en lång period. Detta belyser det faktum att det är kostsamt för klimatet att vänta med att ställa om till en mer grön realkapitalstock och grön infrastruktur (OECD, 2017, s.19,50,52, IPCC, 2014b, s.445, 454, 465, 927). En grön omställning kommer att kräva stora investeringar eftersom satsningar måste göras på nya typer av realkapital och infrastruktur (NCE, 2014, s.43).

Befintligt realkapital och infrastruktur kommer att påverkas av klimatförändringar på två sätt. Till att börja med riskerar förändringar i väderförhållanden och den ökade förekomsten av extremväder att öka deprecieringstakten för realkapital och infrastruktur. För att undvika en alltför stor förslitning kan realkapitalstocken och infrastrukturen göras mer motståndskraftig, så att de i högre grad klarar av de nya väderförhållandena (Fankhauser et al., 1999, OECD, 2017). Effekterna av klimatförändring behöver därför tas i beaktande vid utformningen av nytt realkapital och ny infrastruktur (NCE, 2016, s.22). Dessutom riskerar realkapital och infrastruktur som bidrar till stora utsläpp av växthusgaser att bli strandade tillgångar. Detta innebär att de fysiska tillgångarna på grund av miljölagar inte längre kan användas, trots att deras ekonomiska kapacitet inte är fullt förbrukad. Om så är fallet överstiger kostnaderna för en realkapital- eller infrastrukturinvestering i slutändan dess intäkter och är därmed inte ekonomiskt lönsam (OECD, 2017, s.111).

### *3.1.2 Teknologi*

Innovation och teknologisk utveckling är central för omställningen till en mer grön produktion eftersom det krävs nya teknologiska möjligheter för att kunna minska realkapitalets och infrastrukturens koldioxidintensitet (NCE, 2014, s.43). För att stimulera teknologisk utveckling och åstadkomma signifikanta framsteg inom den gröna teknologin behövs satsningar på FoU (OECD, 2017, s.96-98). Investering i grön forskning resulterar även i att den

gröna och hållbara teknologin blir mer tillgänglig för produktionen och mindre kostsam (NCE, 2016, s.17).

I utvecklingen av grön teknologi och omställningen till en mer utsläppsnål produktion kan den ekonomiska tillväxten gynnas av samarbete mellan länder. Om många länder samtidigt ställer om till användning av grön teknologi i produktionen, kommer detta leda till att den teknologiska utvecklingens produktivitet ökar. Detta då länder kan dra nytta av varandras idéer och innovationer. Om flera länder samtidigt producerar ny grön teknologi kommer kostnaden för den att minska snabbare och den kan därmed snabbare implementeras i produktionen (OECD, 2017, s.20).

### **3.2 EU:s klimatarbete**

Till följd av klimatförändringarna kommer medeltemperaturen i EU att stiga. Detta kommer framförallt resultera i förändrade nederbördsmonster och ökad förekomst av extremväder. Extremväder såsom värmeböljor, allvarliga torkor, skogsbränder, översvämningar, tyfoner och orkaner har redan observerats i EU under de senaste åren och om temperaturen fortsätter stiga väntas sådana väderfenomen bli allt vanligare. De nya väderförhållandena och den ökade förekomsten av extremväder kommer att ha negativa effekter på EU:s produktion och det kommer att krävas insatser för att minska utsläppen av växthusgaser om en hållbar utveckling i EU ska kunna säkerställas (Europeiska Kommissionen, 2018, EEA, 2019a).

För att minska riskerna med och effekterna av klimatförändring har EU som mål att vara klimatneutralt 2050, vilket innebär att nettoutsläppen ska vara noll (Europeiska kommissionen, 2018). Nettonollutsläpp betyder att produktionen släpper ut lika stor mängd växthusgaser som naturligt försvinner ur atmosfären. Den naturliga deprecieringen av växthusgaser sker eftersom delar av utsläppen binds i land och hav (IPCC, 2014c, s.45). Som grund till EU:s klimatneutralitetsmål ligger Parisavtalets mål om att begränsa den globala medeltemperaturökningen till 2°C över förindustriell nivå. För att temperaturbegränsningen ska vara möjlig måste klimatneutralitet uppnås innan 2100 (Parisavtalet, 2015). Ju senare växthusgasutsläppen börjar minska, desto längre tid tar det att uppnå klimatneutralitet och risken för att inte klara temperaturmålet ökar (OECD, 2017, s.47).

I syfte att uppnå klimatneutralitet vid mitten av seklet utan att åsidosätta ekonomisk tillväxt samarbetar EU:s medlemsländer kring klimatstrategier för att skapa en utsläppsnål ekonomi (EEA, 2019b). Målet ska förverkligas med hjälp av ökade investeringar i grönt

realkapital och satsningar på FoU inom grön teknologi. Idag är utsläppssnål teknologi ofta både dyr och otillgänglig på marknaden. För att minska kostnaderna för den, och på så sätt göra det ekonomiskt lönsamt att implementera grön teknologi i produktionen, behöver EU göra stora satsningar på grön forskning (Europeiska Kommissionen, 2018).

## **4. Ekonomisk tillväxt**

Ett lands ekonomiska tillväxt mäts som den årliga ökningen av dess bruttonationalprodukt (BNP). Följaktligen innebär ekonomisk tillväxt en ökning i total produktion och totala inkomster och är därför avgörande för den materiella levnadsstandarderna i ett land (Aghion & Howitt, 2009). BNP per capita kan ses som ett välfärdsmått eftersom det beskriver hur stor inkomst varje person i ett land har till sitt förfogande och kan använda till att exempelvis konsumera eller investera. Inkomst per capita är även högt korrelerat med många andra välfärdsått, som exempelvis förväntad livslängd, och kan därför användas som ett övergripande mått på levnadsstandard (Jones & Vollrath, 2013, s.3-6).

### **4.1 Teoretisk introduktion**

Robert Solow lade grunden till den moderna tillväxtteorin då han i artikeln "A Contribution to the Theory of Economic Growth" (1956) förklarade betydelsen av realkapitalackumulation och teknologisk utveckling för ekonomisk tillväxt. En stor del av forskningen inom långsiktig makroekonomisk analys bygger på Solows slutsats att den ekonomiska tillväxten drivs av teknologisk tillväxt. Teknologisk utveckling innebär upptäckandet av nya sätt att kombinera och använda insatsfaktorer i produktionen. Detta gör att fler eller bättre varor och tjänster kan produceras trots att mängden insatsfaktorer hålls konstant. I Solow-modellen är den teknologiska tillväxten exogen, vilket innebär att den inte kan påverkas av aktörer på marknaden (Jones & Vollrath, 2013, s.20-21, 80).

#### *4.1.1 Romer-modellen*

På 1980-talet introducerades den endogena tillväxtteorin, för vilken Paul Romers forskning har varit av stor betydelse. Romer utvecklade en modell som ligger till grund för den tillväxtmodell som vi har skapat. I detta avsnitt presenteras huvudelementen och de mest centrala slutsatserna i Romers modell i syfte att skapa en grundläggande förståelse för de idéer som ligger bakom vår modell.

Romers modell är en utveckling av Solow-modellen och i likhet med denna drivs den ekonomiska tillväxten av teknologisk utveckling. Romers modell skiljer sig dock från Solows på så vis att den teknologiska tillväxten är endogen. Genom investeringar i FoU driver vinstmaximerande aktörer på marknaden den teknologiska utvecklingen (Romer, 1990). Romers utvidgning av Solow-modellen skapade en ökad förståelse för de ekonomiska drivkrafterna bakom den teknologiska utvecklingen och den ekonomiska tillväxten i industrialiserade länder (Jones & Vollrath, 2013, s.97,99).

I Romers modell drivs den långsiktiga ekonomiska tillväxten av antalet individer som arbetar med FoU och den ekonomiska tillväxttakten kan höjas genom policyåtgärder som syftar till att öka antalet forskare i ekonomin (1990). Charles Jones (1995) utvidgade Romers modell efter att ha observerat att trots att antalet individer som arbetade med FoU ökade markant i industrialiserade länder under 1900-talets andra hälft, följde inte den ekonomiska tillväxten samma mönster. Tillväxttakten i BNP per capita i industrialiserade länder var i genomsnitt konstant eller till och med avtagande under perioden. Detta gav upphov till en modell i vilken den långsiktiga ekonomiska tillväxttakten drivs av befolkningstillväxten istället för av hur många personer som arbetar med FoU (Jones, 1995). Den modell som vi har utvecklat grundas på Romers modell, men tar hänsyn till Jones specifikation. En presentation av Jones version av Romer-modellen återfinns i Jones och Vollrath (2013, s.97-139). Hädanefter är det denna version av modellen som åsyftas när Romer-modellen omnämns.

I Romer-modellen används följande insatsfaktorer för att beskriva produktionen i en ekonomi: realkapital, teknologi, samt arbetskraft som arbetar med produktion av varor och tjänster. Produktionsfunktionen har konstant skalavkastning med avseende på realkapital och arbetskraft, men tilltagande skalavkastning när hänsyn tas till teknologi. Således leder en ökning av samtliga produktionsfaktorer till en ännu större ökning i produktionen. Denna tilltagande skalavkastning grundas i att teknologi är en icke-rivaliserande vara, det vill säga att en individs användande av en teknologi inte utesluter att andra individer använder samma teknologi (Jones & Vollrath, 2013, s.82, 99-100). I Romer (1990) är även humankapital en insatsfaktor i produktionsfunktionen, men i Jones (1995) utvidgning av modellen utelämnas humankapitalet. Realkapitalet ackumuleras genom att den del av output som inte konsumeras istället investeras i nytt realkapital. Realkapitalstocken förslits även i en given konstant takt. Arbetskraften, som i modellen motsvaras av befolkningen, växer i en konstant exogen takt och

allokeras mellan produktion av varor och tjänster och forskningssektorn. I modellen antas denna allokering vara konstant (Jones & Vollrath, 2013, s.100, 102).

Utvecklingen i teknologin beror på forskningssektorns produktivitet, tillgången till tidigare forskning och hur många som arbetar i forskningssektorn. Den slutliga ackumuleringen av teknologin bygger även på hur stor användning forskningssektorn har av tidigare forskning och hur stor avkastning ytterligare en person som allokeras till forskningssektorn ger. Vad gäller tidigare forskning finns både en positiv och en negativ effekt. Den positiva effekten belyser det faktum att tidigare forskning lägger grunden till framtida forskning. Den negativa effekten lyfter istället det faktum att de enklaste innovationerna görs först. Ju mer tidigare forskning som finns, desto svårare blir det att göra nya innovationer. Om effekten av tidigare forskning på den teknologiska utvecklingen i slutändan är positiv eller negativ beror på vilken av effekterna som är störst. Vad gäller ytterligare individer i forskningssektorn gynnar det den teknologiska utvecklingen att allokera fler personer till forskning, men det finns en liten negativ effekt av att allokera ett stort antal individer till denna sektor. Detta följer av att risken för att flera personer gör samma innovation ökar när antalet forskare blir större (Jones & Vollrath, 2013, s.100-102).

I Romer-modellen kommer BNP per capita på lång sikt att nå ett jämviktsläge där den växer i konstant takt och i samma takt som både realkapital per capita och teknologi. I modellen är det den teknologiska utvecklingen som driver den ekonomiska tillväxten. Teknologins tillväxttakt beror på lång sikt på tillväxttakten i antal individer i forskningssektorn, den extra avkastning som ytterligare en person i forskningssektorn ger, samt hur stor användning forskningssektorn har av tidigare forskning. Tillväxten av personer som arbetar med FoU är densamma som befolkningstillväxten, eftersom en befolkningsökning även leder till att antal individer i forskningssektorn ökar (Jones & Vollrath, 2013, s.103-107).

Då de faktorer som påverkar den långsiktiga ekonomiska tillväxten är exogena i modellen, kommer politiska åtgärder som syftar till att öka den teknologiska tillväxttakten, och därmed den ekonomiska tillväxttakten, inte ha någon effekt i det långa loppet. Däremot kan politiska åtgärder, som exempelvis att öka antalet forskare, resultera i en högre teknologisk och ekonomisk tillväxttakt på kort sikt då ekonomin är i en övergångsfas på väg mot jämvikt. En tillfälligt högre tillväxttakt leder dock till en permanent högre nivå av BNP per capita. Den långsiktiga ekonomiska tillväxten är därmed inte lika enkel att påverka i Jones version av modellen som i Romers ursprungsmodell (Jones & Vollrath, 2013, s.103-107).

På lång sikt när ekonomin har nått ett jämviktsläge bestäms nivån av BNP per capita av realkapitalet, hur många som arbetar i produktion av varor och tjänster, samt den teknologiska utvecklingen. En hög grad av investering i realkapital har en positiv effekt på BNP per capita-nivån. Hur stor andel av arbetskraften som arbetar inom forskningssektorn påverkar BNP per capita-nivån på två sätt. Om ett stort antal individer arbetar med FoU leder detta till att den teknologiska utvecklingen ökar, vilket har en positiv effekt på nivån av BNP per capita. Samtidigt innebär det också att andelen individer som arbetar med produktion av varor och tjänster minskar, vilket har en negativ effekt på BNP per capita-nivån (Jones & Vollrath, 2013, s.110-111).

## **5. Tillväxtmodellen**

För att undersöka förhållandet mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar har vi skapat en tillväxtmodell som baseras på Romer-modellen. I detta kapitel presenteras hur modellen beskriver detta förhållande genom att inkorporera ackumulerade växthusgasutsläpp, samt dela upp realkapitalet och teknologin i en koldioxidintensiv och en grön sektor. Med hjälp av modellens produktionsfunktion och antaganden förklaras hur utveckling i både koldioxidintensiv och grön teknologi driver den långsiktiga ekonomiska utvecklingen, samt vilka mekanismer som på lång sikt påverkar nivån av BNP per capita.

### **5.1. Introduktion till modellen**

Modellen syftar till att beskriva förhållandet mellan produktion och klimatförändringar. Följaktligen tar den hänsyn både till produktionens påverkan på klimatet och de effekter som klimatet har på produktionen. Utvidgningen av Romer-modellen görs genom att inkorporera en variabel för ackumulerade växthusgaser i atmosfären, samt genom att dela upp realkapital och teknologi i en koldioxidintensiv sektor och en grön sektor. För att modellera relationen mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändring har ett flertal variabler endogeniserats. Liksom i den ursprungliga Romer-modellen är den teknologiska utvecklingen endogen och realkapitalets förändring beskrivs i modellen. Därtill har variabeln för ackumulerade växthusgaser i atmosfären gjorts endogen. Vår modell tar även hänsyn till den extra förslitning av realkapitalet, samt den ökade förekomsten av strandade tillgångar, som klimatförändringar leder till.

Klimatförändringar, som sker till följd av högre nivåer av växthusgaser i atmosfären, påverkar produktionen negativt. För att minska klimatförändringarnas påverkan på produktionen krävs två typer av åtgärder. Det handlar dels om att anpassa produktionen till nya förhållanden, dels om att minska utsläppen av växthusgaser så att klimatförändringarna inte blir lika stora. För att skildra dessa insatser i relation till produktionen delas realkapitalet i vår modell upp i två delar: koldioxidintensivt realkapital och grönt realkapital. Detta skiljer sig från Romer-modellen där det endast finns en typ av realkapital. De två typerna av realkapital i vår modell skiljer sig både vad gäller anpassningsgrad till klimatförändringarnas effekter och i hur mycket växthusgaser de släpper ut. Det koldioxidintensiva realkapitalet bidrar i hög grad till utsläpp, samtidigt som det har en låg anpassningsgrad till klimatförändringar och därmed kommer att förslitas snabbare när utsläppen ökar. Denna högre deprecieringstakt är en följd av temperaturförändringar och ökad förekomst av extremväder. Allt eftersom nivån av växthusgaser i atmosfären blir högre, ökar även risken för strandade tillgångar när koldioxidintensivt realkapital inte längre kan användas på grund av striktare miljölagar. Till skillnad från det koldioxidintensiva realkapitalet släpper det gröna inte ut några växthusgaser och är i hög grad anpassat till klimatförändringar.

Stora klimatförändringar riskerar att leda till höga anpassningskostnader och därför kan det finnas incitament utifrån ett ekonomiskt perspektiv att minska utsläppen. För att underlätta omställningen till en mer utsläppsnål produktion har teknologi och innovation betydelse. Grön teknologi och gröna innovationer kan möjliggöra en mindre koldioxidintensiv produktion. I Romer-modellen finns endast en typ av teknologi och två sektorer för arbetskraft: en forskningssektor och en sektor för produktion av varor och tjänster. För att kunna beskriva utvecklingen av grön teknologi är teknologin i vår modell istället uppdelad i två delar: koldioxidintensiv teknologi och grön teknologi. Därför är även forskningssektorn uppdelad i två delar. Följaktligen allokeras arbetskraften mellan tre sektorer: sektorn för produktion av varor och tjänster, den gröna forskningssektorn och den koldioxidintensiva forskningssektorn. Uppdelningen av teknologin tillåter även vår modell att ta hänsyn till att utvecklingen av koldioxidintensiv teknologi påverkas negativt av stora utsläppsmängder. När de strandade tillgångarna i det koldioxidintensiva realkapitalet ökar blir den koldioxidintensiva forskningssektorn mindre produktiv, eftersom viss typ av teknologi inte längre kan användas.

Precis som i Jones (1995) har humankapital utelämnats från vår modell. Syftet med modellen är att beskriva samspelet mellan klimat och produktion. Realkapitalets och teknologins bidrag



till växthusgasutsläpp, samt klimatförändringarnas påverkan på dem, är påtaglig. Eftersom förhållandet mellan klimatförändringar och humankapital inte är lika tydligt och inte påverkar de mekanismer mellan produktion och klimat som vår modell ämnar beskriva, har denna variabel inte inkluderats.

Om utsläppen av växthusgaser från produktionen på lång sikt fortsätter öka, kommer klimatförändringarna leda till så stora negativa konsekvenser för koldioxidintensivt realkapital och koldioxidintensiv teknologi att fortsatt produktion inte är möjlig. Det enda ekonomiskt långsiktigt hållbara utfallet är därför en situation där växthusgaserna i atmosfären stabiliseras. Med anledning av detta är det denna situation som undersöks i vår modell.

## 5.2 Notation

Följande notationer används genomgående i beskrivningen av modellen:

1. Versaler används för att beteckna variabelernas totala värden och gemener används för att beteckna deras per capita-värden.

2.  $\dot{X}$  används för att beskriva förändringen över tid hos en variabel  $X$ .

$$\dot{X} = \frac{\delta X(t)}{\delta t}$$

3.  $g_X$  beskriver tillväxttakten i en variabel  $X$ .

$$g_X = \frac{\dot{X}}{X}$$

## 5.3 Modellens produktionsfunktion och antaganden

I detta avsnitt beskrivs modellens produktionsfunktion och antaganden. Appendix I innehåller en förteckning över definitioner av modellens variabler och parametrar. Härledningarna och förklaringar till antaganden och ekvationer finns i Appendix II.

### 5.3.1 Produktionsfunktion

Modellens produktionsfunktion definieras som:

$$Y = K^\alpha (A_C^\nu A_G L_Y)^{1-\alpha} \quad (1)$$

Produktionen ( $Y$ ) bestäms av realkapitalet ( $K$ ), koldioxidintensiv teknologi ( $A_C$ ), grön teknologi ( $A_G$ ) och den del av arbetskraften som arbetar inom produktion av varor och tjänster

( $L_Y$ ). Likasom i Romer-modellen beskriver parametern  $\alpha$  vikten av realkapitalet i produktionen. Modellen antar att  $0 < \alpha < 1$ , vilket indikerar att realkapitalet har en avtagande marginalavkastning i produktionen. Realkapitalet ( $K$ ) och arbetskraften i produktion av varor och tjänster ( $L_Y$ ) uppvisar tillsammans konstant skalavkastning i vår modell.

Till skillnad från Romer-modellen delas teknologin i vår modell upp i en koldioxidintensiv sektor ( $A_C$ ) och en grön sektor ( $A_G$ ). I produktionsfunktionen (1) antar vår modell att  $0 < \gamma < 1$ , vilket indikerar att den koldioxidintensiva teknologin har en avtagande marginalavkastning i produktionen. Detta är ett resultat av strandade tillgångar i det koldioxidintensiva realkapitalet. Eftersom miljölagar förhindrar användning av vissa typer av koldioxidintensivt realkapital, blir även en viss del av den koldioxidintensiva teknologin obrukbar. Följaktligen kommer den koldioxidintensiva teknologin att ha en mindre positiv effekt på produktionen än vad den gröna teknologin har. Ju högre nivå den koldioxidintensiva teknologin har, desto mer troligt är det att en del av den inte kommer att kunna användas på grund av strandade tillgångar. Således ger den koldioxidintensiva teknologin mindre avkastning ju högre dess nivå är.

### 5.3.2 Realkapital

Uppdelningen av realkapitalet skiljer sig från den ursprungliga Romer-modellen, där det endast finns en typ av realkapital. Realkapitalet ( $K$ ) definieras i vår modell enligt uttryck (2) och delas upp i koldioxidintensivt realkapital ( $K_C$ ) och grönt realkapital ( $K_G$ ).

$$K = [(1 + \beta)K_C^\varepsilon + K_G^\varepsilon]^\frac{1}{\varepsilon} \quad (2)$$

Parametern  $\varepsilon$  beskriver graden av substituerbarhet mellan koldioxidintensivt och grönt realkapital. Till skillnad från en Cobb-Douglas produktionsfunktion, där alla produktionsfaktorer måste användas, tillåter produktionsfunktionen i vår modell användandet av endast en typ av realkapital. Följaktligen tillåter modellen en framtid där endast grönt realkapital används.  $\beta$  betecknar den extra produktivitet som det koldioxidintensiva realkapitalet har i förhållande till det gröna realkapitalet. Den högre produktiviteten förklarar varför företag väljer att investera i koldioxidintensivt realkapital trots att detta deprecierar snabbare än grönt realkapital när nivån av växthusgaser i atmosfären ökar. Denna högre förslitning beskrivs av uttrycket för förändring i det koldioxidintensiva realkapitalet och gör att realkapitalackumuleringen i denna sektor skiljer sig från Romer-modellen. Uppsatsens modell

antar att det koldioxidintensiva realkapitalet förändras enligt (3) och att det gröna realkapitalet förändras på samma sätt som realkapitalet i Romer-modellen (4).<sup>1</sup>

$$\dot{K}_C = S_{K_C}Y - \delta_K K_C - (\mu + \psi)E^\Omega K_C \quad (3)$$

$$\dot{K}_G = S_{K_G}Y - \delta_K K_G \quad (4)$$

Den negativa parametern  $\delta_K$  i (3) och (4) betecknar deprecieringstakten i realkapital. Vår modell antar att denna förslitning är lika stor i det koldioxidintensiva som i det gröna realkapitalet. För att kunna beskriva klimatförändringarnas negativa effekt på produktionen, i detta fall på det koldioxidintensiva realkapitalet, inkluderas till skillnad från i Romer-modellen en variabel för ackumulerade växthusgaser i atmosfären ( $E$ ). I vår modell antas att klimatförändringarnas negativa påverkan på det koldioxidintensiva realkapitalet blir större i takt med att nivån av växthusgaser i atmosfären ökar, eftersom klimatförändringarnas konsekvenser kommer att bli allt mer omfattande ju högre medeltemperaturen är. Detta visas av att  $\Omega > 1$ , vilket indikerar en tilltagande marginaleffekt. Parametrarna  $\mu$  och  $\psi$  beskriver på vilket sätt det koldioxidintensiva realkapitalet påverkas negativt av växthusgaser. Den extra förslitning som sker till följd av temperaturförändringar och mer extremväder beskrivs av  $\mu$ , medan  $\psi$  beskriver den negativa effekten av strandade tillgångar som gör att en del av det koldioxidintensiva realkapitalet inte längre kan användas.

Eftersom vår modell har två typer av realkapital fördelas investeringar mellan sektorerna.  $S_{K_C}$  och  $S_{K_G}$  beskriver den del av sparkvoten som investeras i koldioxidintensivt respektive grönt realkapital. De två typerna av investeringar utgör tillsammans den konstanta totala sparkvoten ( $\bar{S}$ ).

$$\bar{S} = S_{K_C} + S_{K_G} \quad (5)$$

### 5.3.3 Arbetskraft

Modellens uppdelning av teknologin medför även en skillnad från Romer-modellen vad gäller arbetskraftens fördelning. I den modell som presenteras här fördelas arbetskraften ( $L$ ) mellan

<sup>1</sup> Infrastruktur skulle kunna beskrivas på samma sätt som realkapital i modellen. Om denna variabel hade inkluderats i modellen hade den därför påverkat utfallet på samma sätt som realkapital och inte tillfört några nya slutsatser. I syfte att göra modellen enklare att förstå och hantera har infrastruktur därför inte inkluderats i modellen.

produktionssektorn ( $L_Y$ ), den koldioxidintensiva forskningssektorn ( $L_C$ ) och den gröna forskningssektorn ( $L_G$ ).

$$L = L_Y + L_C + L_G \quad (6)$$

Likt Romer-modellen förändras den totala mängden arbetskraft enligt (7) och motsvarar befolkningstillväxten.

$$\frac{\dot{L}}{L} = n \quad (7)$$

#### 5.3.4 Teknologisk utveckling

I vår modell förändras den teknologiska nivån på olika sätt i de olika sektorerna. Utvecklingen i den koldioxidintensiva teknologin liknar den i Romer-modellen men beror i vår modell även på nivån av ackumulerade växthusgaser i atmosfären ( $E$ ) och beskrivs av (8). Utvecklingen i den gröna teknologin följer den teknologiska utvecklingen i Romer-modellen och beskrivs av (9).

$$\dot{A}_C = \theta A_C^\phi L_C^\lambda E^{-\tau} \quad (8)$$

$$\dot{A}_G = \theta A_G^\phi L_G^\lambda \quad (9)$$

Parametern  $\theta$  beskriver produktiviteten i forskningssektorerna,  $\phi$  beskriver hur stor användning den teknologiska utvecklingen har av tidigare forskning och  $\lambda$  beskriver den extra avkastning som den teknologiska utvecklingen får av ytterligare en person som arbetar i respektive forskningssektor. Modellen antar att  $\theta > 0$ ,  $0 < \phi < 1$  och  $0 < \lambda < 1$ . Att  $\phi$  och  $\lambda$  antar ett värde mellan noll och ett innebär att det finns en positiv men avtagande effekt både av tidigare teknologi och av att ytterligare en person arbetar med forskning. Alla tre parametrar återfinns i både (8) och (9), vilket indikerar att dessa effekter är lika stora i de båda forskningssektorerna.

Ökningen av ackumulerade växthusgaser i atmosfären ( $E$ ) har en tilltagande negativ effekt på den teknologiska utvecklingen inom den koldioxidintensiva sektorn. De strandade tillgångarna i koldioxidintensivt realkapital har en tilltagande ökning till följd av att klimatförändringarnas negativa konsekvenser blir allt mer allvarliga ju högre medeltemperaturen är. Följaktligen kommer även en allt större del av den koldioxidintensiva teknologin att bli obrukbar när ackumulerade växthusgaser ökar. Denna tilltagande negativa effekt illustreras i modellen av att  $\tau > 1$ .

### 5.3.5 Utvecklingen av ackumulerade växthusgaser

I vår modell är variabeln för ackumulerade växthusgaser endogen. Detta gör det möjligt att beskriva hur produktionen påverkar klimatförändringarna. I modellen beskrivs förändringen i ackumulerade växthusgaser enligt (11).

$$\dot{E} = \sigma \frac{K_C}{A_G} - \delta_E E \quad (10)$$

Parametern  $\sigma$  beskriver hur mycket växthusgasutsläpp som sker till följd av produktionen. Kvoten  $\frac{K_C}{A_G}$  visar att en ökad mängd koldioxidintensivt realkapital bidrar till en ökning av växthusgaser i atmosfären, medan en ökning av den gröna teknologiska nivån istället bidrar till minskade utsläpp. Det sistnämnda följer av att i takt med den gröna teknologins utveckling kommer grönt realkapital i större utsträckning kunna implementeras i produktionen.  $\delta_E$  visar den naturliga deprecieringen av de ackumulerade växthusgaserna, det vill säga den mängd växthusgaser som genom det naturliga kretsloppet försvinner ur atmosfären.

## 5.4 Modellen i jämvikt

Nedan följer en presentation av vad som driver tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt, hur en miljömässigt hållbar ekonomi skapas i jämvikt samt vad som bestämmer BNP per capita-nivån i jämvikt.

Definitionen av en jämvikt är att alla exogena och endogena variabler i modellen växer i konstant takt. En ekonomi rör sig normalt mot jämviktsläget och när en jämviktssituation nås kommer ekonomin att stanna där. Däremot kan chocker i ekonomin, till följd av förändringar i någon av de exogena variablerna eller parametrarna i modellen, leda till att ekonomin tillfälligt flyttas från sitt jämviktsläge eller att ett nytt jämviktsläge skapas. Tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt beskriver drivkrafterna bakom ekonomins långsiktiga utveckling. Att öka tillväxttakten på lång sikt genom interventioner är ofta svårt, men däremot kan en temporär ökning ske i en övergångsfas där ekonomin rör sig mot sitt jämviktsläge. Detta kan leda till en nivåeffekt, det vill säga att BNP per capita-nivån höjs permanent (Jones & Vollrath, 2013, s.28-31, 34, 38, 43).

För en förteckning av definitioner av modellens variabler och parametrar se Appendix I. För härledning av ekvationerna se Appendix II.

#### 5.4.1 Tillväxttakt i BNP per capita i jämvikt

Tillväxttakten i BNP per capita beskriver ekonomins utveckling över tid. För att på lång sikt kunna förstå den ekonomiska tillväxten beräknas ett uttryck för tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt. I vår modell drivs den ekonomiska tillväxten på lång sikt av utvecklingen i både koldioxidintensiv och grön teknologi. Tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt beskrivs enligt (11):

$$g_y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} \quad (11)$$

Uttrycket visar att tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt, liksom i Romer-modellen, drivs av den teknologiska utvecklingen. Uppdelningen av teknologin i vår modell gör det möjligt att specificera till vilken grad den ekonomiska tillväxten drivs av utvecklingen i den koldioxidintensiva respektive den gröna teknologin. Den koldioxidintensiva teknologins tillväxttakt har en mindre effekt på tillväxttakten i BNP per capita än vad den gröna teknologin har, vilket visas av  $\gamma$  som antar ett värde mellan noll och ett. Eftersom den koldioxidintensiva teknologin till följd av strandade tillgångar i koldioxidintensivt realkapital har en mindre påverkan på produktionen än den gröna teknologin, kommer den även ha en mindre påverkan på den ekonomiska tillväxten. I jämvikt växer den koldioxidintensiva teknologin enligt (12) och den gröna teknologin enligt (13).

$$g_{A_C} = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} \quad (12)$$

$$g_{A_G} = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} \quad (13)$$

Av (11), (12) och (13) följer att den slutliga tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt är:

$$g_y = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} (1 + \gamma) \quad (14)$$

Uttryck (14) specificerar drivkrafterna bakom den ekonomiska tillväxten i jämvikt. Uttrycket visar att tillväxttakten i BNP per capita liksom i Romer-modellen bestäms av den extra avkastning ytterligare en person inom någon av forskningssektorerna ger, hur stor användning dagens forskare har av tidigare forskning och hur hög befolkningstillväxten är. Till skillnad från Romer-modellen visar vår modell hur den ekonomiska tillväxten i jämvikt drivs både av tillväxttakten i den gröna och den koldioxidintensiva teknologin, samt att strandade tillgångar

minskar den koldioxidintensiva teknologins positiva effekt på tillväxttakten i BNP per capita i jämvikt.

#### 5.4.2 En miljömässigt hållbar ekonomi

För att nå en jämvikt som både är ekonomiskt och miljömässigt hållbar måste mängden ackumulerade växthusgaser i atmosfären på lång sikt vara oförändrad eller till och med minska. Om de ackumulerade växthusgaserna fortsätter att öka på lång sikt kommer det till slut att resultera i en ekonomiskt ohållbar situation där klimatförändringarnas negativa effekter på produktionen blir alldeles för stora. Detta följer av att de ackumulerade växthusgaserna har en tilltagande negativ effekt på det koldioxidintensiva realkapitalet och på den koldioxidintensiva teknologin. En sådan situation är varken ekonomiskt eller miljömässigt hållbar. Modellens jämviktssläge representerar därför istället en situation där produktionens växthusgasutsläpp motsvarar den mängd växthusgaser som försvinner ur atmosfären. Detta innebär att ekonomin i jämvikt har nettonollutsläpp och att tillväxttakten i ackumulerade växthusgaser är noll:

$$g_E = 0 \quad (15)$$

Av (10) och (15) följer att det koldioxidintensiva realkapitalet i jämvikt växer i samma takt som den gröna teknologin ( $g_{K_C} = g_{A_G}$ ). Utifrån (4) kan det konstateras att för att tillväxttakten i det gröna realkapitalet ska vara konstant i jämvikt måste det växa i samma takt som BNP ( $g_{K_G} = g_Y$ ). Ett uttryck för tillväxttakten i BNP i jämvikt kan tas fram genom att addera befolkningstillväxten ( $n$ ) till uttrycket för BNP per capita i jämvikt (11) ( $g_Y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n$ ). En närmare förklaring till detta resonemang finns i Appendix II.

Eftersom  $g_{A_G} < g_Y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n$  i jämvikt följer att:

$$g_{A_G} = g_{K_C} < g_{K_G} = g_Y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n \quad (16)$$

För att det koldioxidintensiva realkapitalet ska ha en konstant tillväxttakt i jämvikt och växa i lägre takt än både BNP och det gröna realkapitalet (i enlighet med (16)), måste den del av sparkvoten som investeras i koldioxidintensivt realkapital ( $S_{K_C}$ ) minska i en konstant jämviktstakt enligt (17). Detta kan härledas från uttryck (3) och är ett resultat av att i jämvikt gäller:  $g_{K_C} = g_{A_G}$ , (11), (12), (13) och (15). För en närmare förklaring till (17) se Appendix II.

$$g_{S_{K_C}} = -\gamma g_{A_G} - n \quad (17)$$

Investeringarna i det koldioxidintensiva realkapitalet måste minska i denna takt för att ekonomin ska röra sig mot jämvikt. Det faktum att  $S_{K_C}$  har en negativ tillväxttakt innebär att den på lång sikt går mot noll. I jämvikt är därför investeringarna i det koldioxidintensiva realkapitalet mycket små och investeringarna i grönt realkapital utgör därför i princip hela den totala sparkvoten. Mängden koldioxidintensivt realkapital kommer med tiden att bli mycket liten i relation till mängden grönt realkapital. Detta följer av de minskade investeringarna, samt den extra förslitning av det koldioxidintensiva realkapitalet och den negativa effekten av strandade tillgångar som finns till följd av klimatförändringar. Det faktum att den koldioxidintensiva realkapitalstocken på lång sikt är mycket liten möjliggör en stabilisering av de ackumulerade växthusgaserna.

#### 5.4.3 BNP per capita i jämvikt

För att få en slutgiltig bild av vad som bestämmer ekonomins storlek på lång sikt undersöks BNP per capita-nivån i jämvikt. Från produktionsfunktionen (1) kan utläsas att BNP-nivån bestäms av realkapitalet, antalet människor som arbetar i produktion av varor och tjänster, den koldioxidintensiva teknologin och den gröna teknologin. Att ta fram ett jämviktsuttryck för BNP per capita visar mer specifikt vilka drivkrafter som på lång sikt bestämmer dess nivå. BNP per capita i jämvikt beskrivs av (18):

$$y^* = \left( \frac{S_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left( \frac{L_Y}{L} \right) A_C^\gamma A_G \quad (18)$$

Uttryck (18) specificeras genom att definiera  $A_C$  och  $A_G$ :

$$A_C = \left( \frac{\theta L_G^\lambda E^{-\tau}}{g_{A_C}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (19)$$

$$A_G = \left( \frac{\theta L_G^\lambda}{g_{A_G}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (20)$$

Det slutliga uttrycket för BNP per capita i jämvikt blir därmed:

$$y^* = \left( \frac{S_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{L_Y}{L} \left( \frac{\theta E^{-\tau}}{g_{A_C}} \right)^{\frac{\gamma}{1-\phi}} \left( \frac{\theta}{g_{A_G}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} (L_C^\gamma L_G)^{\frac{\lambda}{1-\phi}} \quad (21)$$

Uttrycket för BNP per capita-nivån i jämvikt visar till skillnad från produktionsfunktionen vad som driver utvecklingen i de insatsfaktorer som bestämmer produktionens storlek. Den positiva



effekt som realkapitalet har på BNP-nivån utgörs av investeringar i grönt realkapital. Ju större del av sparkvoten som investeras i grönt realkapital, desto högre blir nivån av BNP per capita i jämvikt. De negativa effekterna på realkapitalet och därmed även på BNP per capita utgörs av förslitningen på realkapitalet, befolkningstillväxten, samt utvecklingen i både koldioxidintensiv och grön teknologi. Den teknologiska utvecklingens negativa effekt beror på att nya innovationer gör att den teknologi som använts tidigare i produktionen snabbare blir omodern och måste bytas ut.

Andelen av arbetskraften som arbetar inom produktion av varor och tjänster är av betydelse för nivån av BNP per capita i jämvikt. Ju fler som arbetar inom produktionen, desto högre kommer BNP per capita-nivån att vara. Samtidigt har även den del av arbetskraften som arbetar inom någon av forskningssektorerna en positiv effekt på BNP per capita i jämvikt. Uttryck (21) visar även att ekonomin påverkas positivt av produktiviteten i forskningssektorerna, hur stor användning dagens forskare har av tidigare forskning, samt den extra avkastning som ytterligare en forskare i någon av forskningssektorerna ger. Dessutom har nivån av växthusgaser i atmosfären en negativ påverkan på BNP per capita i jämvikt, eftersom detta påverkar den koldioxidintensiva teknologin negativt.  $\gamma$  visar att den koldioxidintensiva teknologins positiva effekt på BNP per capita i jämvikt minskas något till följd av strandade tillgångar. Följaktligen har den gröna teknologin en större positiv effekt på BNP per capita i jämvikt än den koldioxidintensiva teknologin.

## **6. Simuleringar**

För att skapa framtidsprognoser av utvecklingen av EU:s ekonomi och växthusgasutsläpp fram till 2100 har simuleringar gjorts med vår modell som grund. Genom att först skatta utgångsvärden för variablerna och sedan använda modellens produktionsfunktion och antaganden har prognoser för utvecklingen av EU:s ekonomi och de ackumulerade växthusgaserna i atmosfären skapats. Simuleringarna används för att analysera relationen mellan produktion och klimat, effekterna av möjliga klimatåtgärder, samt för att undersöka om EU kan nå målet om klimatneutralitet 2050. I detta kapitel presenteras till att börja med de olika framtidsprognoserna, sedan förklaras hur variabler och parametrar har skattats i simuleringarna.

## 6.1 Framtidsprognoser

I detta avsnitt beskrivs till att börja med vilka klimatåtgärder som undersöks och på vilket sätt de kan tänkas påverka ekonomin och klimatet. Sedan presenteras de olika scenarierna som simuleras och hur de förhåller sig till klimatåtgärderna.

### 6.1.1 Klimatåtgärder

I simuleringarna undersöks två olika typer av möjliga klimatåtgärder. Med hjälp av framtidsprognoser analyseras om dessa åtgärder kan minska produktionens växthusgasutsläpp och samtidigt bibehålla en ekonomisk tillväxt. Den ena typen av åtgärd gäller allokeringen av investeringar mellan koldioxidintensivt och grönt realkapital. I denna åtgärd hålls den totala sparkvoten konstant, men den andel av sparkvoten som investeras i koldioxidintensivt realkapital ( $S_{K_C}$ ) respektive grönt realkapital ( $S_{K_G}$ ) varierar. Om investeringarna i koldioxidintensivt realkapital minskar samtidigt som investeringarna i grönt realkapital ökar, kommer den totala realkapitalstocken i allt högre grad att utgöras av grönt realkapital. Eftersom det koldioxidintensiva realkapitalet bidrar till växthusgasutsläpp borde en sådan sparkvotsåtgärd minska produktionens utsläpp av växthusgaser. Däremot kan åtgärden tänkas påverka BNP per capita negativt eftersom det koldioxidintensiva realkapitalet har en högre produktivitet än det gröna. Å andra sidan blir det koldioxidintensiva realkapitalet obrukbart snabbare än det gröna vid höga nivåer av växthusgaser i atmosfären. Om en grön omställning av realkapitalstocken inte sker, och nivån av ackumulerade växthusgaser som ett resultat av detta blir hög, riskerar därför realkapitalstocken att förslitas mycket snabbt vilket påverkar produktionen negativt. I framtidsprognoserna analyseras vikten av vid vilken tidpunkt sparkvotsåtgärden vidtas. Att vänta med att sätta in åtgärden kan vara kostsamt eftersom det resulterar i en högre nivå av växthusgaser i atmosfären och därmed större negativa effekter på produktionen.

Den andra åtgärden innebär en omallokering av forskare från den koldioxidintensiva forskningssektorn ( $L_C$ ) till den gröna forskningssektorn ( $L_G$ ). Den totala andelen forskare i befolkningen hålls konstant, men fördelningen av forskare mellan sektorerna varierar. Denna åtgärd leder till en ökad grön teknologisk utveckling på kort sikt. Detta kan bidra till en minskning i de ackumulerade växthusgaserna eftersom den gröna teknologiska utvecklingen underlättar implementeringen av grönt realkapital. Eftersom den gröna teknologin har en större vikt i produktionen än den koldioxidintensiva teknologin, borde åtgärden även ha en positiv effekt på utvecklingen i BNP per capita. Dessutom riskerar den koldioxidintensiva

teknologiska utvecklingen att stanna upp när nivån av ackumulerade växthusgaser blir större, eftersom detta leder till ökade strandade tillgångar i koldioxidintensivt realkapital. Fortsätta satsningar på koldioxidintensiv forskning riskerar därför att inte ge lika stor avkastning som satsningar på grön forskning. I framtidsprognoserna undersöks betydelsen av omallokeringens omfattning.

I simuleringarna undersöks även hur åtgärderna kan kombineras och vilka effekter detta får för den ekonomiska och miljömässiga utvecklingen. Eftersom det är det koldioxidintensiva realkapitalet som bidrar till utsläpp av växthusgaser, kan det tänkas att sparkvotsåtgärden är den av åtgärderna som resulterar i störst skillnad för utvecklingen av ackumulerade växthusgasutsläpp. Satsningar på grön teknologi borde istället ge störst resultat för den ekonomiska utvecklingen. Detta följer av att grön teknologi har en större vikt i produktionen än koldioxidintensiv teknologi. Att kombinera åtgärderna borde därför kunna ge positiva resultat för både klimatet och ekonomin.

### *6.1.2 Scenarier*

För de två åtgärderna har vi skapat åtta framtidsscenarier som visar hur den ekonomiska och miljömässiga utvecklingen påverkas av klimatåtgärderna beroende på deras omfattning, tidpunkt för genomförande och om de kombineras.<sup>2</sup> Scenarierna jämförs dessutom med ett baselinescenario där allokeringen av både sparkvoten och forskarna hålls konstant. I tabell 1 sammanställs och kategoriseras scenarierna i fyra kategorier.

Kategori 1 visar två scenarier där allokeringen av sparkvoten förändras för att öka investeringen i grönt realkapital. I dessa scenarier minskar  $S_{KC}$  i sin jämviktstakt (se uttryck (17)) men med start vid olika tidpunkter. Denna jämviktstakt är den takt  $S_{KC}$  måste sjunka i för att ekonomin ska vara miljömässigt hållbar, det vill säga för att EU:s ekonomi ska gå mot nettonollutsläpp ( $g_E = 0$ ). I det första scenariot (S1) väntar EU med denna åtgärd till 2040 och i det andra scenariot (S2) genomförs åtgärden 2020.

Kategori 2 visar istället två scenarier där allokeringen av forskare förändras i syfte att satsa mer på grön forskning. I det första scenariot (F1) är andelen forskare i den gröna forskningssektorn 30 % och andelen forskare i den koldioxidintensiva forskningssektorn 70 %. I det andra

<sup>2</sup> Ytterligare scenarier har simulerats, men i uppsatsen presenteras ett urval av scenarier som ger en sammanfattande bild av resultaten.

scenariot (F2) allokeras 90 % av forskarna till den gröna forskningssektorn och 10 % till den koldioxidintensiva forskningssektorn. F1 och F2 kan ses i relation till baselinescenariot, i vilket 10 % av forskarna arbetar med forskning inom grön teknologi och 90 % arbetar med forskning inom koldioxidintensiv teknologi.

Kategori 3 och 4 visar olika kombinationer av åtgärderna. I de båda scenarierna i kategori 3 genomförs en satsning på grön teknologi som innebär att andelen forskare i den gröna sektorn är 30 %. Scenarierna skiljer sig i den mening att sparkvotsåtgärden genomförs vid olika tidpunkter. I det första scenariot (F1S1) minskar investeringarna i koldioxidintensivt realkapital från 2040, medan de i det andra scenariot (F1S2) minskar från 2020. I scenarierna i kategori 4 genomförs en större satsning på grön teknologi än i kategori 3. I kategori 4 utgör andelen forskare inom den gröna forskningssektorn 90 % av det totala antalet forskare. De två scenarierna skiljer sig från varandra på samma sätt som i kategori 3, där sparkvotsåtgärden genomförs 2040 i det första scenariot (F2S1) och 2020 i det andra scenariot (F2S2).

Åtgärderna som föreslås utgår från att EU varken förändrar sin konsumtion eller mängden resurser som läggs på forskning. Istället handlar det om en omallokering av befintliga resurser som läggs på sparande och forskning. I jämförelsen av utfallen för de olika scenarierna kan det därför analyseras om det är möjligt för EU att nå nettonollutsläpp i produktionen 2050 med de resurser som redan ägnas åt investering i realkapital och FoU, eller om ytterligare resurser måste tillsättas för att uppnå målet.

Tabell 1. Scenarier		
<b>Baseline</b>	Inga åtgärder vidtas: $S_{KC}$ hålls konstant. Andel $L_G$ är 10 % och andel $L_C$ är 90 %	
<b>Kategori 1</b>	S1	$S_{KC}$ minskar i sin jämviktstakt från 2040
	S2	$S_{KC}$ minskar i sin jämviktstakt från 2020
<b>Kategori 2</b>	F1	Andel $L_G$ är 30 % och andel $L_C$ är 70 %
	F2	Andel $L_G$ är 90 % och andel $L_C$ är 10 %
<b>Kategori 3</b>	F1S1	Åtgärd F1 och S1
	F1S2	Åtgärd F1 och S2
<b>Kategori 4</b>	F2S1	Åtgärd F2 och S1
	F2S2	Åtgärd F2 och S2

## 6.2 Skattningar av variabler och parametrar

För att kunna göra simuleringarna med hjälp av modellen behövs startvärden för variablerna och uppskattade parametervärden. I kommande avsnitt presenteras vilka värden variablerna antar det år simuleringarna utgår från och hur dessa värden har valts. Därefter presenteras parametervärdena och vad som ligger till grund för uppskattningarna.

### 6.2.1 Skattningar av variabler

I syfte att undersöka EU:s ekonomiska tillväxt har EU behandlats som en samlad ekonomi i framtidsprognoserna. Startvärden för variablerna presenteras i tabell 2 och har uppskattats med hjälp av data för att göra framtidsprognoserna realistiska. Simuleringarna utgår från 2020, men eftersom senast tillgängliga data för vissa variabler är från 2017, baseras startvärdena på data från detta år. De uppskattade värdena utgår från att EU har 27 medlemsländer och simuleringarna inkluderar därför inte Storbritannien som nyligen lämnade unionen. Data för variablerna har hämtats från Eurostat, OECD, Världsbanken och Penn World Table.

Till att börja med har den totala realkapitalstocken ( $K$ ) beräknats genom att summera varje medlemslands realkapitalstock med hjälp av data från Penn World Table (Feenstra et al., 2015). För att uppskatta andelen grönt ( $K_G$ ) respektive koldioxidintensivt ( $K_C$ ) realkapital har sedan andelen energi som kommer från förnybara respektive icke förnybara källor i EU använts som indikator för fördelningen mellan de två realkapitaltyperna (Eurostat, 2020b). För att uppskatta den totala sparkvoten användes data för hur stor del av EU:s BNP som inte konsumeras (World Bank 2019). Fördelningen mellan förnybar och icke förnybar energi användes sedan återigen för att uppskatta hur stor del av sparkvoten som används till investeringar i grönt ( $S_{K_G}$ ) respektive koldioxidintensivt realkapital ( $S_{K_C}$ ) (Eurostat, 2020b). Eftersom det i modellen antas att arbetskraften ( $L$ ) är densamma som befolkningen, har storleken på EU:s population 2017 använts som mått för total arbetskraft. Data för hur stor del av arbetskraften som arbetar med FoU har hämtats från Eurostat (2020c). För att uppskatta hur stor del av forskarna som arbetar med utveckling av den gröna ( $L_G$ ) respektive koldioxidintensiva teknologin ( $L_C$ ), har den andel av totala patent som sökts för miljörelaterad teknologi i EU använts (OECD Statistics, 2019).

I simuleringarna är nivån av den gröna teknologin ( $A_G$ ), den koldioxidintensiva teknologin ( $A_C$ ) och de ackumulerade växthusgaserna ( $E$ ) index. Dessa variabler visar utvecklingen i variablerna, men deras startvärden är godtyckliga och baseras därför inte på data. I

simuleringarna antas att dagens nivå av koldioxidintensiv teknologi är större än nivån av den gröna teknologin.

Slutligen har BNP beräknats utifrån produktionsfunktionen (se uttryck (1)) med hjälp av de uppskattade variablerna och parametrarna. Utifrån det framtagna värdet på BNP och populationen har sedan BNP per capita beräknats.

Tabell 2. Startvärden för variabler	
Variabel	Startvärde
BNP (i biljoner nominell och PPP justerad 2011US\$)	22,469
BNP/capita (nominell och PPP justerad 2011US\$)	50432
$K$ (i biljoner nominell och PPP justerad 2011US\$)	93,505
$K_C$ (i biljoner nominell och PPP justerad 2011US\$)	60,857
$K_G$ (i biljoner nominell och PPP justerad 2011US\$)	14,316
$L$ (i miljoner)	445,534
$L_Y$ (i miljoner)	436,082
$L_C$ (i miljoner)	8,507
$L_G$ (i miljoner)	0,945
$A_C$	0,6
$A_G$	0,4
E	10
$S_{K_C}$	0,195
$S_{K_G}$	0,044

### 6.2.2 Skattningar av parametrar

De parametrar som används i modellen har uppskattats utefter vad som kan anses vara rimligt. Parametrarnas värden presenteras tillsammans med en beskrivning av hur de har uppskattats. En samlad lista över parametrarnas värden finns i tabell 3.

För parametern  $\alpha$  görs antagandet att värdet är  $\frac{1}{3}$ . Detta följer den uppskattning som görs i Jones & Vollrath (2013, s.59) och uppfyller kravet  $0 < \alpha < 1$  som visar att realkapitalet har

avtagande marginalavkastning.  $\beta$  uppskattas till 0,2, vilket innebär att det koldioxidintensiva realkapitalet är 20 % mer produktivt än det gröna realkapitalet. Detta produktionsövertag antas vara relativt stort eftersom företag idag i hög grad tycks investera i koldioxidintensivt realkapital, trots att det både blir obrukbart snabbare än grönt realkapital och bidrar till utsläpp av växthusgaser. Produktionsövertaget kan dock inte vara alltför stort, då detta skulle leda till en osannolikt stor BNP-minskning i framtiden när en allt större del av realkapitalstocken utgörs av grönt realkapital. Parametern  $\gamma$  har uppskattats till 0,9. För att visa på den avtagande marginalavkastningen av koldioxidintensiv teknologi bör  $0 < \gamma < 1$ .  $\gamma$  antas vara relativt stor eftersom effekten av strandade tillgångar i realkapitalet troligen har en begränsad effekt på den koldioxidintensiva teknologins vikt i produktionen.

Deprecieringstakten i realkapitalet ( $\delta_K$ ) har, i enlighet med skattningen i Jones & Vollrath (2013, s.25), antagits vara 0,05. Parametrarna  $\mu$  och  $\psi$  har skattats till 0,0001 respektive 0,0002. Den negativa effekten av strandade tillgångar antas alltså vara något större än den extra förslitning som sker på det koldioxidintensiva realkapitalet till följd av klimatförändringarna. Eftersom mängden koldioxidintensivt realkapital är så stor måste  $\mu$  och  $\psi$  anta små värden för att effekten på förändringen i det koldioxidintensiva realkapitalet ska vara i rimlig skala.

Parametern  $\sigma$  har varit svår att skatta, men har antagits vara liten och skattats till 0,02. Den naturliga depreciertakten av växthusgaser i atmosfären ( $\delta_E$ ) har även den antagits vara mycket liten och skattats till 0,001. Både  $\sigma$  och  $\delta_E$  har uppskattats vara små för att förändringen i ackumulerade växthusgasutsläpp ska vara på en rimlig nivå.

För parametern  $\varepsilon$  gäller  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Om  $\varepsilon$  antar värdet 1 är koldioxidintensivt och grönt realkapital perfekta substitut. Om parametern istället antar värdet 0 är de perfekta komplement. I framtidsprognoserna uppskattas  $\varepsilon$  vara 0,9 och följaktligen antas graden av substituerbarhet mellan de två typerna av realkapital vara relativt hög.

Produktiviteten i forskningssektorerna beskrivs av  $\theta$  som antar värdet 0,01.  $\theta$  antar ett litet värde för att tillväxttakten i både den gröna och den koldioxidintensiva teknologin ska vara på en rimlig nivå. Eftersom det är rimligt att det finns en avtagande marginalavkastning av att fler individer allokeras till någon av forskningssektorerna antas  $0 < \lambda < 1$ . Detta följer av att risken för överlappning av forskning blir större i takt med att antalet forskare ökar och följer resonemanget i Jones & Vollrath (2013, s.101-102). I framtidsprognoserna antas den extra avkastning ytterligare en forskare bidrar med till den teknologiska utvecklingen vara relativt

stor och  $\lambda$  uppskattas vara 0,8. För parametern  $\phi$  antas  $0 < \phi < 1$ . Det är rimligt att anta att parametern är mindre än 1, då tidigare forskning har avtagande marginalavkastning (Jones & Vollrath, 2013, s.101-102). I simuleringarna antas dock att den positiva effekten av tidigare forskning är större än den negativa effekten och parametern antar därför värdet 0,5. Eftersom  $\lambda$  och  $\phi$  båda påverkar ekonomins tillväxttakt i jämvikt har en kombination av dem valts som skapar en relativt rimlig nivå på tillväxttakten.

Parametrarna  $\tau$  och  $\Omega$  har båda uppskattats till 1,1. De antas vara större än 1 eftersom vi antar tilltagande margineffekt i effekten av ackumulerade växthusgaser på både den koldioxidintensiva teknologin och det koldioxidintensiva realkapitalet. I prognoserna har denna tilltagande effekt dock antagits vara relativt liten.

Slutligen har ett genomsnittsvärde av befolkningens tillväxttakt mellan 2008 och 2017 räknats ut och sedan använts som värde på befolkningstillväxten ( $n$ ) (Eurostat, 2020a). Detta har gjorts mot bakgrund av att befolkningstillväxten antas vara konstant.

Tabell 3. Parametervärden			
Parameter	Värde	Parameter	Värde
$\alpha$	1/3	$n$	0,0017
$\beta$	0,2	$\Omega$	1,1
$\delta_E$	0,001	$\psi$	0,0002
$\delta_K$	0,05	$\phi$	0,5
$\varepsilon$	0,9	$\sigma$	0,02
$\gamma$	0,9	$\tau$	1,1
$\lambda$	0,8	$\theta$	0,01
$\mu$	0,0001		

## 7. Resultat och analys

I detta kapitel presenteras resultaten av simuleringarna. Framtidsprognoserna används för att utvärdera den effekt ökade investeringar i grönt realkapital och satsningar på grön forskning har på den ekonomiskt och klimatmässigt långsiktiga utvecklingen. Detta möjliggör en analys av huruvida EU:s mål om klimatneutralitet 2050 kan uppfyllas genom en omallokering av



investeringar och forskare. I kapitlet förs även en avslutande diskussion om modellens potentiella utvecklingsområden.

Klimatåtgärderna analyseras utifrån dess effekter på nivån av BNP per capita, tillväxttakten i BNP per capita, nivån av ackumulerade växthusgaser i atmosfären och tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna. Med hjälp av diagram jämförs effekterna av de olika klimatåtgärderna med varandra och med baselinescenariot fram till år 2100.

De olika kategorierna av scenarier (se tabell 1) representeras av olika färger i diagrammen: grönt indikerar kategori 1, blått indikerar kategori 2, gult indikerar kategori 3 och rött indikerar kategori 4. Varje kategori innehåller två scenarier, där det ena illustreras av en streckad linje i diagrammen och det andra av en hel linje. De hela linjerna visar de alternativ som är mest gynnsamma för tillväxttakten i BNP per capita på lång sikt, medan de streckade linjerna visar de scenarier som är minst gynnsamma för tillväxttakten i BNP per capita på lång sikt.

### **7.1 BNP per capita och tillväxttakt i BNP per capita**

Simuleringarna av den ekonomiska utvecklingen i EU fram till 2100 presenteras i två diagram. Det första diagrammet visar utvecklingen i BNP per capita-nivån och det andra diagrammet visar utvecklingen i tillväxttakten i BNP per capita. Eftersom tillväxttakten i BNP per capita indikerar var ekonomin är på väg är det denna som är viktigast för den långsiktiga ekonomiska utvecklingen. De värden som presenteras i diagrammet för tillväxttakten i BNP per capita är relativt låga, men i analysen som görs är det inte de absoluta talen som är viktiga utan snarare utvecklingen och förhållandet mellan de olika scenarierna som har betydelse. Utifrån diagrammen analyseras först baselinescenariot, sedan diskuteras sparkvotsscenarierna och de scenarier som rör satsningar på grön forskning. Slutligen diskuteras kombinationsscenarierna.

Diagram 1. BNP/capita

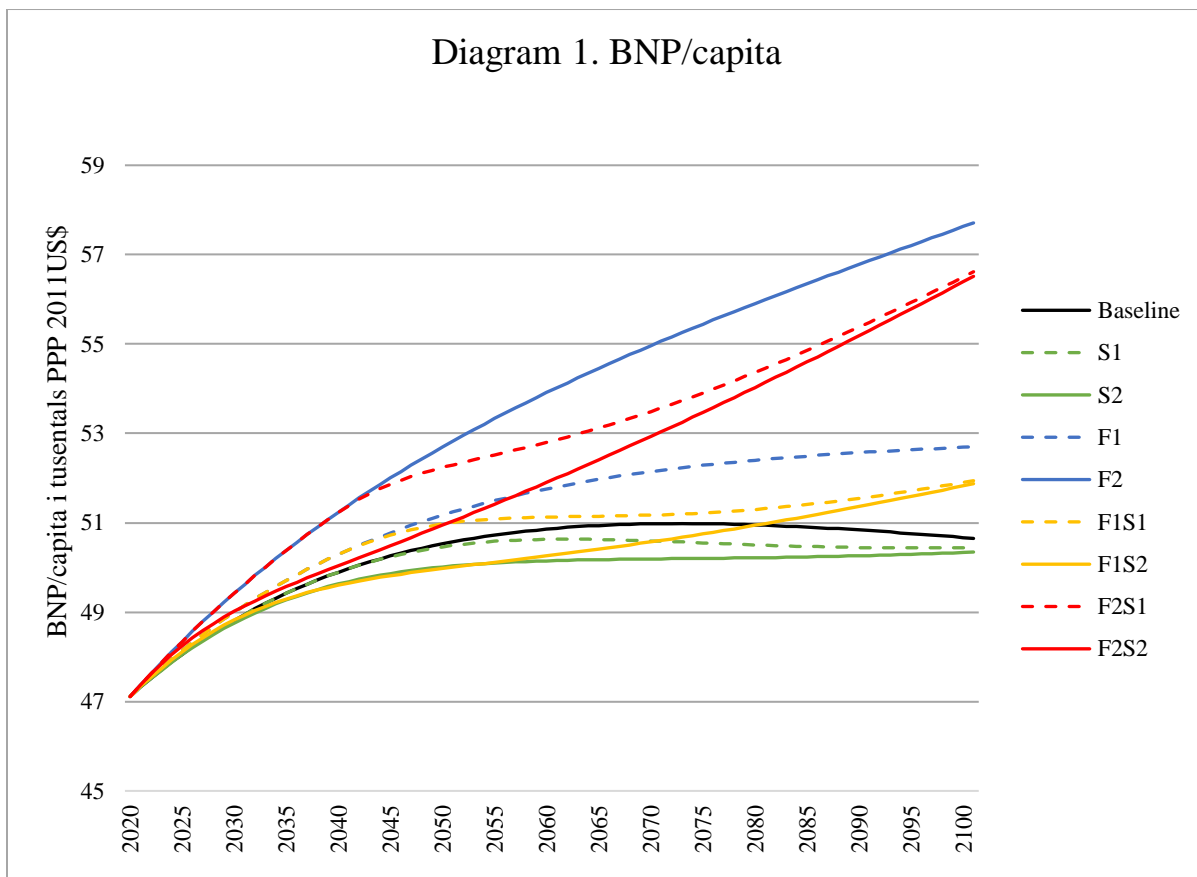
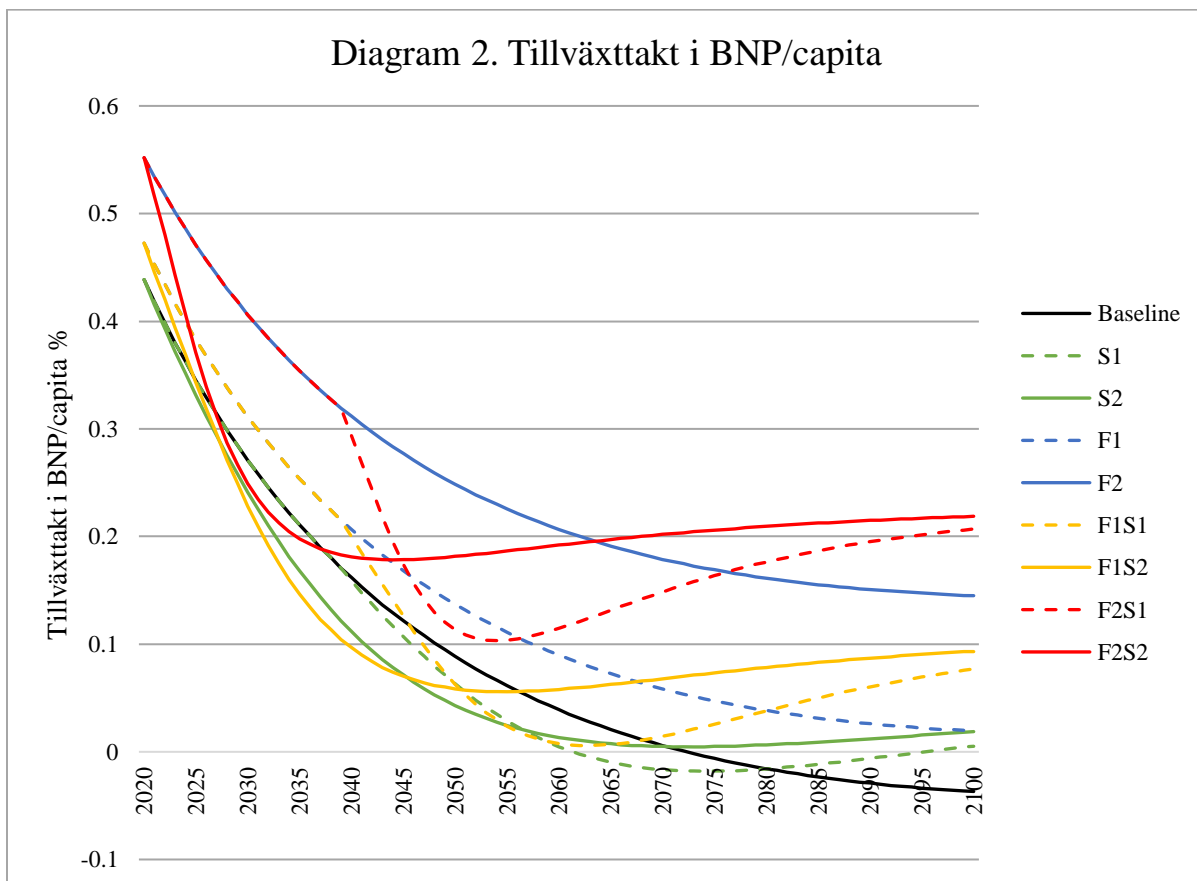


Diagram 2. Tillväxttakt i BNP/capita



Till att börja med kan det konstateras att baselinescenariot är det mest negativa scenariot för den långsiktiga ekonomiska utvecklingen. Trots att baselinescenariot inte uppvisar den lägsta nivån av BNP per capita under den studerade perioden, har det i slutet av perioden den lägsta ekonomiska tillväxttakten. Från 2073 har baselinescenariot en negativ tillväxttakt, vilket resulterar i en sjunkande nivå av BNP per capita. Den negativa tillväxttakten i slutet av perioden indikerar att BNP per capita-nivån i baselinescenariot kommer att fortsätta ha en negativ utveckling och till slut hamna på en lägre nivå än de andra scenarierna.

Simuleringarna visar att det är ekonomiskt kostsamt att ställa om till en grönare produktion genom att öka investeringarna i grönt realkapital och minska investeringarna i koldioxidintensivt realkapital. Detta visas i diagram 1 av att båda sparkvotsscenarierna (S1 och S2) under den studerade perioden har en lägre BNP per capita-nivå än alla andra scenarier. Kostnaden av åtgärden visas även av att tillväxttakten i diagram 2 börjar minska direkt när åtgärden sätts in. Detta beror på att det koldioxidintensiva realkapitalet i modellen är mer produktivt än det gröna realkapitalet. När den totala realkapitalstocken i allt högre grad utgörs av grönt realkapital minskar därför den totala produktionen. Trots att åtgärden är kostsam kommer det på lång sikt att löna sig att genomföra den, vilket visas av att tillväxttakten i slutet av perioden för båda sparkvotsscenarierna är högre än i baselinescenariot. Simuleringarna visar också att det är av betydelse vid vilken tidpunkt åtgärden vidtas. På lång sikt kostar det mer att vänta med åtgärden än att sätta in den direkt. Därför är det positivt för ekonomin på lång sikt att genomföra åtgärden redan 2020, vilket visas i diagram 2 där ekonomins tillväxttakt för detta scenario (S2) i slutet av perioden är högre än tillväxttakten för scenariot där åtgärden sätts in 2040 (S1). Detta beror på att ju senare omställningen till en mer utsläppssnål produktion sker, desto mer påtaglig blir den negativa effekten av klimatförändringar på produktionen.

Vad gäller teknologisk utveckling visar simuleringarna att investering i grön forskning är positivt för den ekonomiska utvecklingen. Detta beror på att den gröna teknologin har en större vikt i produktionen än vad den koldioxidintensiva teknologin har. Diagrammen visar att storleken på omallokeringen av forskare är av stor betydelse både för tillväxttakten och för nivån av BNP per capita. Om en stor del av forskarna arbetar inom den gröna forskningssektorn får detta en betydligt större positiv ekonomisk effekt än om endast en liten del av forskarna allokeras till denna sektor. Detta visas av att det scenario där 90 % av forskarna arbetar i den gröna forskningssektorn (F2) visar en betydligt högre BNP per capita-nivå och ekonomisk tillväxttakt än det scenario där 30 % av forskarna arbetar i den gröna sektorn (F1). Scenariot

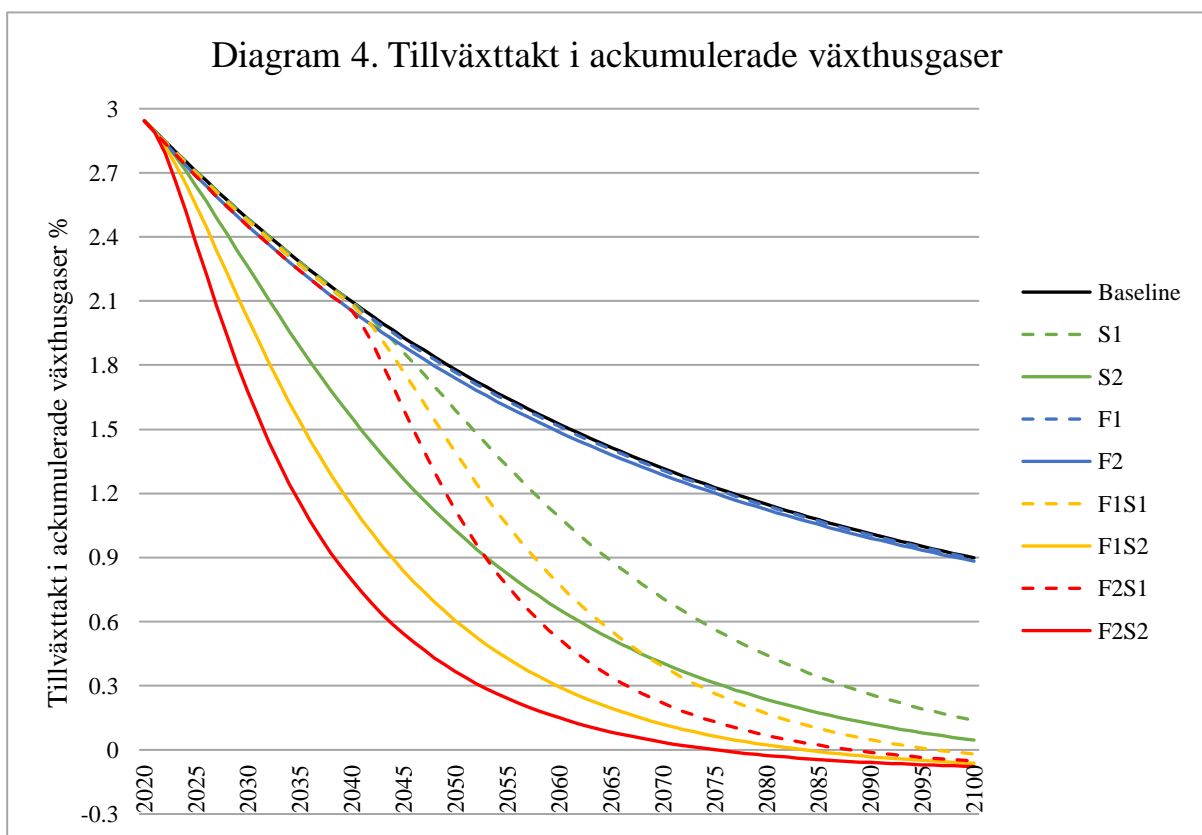
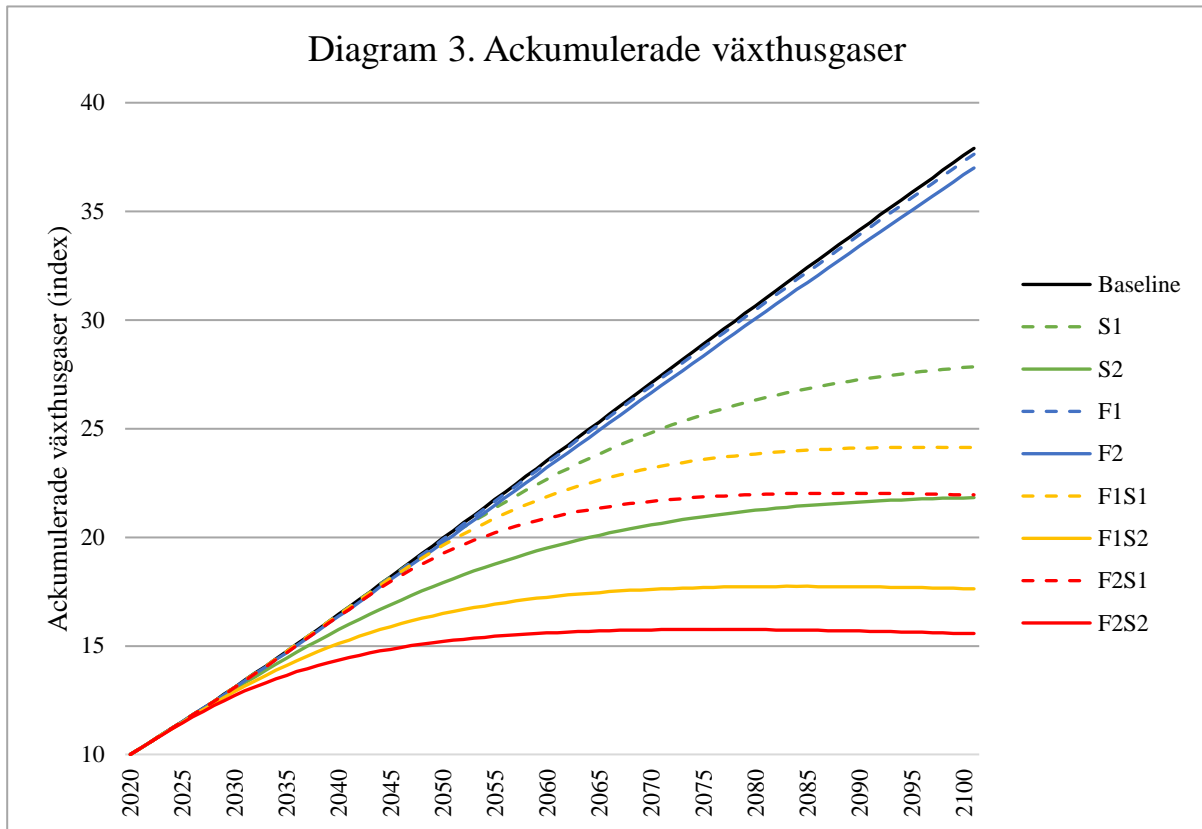
med störst andel forskare i den gröna forskningssektorn (F2) visar även att stora satsningar på grön forskning har en betydligt större positiv påverkan på tillväxttakten i BNP per capita och BNP per capita-nivån, än vad satsningar på grönt realkapital har.

Simuleringarna visar att när klimatåtgärderna kombineras med varandra ger det en positiv effekt på tillväxttakten i BNP per capita och därmed också för den långsiktiga ekonomiska utvecklingen. Kombinationsscenarierna följer samma mönster som de scenarier där enskilda åtgärder vidtas, men förstärker klimatåtgärdernas positiva effekter på ekonomin. I likhet med de scenarier där enskilda klimatåtgärder vidtas, visar kombinationsscenarierna att det är satsningar på grön teknologi som har störst positiv effekt på ekonomin. Följaktligen leder de kombinationsscenarier där störst andel forskare allokeras till den gröna forskningssektorn (F2S1 och F2S2) både till en högre tillväxttakt och högre BNP per capita-nivå än när satsningen på grön forskning är mindre (F1S1 och F1S2). Kostnaden för att ställa om till en grön realkapitalstock syns även i kombinationsscenarierna. I diagram 1 blir det tydligt eftersom när en stor satsning på grön forskning görs enskilt leder det till en högre nivå av BNP per capita än när en sådan satsning genomförs tillsammans med satsningar på grönt realkapital. Vad gäller tillväxttakten i BNP per capita visar däremot diagram 2 att när en stor satsning på grön forskning kombineras med sparkvotsåtgärden leder det på lång sikt till en högre tillväxttakt än när en satsning på grön teknologi görs enskilt. Detta tyder på att det på lång sikt ändå är bättre för den ekonomiska utvecklingen att kombinera en satsning på grön forskning med ökade investeringar i grönt realkapital. Scenariot där 90 % av forskarna arbetar inom den gröna forskningssektorn och där sparkvotsåtgärden genomförs 2020 (F2S2) leder till den högsta tillväxttakten i BNP per capita i slutet av perioden och är därmed på lång sikt det mest ekonomiskt gynnsamma alternativet.

## **7.2 Ackumulerade växthusgaser och tillväxttakt i ackumulerade växthusgaser**

Diagrammen i detta avsnitt illustrerar hur EU:s produktion påverkar utvecklingen i nivån av och tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna fram till 2100. Diagram 3 illustrerar nivån av ackumulerade växthusgaser och ger en indikation av hur stora klimatförändringar de olika scenarierna resulterar i. I diagram 4 visas tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna. Utifrån detta diagram kan utvecklingen av produktionens växthusgasutsläpp analyseras och det är möjligt att se när produktionen i de olika scenarierna når nettonollutsläpp, det vill säga när tillväxttakten i ackumulerade växthusgaser är noll. Med diagrammen som grund analyseras till

att börja med baselinescenariot. Därefter diskuteras scenarierna som rör satsningar på grönt realkapital och grön forskning. Avslutningsvis utvärderas kombinationsscenarierna.



Diagrammen visar att baselinescenariot är det scenario där växthusgasutsläppen är som störst. Detta scenario medför en fortsatt ökning av mängden växthusgaser i atmosfären och uppvisar den högsta tillväxttakten i ackumulerade växthusgasutsläpp. Om inga klimatåtgärder vidtas kommer alltså nivån av växthusgaser i atmosfären att bli hög och EU kommer att vara långt ifrån att nå klimatneutralitet 2050.

Åtgärder som rör sparkvoten har stor betydelse för utvecklingen av växthusgasutsläppen. Diagrammen visar att det är viktigt att börja investera i grönt realkapital så snart som möjligt. I diagram 3 är det tydligt att de ackumulerade växthusgasutsläppen stabiliseras på en betydligt lägre nivå när sparkvotsåtgärden vidtas 2020 (S2) än när den vidtas 2040 (S1). Detta förklaras av utvecklingen i diagram 4 där tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna börjar minska direkt när åtgärden genomförs. Följaktligen kommer ökningen av de ackumulerade växthusgaserna att börja avta tidigare och stabiliseras på en lägre nivå om de ökade investeringarna i grönt realkapital startar 2020 än om de startar 2040. Däremot kan EU inte nå klimatneutralitet innan 2050 genom att endast omallokera realkapitalinvesteringarna.

Grön teknologisk utveckling har en positiv effekt på minskningen av ackumulerade växthusgaser, eftersom det ökar incitamenten att använda grönt realkapitalet i produktionen. Denna positiva effekt blir dock endast marginell eftersom nivån av den gröna teknologin är så liten i relation till det koldioxidintensiva realkapitalet. Detta förklarar varför diagrammen visar att satsningar på grön forskning endast har en liten effekt på utvecklingen av de ackumulerade växthusgaserna. I diagram 3 resulterar det scenario där 90 % av forskarna allokeras till den gröna forskningssektorn (F2) i en något lägre nivå av ackumulerade växthusgaser än scenariot där endast 30 % av forskarna arbetar i den gröna sektorn (F1). Diagram 4 visar däremot att tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna i båda forskningsscenarierna följer samma utvecklingsbana som i baselinescenariot, vilket förklarar varför inget av scenarierna lyckas stabilisera de ackumulerade växthusgaserna i diagram 3. Därför räcker inte heller dessa åtgärder för att EU ska kunna nå klimatneutralitet innan 2050.

När klimatåtgärder kombineras förstärks deras effekter på utvecklingen av ackumulerade växthusgaser. Effekten av satsningar på grön forskning blir betydligt större när dessa åtgärder sker i kombination med ökade investeringar i grönt realkapital. Diagram 3 och 4 visar att i de kombinationsscenarier där sparkvotsåtgärden vidtas 2020 minskar tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna snabbare än när sparkvotsåtgärden genomförs enskilt. Därmed stabiliseras de ackumulerade växthusgaserna på en lägre nivå i dessa kombinationsscenarier.

Den kombination av åtgärder som ger störst positiv effekt för klimatet är den där sparkvotsåtgärden vidtas 2020 och där 90 % av forskarna allokeras till den gröna forskningssektorn (F2S2). I detta scenario minskar tillväxttakten i de ackumulerade växthusgaserna snabbast och de stabiliseras på en nivå som är lägre än för alla andra scenarier.

Diagram 3 visar att alla kombinationsscenarier når klimatneutralitet under detta sekel. Det scenario som först når klimatneutralitet är det där EU vidtar sparkvotsåtgärden 2020 och allokerar 90 % av forskarna till den gröna forskningssektorn (F2S2). Detta scenario når dock klimatneutralitet först 2077, vilket innebär att EU inte heller med hjälp av denna kombination av åtgärder kan uppnå sitt mål om att vara klimatneutralt 2050.

### **7.3 Att kombinera klimatåtgärder**

Resultaten visar att åtgärderna får störst effekt när de kombineras med varandra och att det som är mest gynnsamt både för ekonomin och klimatet är när stora satsningar görs på både grönt realkapital och grön forskning. Detta är ett resultat av det komplexa förhållandet mellan produktionen och klimatförändringar.

Det faktum att ekonomin gynnas av en kombination av åtgärder grundas i kombinationsscenariernas positiva effekt på klimatet. När det koldioxidintensiva realkapitalet minskar till följd av sparkvotsåtgärden, kommer produktionens utsläpp av växthusgaser att bli mindre. I takt med att mängden koldioxidintensivt realkapital i produktionen minskar kommer även grön teknologisk utveckling att få en större positiv effekt på klimatet. De minskade växthusgasutsläppen har också en positiv effekt på produktionen, eftersom den inte kommer att påverkas lika negativt av klimatförändringar. Detta förstärks i sin tur av det faktum att den totala realkapitalstocken, till följd av sparkvotsåtgärden, i större utsträckning utgörs av grönt realkapital som inte påverkas negativt av klimatförändring.

Sammanfattningsvis kommer satsningar på grönt realkapital och grön forskning att ha en ökad positiv effekt på klimatet när de kombineras med varandra. Ett förbättrat klimat påverkar i sin tur produktionen positivt och följaktligen kommer kombinationsscenarierna vara gynnsamma både för klimatet och ekonomin.

### **7.4 Reflektioner om modellen**

Flera av parametrarna i modellen är känsliga för förändringar, vilket indikerar att de speglar relationer mellan klimatförändringar och ekonomi som är av stor betydelse.  $\mu$ ,  $\psi$  och  $\Omega$  är

relativt känsliga för förändringar eftersom de bestämmer hur stor negativ effekt klimatförändringar har på det koldioxidintensiva realkapitalet. Om de antar stora värden blir det mycket kostsamt att använda koldioxidintensivt realkapital i produktionen när utsläppen ökar.  $\sigma$  och  $\delta_E$  påverkar istället framför allt utvecklingen av de ackumulerade växthusgaserna och är känsliga för förändring. Uppskattningarna av dessa har därför betydelse för när nettonollutsläpp nås. Ju mindre  $\sigma$  är och ju större  $\delta_E$  är, desto snabbare blir ekonomin klimatneutral.  $\varepsilon$  är också känslig för förändringar eftersom den beskriver substituerbarheten mellan de två realkapitaltyperna. Om substituerbarheten är låg blir det mer kostsamt att ställa om till en grön produktion. Det faktum att dessa parametrar i modellen är känsliga för förändringar, visar att de beskriver förhållanden mellan klimatförändringar och ekonomisk tillväxt som är av stor betydelse.

I modellen är det koldioxidintensiva realkapitalets produktivitetsovertag konstant. I verkligheten kan dock tänkas att detta produktivitetsovertag kommer att minska i takt med att den gröna teknologin utvecklas och mer grönt realkapital börjar användas i produktionen. För att framtidsprognoserna ska vara rimliga kan  $\beta$  i modellen inte anta ett alltför stort värde. Även om produktivitetsovertaget i dag kan tänkas vara större än 20 % skulle en sådan skattning av parametern resultera i en osannolikt stor produktionsminskning i framtiden. Detta eftersom den största delen av realkapitalstocken då kommer att utgöras av grönt realkapital, men koldioxidintensivt realkapital fortfarande anses vara mer produktivt. Därför är även  $\beta$  relativt känslig för förändringar. Genom att utveckla modellen på så vis att produktivitetsovertaget minskar i takt med att den gröna teknologin utvecklas och implementeras i produktionen, skulle framtidsprognoserna kunna göras mer precisa.

Att satsningar på grön teknologi endast har en marginell effekt på de ackumulerade växthusgasutsläppen beror på hur modellen är utformad. Modellen beskriver till viss del att grön teknologisk utveckling leder till minskade växthusgasutsläpp eftersom det ökar incitamenten till att investera i grönt realkapital. Denna relation mellan grön teknologi och grönt realkapital kan dock tänkas vara större än vad modellen visar. I verkligheten kan det därför vara så att satsningar på grön teknologi får större positiva klimateffekter, genom att skynda på omställningen till en mer utsläppssnål produktion, än vad som är inbyggt i modellen. Om större hänsyn tas till denna relation mellan teknologi och realkapital är det möjligt att de kombinationer av satsningar på grönt realkapital och grön forskning som presenteras i uppsatsen skulle kunna leda till att EU når nettonollutsläpp innan 2050. För att undersöka detta



skulle dock relationen mellan grön teknologi och grönt realkapital tydligare behöva inkorporeras i modellen.

Framtidsprognoserna visar att tillväxttakterna i modellen inte hinner stabiliseras innan 2100, vilket indikerar att modellen inte når jämvikt under denna period. Att det tar väldigt lång tid innan ekonomin når jämvikt är bland annat ett resultat av att jämvikten är definierad på så vis att tillväxttakten i ackumulerade växthusgaser är noll i jämvikt. Med hänsyn till att dagens produktion till stor del är baserad på koldioxidintensivt realkapital är det därför inte förvånande att det tar lång tid innan ekonomin stabiliserar sig. Ett möjligt utvecklingsområde för modellen skulle därför kunna vara att göra förändringar i antaganden och parametervärden så att det inte tar lika lång tid att nå jämvikt. Detta är däremot inte avgörande för uppsatsens resonemang och slutsatser.

## **8. Sammanfattande slutsatser**

För att kunna analysera relationen mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar har vi utvecklat en tillväxtmodell. Med hjälp av denna har simuleringar gjorts för att skapa en förståelse för hur den ekonomiska tillväxten kommer att påverkas av en fortsatt koldioxidintensiv produktion, samt hur olika klimatåtgärder kommer att påverka den ekonomiska tillväxten och utsläppen av växthusgaser i EU i framtiden. Med grund i de skapade framtidsprognoserna har vi även analyserat huruvida EU kan uppnå sitt mål om klimatneutralitet 2050 genom att omallokera sina investeringar och forskningsresurser till den gröna sektorn.

Ett bibehållande av dagens koldioxidintensiva produktionssystem kommer att leda till stor skada både för ekonomin och klimatet. Resultaten visar tydligt att baselinescenariot inte lyckas stabilisera nivån av växthusgaser i atmosfären. Om den totala realkapitalstocken i produktionen är fortsatt koldioxidintensiv kommer därmed utsläppen av växthusgaser att leda till stora klimatförändringar. Dessa kommer i sin tur att påverka produktionen negativt eftersom förändrade väderförhållanden och ökad förekomst av extremväder kommer att göra att det koldioxidintensiva realkapitalet slits i högre hastighet. Om växthusgasutsläppen fortsätter vara höga riskerar också delar av koldioxidintensivt realkapital och koldioxidintensiv teknologi att inte kunna användas på grund av striktare miljölagar. Dessa negativa effekter på produktionen visas i resultaten av att baselinescenariot uppvisar en snabbt avtagande, och under andra hälften av seklet även negativ, tillväxttakt i BNP per capita. För att kunna säkerställa en ekonomiskt

och miljömässigt hållbar framtid kommer därför åtgärder att behöva vidtas som minskar produktionens utsläpp av växthusgaser. Om så inte är fallet kommer klimatförändringarna till slut att bli så stora att fortsatt produktion inte är möjlig.

Investeringar i grönt realkapital har stor positiv påverkan på klimatet eftersom det gör det möjligt att minska tillväxttakten i ackumulerade växthusgaser och stabilisera deras nivå. Framtidsprognoserna visar att det är av stor betydelse vid vilken tidpunkt denna klimatåtgärd vidtas. Om EU börjar investera mer i grönt realkapital redan 2020 kan nivån av växthusgasutsläpp stabiliseras på en betydligt lägre nivå än om denna åtgärd vidtas 2040. Att ställa om till en grönare produktion är kostsamt eftersom det på kort sikt påverkar BNP per capita negativt, men på lång sikt kommer det att leda till att EU får en högre ekonomisk tillväxttakt än om inga åtgärder görs alls. Eftersom den långsiktiga ekonomiska tillväxttakten ger en indikation på var ekonomin är på väg, visar detta hur viktigt det är från ett ekonomiskt perspektiv att klimatåtgärder sätts in så snart som möjligt. Följaktligen är tidiga insatser av betydelse för att EU ska kunna uppnå en miljömässigt och ekonomiskt hållbar framtid.

Framtidsprognoserna visar att satsningar på grön teknologi har tydliga positiva effekter på den ekonomiska tillväxten och att det är av betydelse hur stor omallokeringen av forskare är. De scenarier som leder till den högsta nivån av BNP per capita och den högsta tillväxttakten i BNP per capita i slutet av perioden är de där 90 % av forskarna allokeras till den gröna forskningssektorn. För att EU ska kunna skapa en grön ekonomi utan att åsidosätta ekonomisk tillväxt är därför stora satsningar på grön teknologisk utveckling avgörande. Däremot visar simuleringarna att investering i grön forskning inte resulterar i att nivån av växthusgaser i atmosfären stabiliseras. För att minska växthusgasutsläppen är det därför inte tillräckligt att endast satsa på grön teknologisk utveckling. En ekonomiskt och miljömässigt hållbar framtid kräver att den gröna teknologin även implementeras i produktionen genom investeringar i grönt realkapital.

Resultatet av simuleringarna visar att det mest fördelaktiga för både den ekonomiska tillväxten och klimatet är att genomföra åtgärderna i kombination med varandra. Den mest gynnsamma framtidsprognosen är den där EU påbörjar den ökade investeringen i grönt realkapital redan 2020 och 90 % av forskarna allokeras till den gröna sektorn. Sammanfattningsvis är det mest gynnsamma för EU, både utifrån ett långsiktigt ekonomiskt perspektiv och ett miljömässigt perspektiv, att omedelbart börja öka investeringarna i grönt realkapital och samtidigt

genomföra stora satsningar på grön teknologi. Resultaten belyser det faktum att en grön produktion inte behöver leda till att den ekonomiska tillväxten åsidosätts.

Framtidsprognoserna visar även att EU inte kan nå målet om klimatneutralitet 2050 med hjälp av de klimatåtgärder som föreslås i uppsatsen. Om satsningar på både grönt realkapital och grön teknologi genomförs kan dock klimatneutralitet nås under andra halvan av seklet, vilket fortfarande är i linje med Parisavtalet som ligger till grund för EU:s mål. Ju tidigare omställningen till en grönare produktion startar och ju större satsningar som görs på grön forskning, desto snabbare kan klimatneutralitet nås. Eftersom en omallokering av befintliga resurser inte är tillräcklig för att EU ska nå målet är det troligt att det kommer behövas både en ökning av totala investeringar och ytterligare resurser till forskning för att EU ska kunna bli klimatneutralt innan 2050.

Det komplicerade samband som finns mellan mängden växthusgaser i atmosfären och ekonomins utveckling försvårar skapandet av framtidsprognoser eftersom vissa av parametrarnas verkliga värden är svåra att uppskatta. Att flera av parametrarna i modellen är känsliga för förändringar indikerar att det är av stor betydelse att framtida forskning undersöker de förhållanden som parametrarna beskriver för att öka förståelsen för samspelet mellan klimatförändringar och ekonomisk tillväxt.

Avslutningsvis belyser modellen att relationen mellan ekonomisk tillväxt och klimatförändringar är mycket komplex. Framtidsprognoserna visar att ett säkerställande av framtida generationers ekonomiska och miljömässiga välfärd kräver både omedelbara investeringar i grönt realkapital och stora satsningar på grön teknologisk utveckling. Om en sådan kombination av klimatåtgärder genomförs är en grön produktion förenlig med fortsatt ekonomisk tillväxt.

## Referenslista

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hémous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change, *American Economic Review*, [e-tidskrift] vol. 102 nr. 1, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 10 april 2020]

Aghion, P., & Howitt, P. (2009). *The Economics of Growth*, Cambridge, London: The MIT Press

Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., & Tavoni, M. (2006). WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model, *The Energy Journal*, [e-tidskrift] vol.27, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 9 april 2020]

European Environment Agency (EEA). (2019a). Addressing climate change adaptation in transnational regions in Europe, Tillgänglig online: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate-change-adaptation/adaptation-policies/adaptation-policies-in-transnational-regions/#ref3> [Hämtad 14 april 2020]

European Environmental Agency (EEA). (2019b). *The European Environment - State and Outlook 2020: Knowledge for transitions to a sustainable Europe*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

Europeiska Kommissionen (EU) (2018). COM(2018) 773 final. En ren jord åt alla: En europeisk strategisk långsiktig vision för en stark, modern, konkurrenskraftig och klimatneutral ekonomi, Bryssel. Tillgänglig online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN> [Hämtad: 08-05-2020]

Eurostat (2020a). Population on 1 January by age and sex. Data [online] Tillgänglig online: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo\\_pjan&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo_pjan&lang=en)

Eurostat (2020b). Share of energy from renewable sources. Data. [online] Tillgänglig online: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_ind\\_ren&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_ren&lang=en)

Eurostat (2020c). Total R&D personnel and researchers by sectors of performance, as % of total labour force and total employment, and by sex. Data. [online] Tillgänglig online: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=rd\\_p\\_perslf&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=rd_p_perslf&lang=en)

Fankhauser, S., Smith, Joel B., Tol, Richard S.J. (1999). Weathering Climate Change: Some simple Rules to Guide Adaptation Decisions, *Ecological Economics* [e-tidskrift] vol. 30, nr. 1, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 5 maj 2020]

Feenstra, Robert C., Robert Inklaar and Marcel P. Timmer (2015), "The Next Generation of the Penn World Table" *American Economic Review*, 105(10), 3150-3182. Penn World Table version 9.1 (2019). Capital stock at current PPPs (in mil. 2011US\$). Data [online] Tillgänglig online: [www.ggd.net/pwt](http://www.ggd.net/pwt)

Hassler, J., Krusell, P., Persson, T., & Strömberg, P. (2018). 2018 års Ekonomipris till William Nordhaus och Paul Romer, *Ekonomisk Debatt*, [e-tidskrift] vol. 46, nr. 8, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 10 april 2020]

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, Cambridge och New York: Cambridge University Press

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014b). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge och New York: Cambridge University Press

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014c). *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Genève: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Summary for Policymakers*. In: *Global Warming of 1.5°C*, Genève: World Meteorological Organization.

Jones, C. (1995). R&D-Based Models of Economic Growth, *Journal of Political Economy*, [e-tidskrift] vol. 103, nr. 4, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 14 maj 2020]

Jones, C., & Vollrath, D. (2013). *Introduction to Economic Growth*, uppl.3, New York: W.W. Norton & Company

New Climate Economy (NCE). (2014). *Better Growth Better Climate*, Washington: The New Climate Economy.

New Climate Economy (NCE). (2016). *The Sustainable Infrastructure Imperative - Financing for Better Growth and Development*, London och Washington: The New Climate Economy.

Nordhaus, W.D. (1994). *Managing the global commons: the economics of climate change*, Cambridge: MIT Press

The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2017). *Investing in Climate, Investing in Growth*, Paris: OECD Publishing

OECD Statistics (2019). *Patents by technology: Patents in environmental-related technologies*. Data [online] Tillgänglig online: <https://stats.oecd.org/>

Parisavtalet. (2015) Paris: Förenta Nationerna.

Romer, P. (1990). Endogenous Technological Change, *Journal of Political Economy*, [e-tidskrift] vol. 98 nr. 5, Tillgänglig: LUSEM Library website <http://www.lusem.lu.se/library> [Hämtad: 12 maj 2020]

World Bank (2019). *Gross domestic savings (% of GDP) - European Union*. Data. [online] Tillgänglig online: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDS.TOTL.ZS?end=2017&locations=EU&start=1970&view=chart>

## Appendix I

### A. Variabler

$A_C$ : Koldioxidintensiv teknologi

$\dot{A}_C$ : Förändring i koldioxidintensiv teknologi

$A_G$ : Grön teknologi

$\dot{A}_G$ : Förändring i grön teknologi

$E$ : Ackumulerade växthusgaser i atmosfären

$\dot{E}$ : Förändring i ackumulerade växthusgaser i atmosfären

$K$ : Total realkapitalstock

$K_C$ : Koldioxidintensivt realkapital

$\dot{K}_C$ : Förändring i koldioxidintensivt realkapital

$K_G$ : Grönt realkapital

$\dot{K}_G$ : Förändring i grönt realkapital

$L$ : Total mängd arbetskraft

$\dot{L}$ : Förändring i total mängd arbetskraft

$L_C$ : Arbetskraft inom den koldioxidintensiva forskningssektorn

$L_G$ : Arbetskraft inom den gröna forskningssektorn

$L_Y$ : Arbetskraft i produktion av varor och tjänster

$\bar{S}$ : Den totala sparkvoten

$S_{K_C}$ : Del av sparkvot som investeras i koldioxidintensivt realkapital

$S_{K_G}$ : Del av sparkvot som investeras i grönt realkapital

$Y$ : Produktion

### B. Parametrar

$\alpha$ : Hur stor vikt realkapitalet har i produktionen

$\beta$ : Extra produktivitet av det koldioxidintensiva realkapitalet i förhållande till det gröna realkapitalet

$\delta_E$ : Deprecieringstakt för koldioxid i atmosfären

$\delta_K$ : Realkapitalets naturliga förslitning (utan hänsyn till klimatförändring)

$\varepsilon$ : Graden av substituerbarhet mellan koldioxidintensivt och grönt realkapital

$\gamma$ : Den vikt koldioxidintensiv teknologi har i produktionen

$\lambda$ : Hur stor avkastning ytterligare en person inom någon av forskningssektorerna ger

$\mu$ : Extra förslitning av realkapitalet på grund av mer extremväder och temperaturförändringar

$n$ : Befolkningstillväxt

$\Omega$ : Effekten av  $E$  på  $\dot{K}_C$

$\psi$ : Negativ effekt av strandade tillgångar

$\phi$ : Hur stor användning dagens forskning har av tidigare forskning

$\sigma$ : Mått för växthusgasutsläpp som sker till följd av produktionen

$\tau$ : Effekten av  $E$  på  $\dot{A}_C$

$\theta$ : Produktivitet i forskningssektorena

## Appendix II

### A. Modellens produktionsfunktion och antaganden

$$\text{Produktionsfunktion: } Y = K^\alpha (A_C^\gamma A_G L_Y)^{1-\alpha} \quad (\text{A1})$$

$$K = [(1 + \beta)K_C^\varepsilon + K_G^\varepsilon]^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (\text{A2})$$

$$\dot{K}_C = S_{K_C} Y - \delta_K K_C - (\mu + \psi) E^\Omega K_C \quad (\text{A3})$$

$$\dot{K}_G = S_{K_G} Y - \delta_K K_G \quad (\text{A4})$$

$$\bar{S} = S_{K_C} + S_{K_G} \quad (\text{A5})$$

$$L = L_Y + L_C + L_G \quad (\text{A6})$$

$$\frac{\dot{L}}{L} = n \quad (\text{A7})$$

$$\dot{A}_C = \theta A_C^\phi L_C^\lambda E^{-\tau} \quad (\text{A8})$$

$$\dot{A}_G = \theta A_G^\phi L_G^\lambda \quad (\text{A9})$$

$$\dot{E} = \sigma \frac{K_C}{A_G} - \delta_E E \quad (\text{A10})$$

### B. Tillväxttakt i BNP per capita i jämvikt

*Härledning av uttryck (11)*

Vi förenklar (A2):

$$K = [(1 + \beta)K_C^\varepsilon + K_G^\varepsilon]^{\frac{1}{\varepsilon}} = \left[ \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right) K_G^\varepsilon \right]^{\frac{1}{\varepsilon}} = \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} (K_G^\varepsilon)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (\text{B1})$$

Sätt in (B1) i (A1):

$$Y = \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} (K_G^\varepsilon)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} (A_C^\gamma A_G L_Y)^{1-\alpha} \quad (\text{B2})$$

BNP per capita:

$$\begin{aligned} y = \frac{Y}{L} &= \frac{\left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} (K_G^\varepsilon)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} (A_C^\gamma A_G L_Y)^{1-\alpha}}{(L^\varepsilon)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} L^{1-\alpha}} = \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} \left( \frac{K_G^\varepsilon}{L^\varepsilon} \right)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} A_C^{\gamma(1-\alpha)} A_G^{1-\alpha} \left( \frac{L_Y}{L} \right)^{1-\alpha} \\ &= \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)^{\frac{\alpha}{\varepsilon}} k_G^\alpha A_C^{\gamma(1-\alpha)} A_G^{1-\alpha} \left( \frac{L_Y}{L} \right)^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (\text{B3})$$



Tillväxttakt i BNP per capita i jämvikt:

$$\ln y = \frac{\alpha}{\varepsilon} \ln \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right) + \alpha \ln k_G + \gamma(1 - \alpha) \ln A_C + (1 - \alpha) \ln A_G + (1 - \alpha) \ln \left( \frac{L_Y}{L} \right) \quad (\text{B4})$$

$$\frac{\delta \ln y}{\delta t} = \frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{\delta \ln \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right)}{\delta t} + \alpha \frac{\delta \ln k_G}{\delta t} + \gamma(1 - \alpha) \frac{\delta \ln A_C}{\delta t} + (1 - \alpha) \frac{\delta \ln A_G}{\delta t} + (1 - \alpha) \frac{\delta \ln \left( \frac{L_Y}{L} \right)}{\delta t} \quad (\text{B5})$$

$$g_y = \frac{\alpha}{\varepsilon} g \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right) + \alpha g_{k_G} + \gamma(1 - \alpha) g_{A_C} + (1 - \alpha) g_{A_G} + (1 - \alpha) g_{\frac{L_Y}{L}} \quad (\text{B6})$$

$$\Rightarrow g_y = \alpha g_y + \gamma(1 - \alpha) g_{A_C} + (1 - \alpha) g_{A_G} \quad (\text{B7})$$

$$\Rightarrow g_y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} \quad (\text{B8})$$

*Förklaring till (B7)*

Följande gäller i jämvikt:

$$1. \quad g_{K_C} < g_{K_G} \quad (\text{B9})$$

Av (B9) följer att kvoten  $\left( \frac{K_C}{K_G} \right)^\varepsilon$  kommer gå mot noll i jämvikt. I jämvikt blir därför

$$g \left( (1 + \beta) \frac{K_C^\varepsilon}{K_G^\varepsilon} + 1 \right) = 0. \quad (\text{B9.1})$$

(B9) är det enda rimliga alternativet i jämvikt. Varken  $g_{K_C} > g_{K_G}$  eller  $g_{K_C} = g_{K_G}$  kan gälla i jämvikt.

Om  $g_{K_C} > g_{K_G}$  i jämvikt blir kvoten  $\left( \frac{K_C}{K_G} \right)^\varepsilon$  oändligt stor. I vår modell är detta alternativ inte möjligt eftersom det skulle innebära en orimligt stor klimatförändring och (B27) kan i så fall inte gälla.

$$\text{Om } g_{K_C} = g_{K_G} \quad (\text{B9.2})$$

$$\Rightarrow \frac{K_C}{K_C} = \frac{K_G}{K_G} \quad (\text{B9.3})$$

Sätt in (A3) och (A4) i (B9.3)

$$\Rightarrow S_{K_C} \frac{Y}{K_C} - \delta_K - (\mu + \psi)E^\Omega = S_{K_G} \frac{Y}{K_G} - \delta_K K_G \quad (\text{B9.4})$$

$$\Rightarrow \left[ \frac{S_{K_C} \left( \frac{Y}{K_C} \right) - S_{K_G} \left( \frac{Y}{K_G} \right)}{\mu + \psi} \right]^{\frac{1}{\Omega}} = E \quad (\text{B9.5})$$

För att E ska vara konstant i jämvikt visar (B9.5) att:

$$g_{K_C} = g_{K_G} = g_Y \quad (\text{B9.6})$$

Av (B9.6) och (B8) följer att:

$$g_{K_C} = g_{K_G} = g_Y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n \quad (\text{B9.7})$$

Men  $g_{K_C} = g_{A_G}$  (se B29)

(B9.7) och (B29) kan inte gälla samtidigt eftersom det är orimligt att  $n = 0$  i jämvikt.

Följaktligen kan (B9.2) inte gälla i jämvikt.

$$2. \quad g_{k_G} = g_y \quad (\text{B10})$$

$$g_{K_G} = \frac{\dot{K}_G}{K_G} = \frac{S_{K_G} Y - \delta_K K_G}{K_G} = S_{K_G} \frac{Y}{K_G} - \delta_K$$

För att  $g_{K_G}$  ska vara konstant i jämvikt måste:

$$- \quad g_Y = g_{K_G} \Rightarrow \frac{Y}{K_G} = \frac{\frac{Y}{L}}{\frac{K_G}{L}} \Rightarrow g_Y = g_{k_G}$$

-  $S_{K_G}$  vara konstant i jämvikt.

(B35) visar att  $S_{K_C}$  kommer sjunka i en konstant jämviktstakt. När ekonomin har stabiliserat sig i en jämvikt kommer  $S_{K_C}$  därför till slut vara så liten att  $S_{K_G}$  utgör hela sparkvoten (se A5) och  $S_{K_G}$  blir därmed konstant.

$$3. \quad g_{\frac{L_Y}{L}} = 0 \quad (\text{B11})$$

$$g_{L_Y} = g_L = n \text{ i jämvikt}$$

I jämvikt kommer kvoten  $\frac{L_Y}{L}$  vara konstant och således är  $g_{\frac{L_Y}{L}} = 0$  i jämvikt. Detta

följer av att L och  $L_Y$  måste växa lika snabbt i jämvikt. Om  $L_Y$  skulle växa snabbare

än  $L$  i jämvikt, skulle antalet individer som arbetar i produktionssektorn till slut vara fler än de som finns i den totala arbetskraften, vilket inte är möjligt. Om  $L$  istället skulle växa snabbare än  $L_Y$  i jämvikt skulle andelen individer som arbetar i produktionssektorn att gå mot noll, vilket inte är rimligt.

Av (B8) och (B10) följer att:

$$g_y = g_{K_G} = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} \quad (\text{B12})$$

*Härledning av (12)*

I jämvikt:

$$g_{A_C} = \frac{\dot{A}_C}{A_C} = \frac{\theta A_C^\phi L_C^\lambda E^{-\tau}}{A_C} = \theta A_C^{\phi-1} L_C^\lambda E^{-\tau} \quad (\text{B13})$$

Tillväxttakten i  $g_{A_C}$  i jämvikt:

$$\ln g_{A_C} = \ln \theta + (\phi - 1) \ln A_C + \lambda \ln L_C - \tau \ln E \quad (\text{B14})$$

$$\frac{\delta \ln g_{A_C}}{\delta t} = \frac{\delta \ln \theta}{\delta t} + (\phi - 1) \frac{\delta \ln A_C}{\delta t} + \lambda \frac{\delta \ln L_C}{\delta t} - \tau \frac{\delta \ln E}{\delta t} \quad (\text{B15})$$

$$\frac{g_{\dot{A}_C}}{g_{A_C}} = g_\theta + (\phi - 1)g_{A_C} + \lambda g_{L_C} - \tau g_E \quad (\text{B16})$$

$$0 = (\phi - 1)g_{A_C} + \lambda n \quad (\text{B17})$$

$$g_{A_C} = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} \quad (\text{B18})$$

*Förklaring till (B17):*

Följande gäller i jämvikt:

1.  $g_{A_C}$  är konstant  $\Rightarrow \frac{g_{\dot{A}_C}}{g_{A_C}} = 0$  i jämvikt
2.  $g_\theta = 0$  (eftersom  $\theta$  är en konstant)
3.  $g_E = 0$  i jämvikt (antagande)
4.  $g_{L_C} = g_L = n$  i jämvikt

I jämvikt kommer  $L_C$  växa i samma takt som  $L$  i jämvikt. Om  $L_C$  skulle växa snabbare än  $L$  i jämvikt, skulle antalet individer som arbetar i den koldioxidintensiva forskningssektorn till slut vara fler än de som finns i den totala arbetskraften. I så fall blir kvoten  $\frac{L_C}{L}$  oändligt stor, vilket inte är möjligt. Om  $L$  istället skulle växa snabbare än  $L_C$  i jämvikt skulle andelen individer som arbetar i den koldioxidintensiva forskningssektorn att gå mot noll, vilket inte är rimligt. I så fall går kvoten  $\frac{L_C}{L}$  mot noll, vilket inte är rimligt.

*Härledning av (13)*

I jämvikt:

$$g_{A_G} = \frac{\dot{A}_G}{A_G} = \frac{\theta A_G^\phi L_G^\lambda}{A_G} = \theta A_G^{\phi-1} L_G^\lambda \quad (\text{B19})$$

Tillväxttakten i  $g_{A_G}$  i jämvikt:

$$\ln g_{A_G} = \ln \theta + (\phi - 1) \ln A_G + \lambda \ln L_G \quad (\text{B20})$$

$$\frac{\delta \ln g_{A_G}}{\delta t} = \frac{\delta \ln \theta}{\delta t} + (\phi - 1) \frac{\delta \ln A_G}{\delta t} + \lambda \frac{\delta \ln L_G}{\delta t} \quad (\text{B21})$$

$$\frac{g_{\dot{A}_G}}{g_{A_G}} = g_\theta + (\phi - 1)g_{A_G} + \lambda g_{L_G} \quad (\text{B22})$$

$$0 = (\phi - 1)g_{A_G} + \lambda n \quad (\text{B23})$$

$$g_{A_G} = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} \quad (\text{B24})$$

*Förklaring till (B23):*

Följande gäller i jämvikt:

1.  $g_{A_G}$  är konstant  $\Rightarrow \frac{g_{\dot{A}_G}}{g_{A_G}} = 0$  i jämvikt
2.  $g_\theta = 0$  (eftersom  $\theta$  är en konstant)
3.  $g_{L_G} = g_L = n$  i jämvikt

I jämvikt kommer  $L_G$  växa i samma takt som  $L$  i jämvikt. Om  $L_G$  skulle växa snabbare än  $L$  i jämvikt, skulle antalet individer som arbetar i den gröna forskningssektorn till

slut vara fler än de som finns i den totala arbetskraften. I så fall blir kvoten  $\frac{L_G}{L}$  oändligt stor, vilket inte är möjligt. Om  $L$  istället skulle växa snabbare än  $L_G$  i jämvikt skulle andelen individer som arbetar i den gröna forskningssektorn att gå mot noll, vilket inte är rimligt. I så fall går kvoten  $\frac{L_G}{L}$  mot noll, vilket inte är rimligt.

*Härledning av (14)*

Sätt in (B18) och (B24) i (B8)

$$g_y = \gamma \frac{\lambda n}{(1-\phi)} + \frac{\lambda n}{(1-\phi)} = \frac{\lambda n}{(1-\phi)} (1 + \gamma) \quad (\text{B25})$$

### C. En miljömässigt hållbar ekonomi

*Härledning av (15)*

I jämvikt är  $g_{K_C}$  konstant

$$g_{K_C} = \frac{\dot{K}_C}{K_C} = S_{K_C} \frac{Y}{K_C} - \delta_K - (\mu + \psi) E^\Omega \quad (\text{B26})$$

För att  $g_{K_C}$  ska vara konstant i jämvikt måste  $E$  vara konstant i jämvikt. Eftersom  $E$  ökar exponentiellt ( $\Omega > 1$ ) är det enda alternativet för att  $g_{K_C}$  ska vara konstant i jämvikt att:

$$g_E = 0 \quad (\text{B27})$$

*Härledning av (16)*

I jämvikt:

$$\dot{E} = 0 \quad (\text{B28})$$

$$\dot{E} = \frac{\sigma K_C}{A_G} - \delta_E E \implies \frac{K_C}{A_G E} = \frac{\delta_E}{\sigma} \quad (\text{B29})$$

Av (B29) följer att i jämvikt:

$$g_{K_C} = g_{A_G} \quad (\text{B30})$$

Av (B9), (B12) och (B30) följer att:

$$\Rightarrow g_{A_G} = g_{K_C} < g_{K_G} = g_Y = \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n \quad (\text{B31})$$

*Härledning av (17)*

(B26) visar att om  $g_{K_C}$  ska vara konstant i jämvikt måste (B27) gälla och:

$$g_{K_C} = g_{S_{K_C}} + g_Y \quad (\text{B32})$$

$$g_{S_{K_C}} = g_{K_C} - g_Y \quad (\text{B33})$$

Sätt in (B30) i (B33)

$$g_{S_{K_C}} = g_{A_G} - g_Y - n \quad (\text{B34})$$

Sätt in (B24) och (B25) i (B34)

$$g_{S_{K_C}} = g_{A_G} - (1 - \gamma)g_{A_G} - n \quad (\text{B35})$$

$$g_{S_{K_C}} = -\gamma g_{A_G} - n \quad (\text{B36})$$

## D. BNP per capita i jämvikt

*Härledning av (18)*

Två hjälpvariabler ( $\tilde{y}$  och  $\tilde{k}$ ) som är konstanta i jämvikt definieras:

$$\tilde{y} = \frac{Y}{A_C^\gamma A_G L} \quad (\text{D1})$$

$$\tilde{k} = \frac{K}{A_C^\gamma A_G L} \quad (\text{D2})$$

Sätt in (A1) i (D1)

$$\tilde{y} = \frac{Y}{A_C^\gamma A_G L} = \frac{K^\alpha (A_C^\gamma A_G L Y)^{1-\alpha}}{(A_C^\gamma A_G L)^\alpha (A_C^\gamma A_G L)^{1-\alpha}} = \left( \frac{K}{A_C^\gamma A_G L} \right)^\alpha \left( \frac{LY}{L} \right)^{1-\alpha} \quad (\text{D3})$$

Sätt in (D2) i (D3)

$$\tilde{y} = \tilde{k}^\alpha \left(\frac{LY}{L}\right)^{1-\alpha} \quad (\text{D4})$$

Förändring av  $\tilde{k}$  i jämvikt:

Skapa ett uttryck för  $\dot{\tilde{k}}$ .

$$\dot{\tilde{k}} = \left(\frac{\dot{K}}{A_C^\gamma A_G L}\right) = \frac{K}{A_C^\gamma A_G L} \left(\frac{\dot{K}}{K} - \gamma \frac{\dot{A}_C}{A_C} - \frac{\dot{A}_G}{A_G} - \frac{\dot{L}}{L}\right) = \frac{K}{A_C^\gamma A_G L} \left(\frac{\dot{K}}{K} - \gamma g_{A_C} - g_{A_G} - n\right) \quad (\text{D5})$$

Skapa ett uttryck för  $\dot{K}$  i jämvikt som sedan sätts in i (D5):

Skriv om (B1)

$$K = K_G \left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C}{K_G}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (\text{D6})$$

$\dot{K}$  i jämvikt:

Av (B9) följer att  $\frac{K_C}{K_G}$  går mot 0 i jämvikt och  $\left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C}{K_G}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}$  blir konstant.

Derivera (D6):

$$\dot{K} = \frac{\delta K(t)}{\delta t} = \frac{\delta \left[ K_G(t) \left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C(t)}{K_G(t)}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \right]}{\delta t} \quad (\text{D7})$$

$$\Rightarrow \dot{K} = \dot{K}_G \left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C(t)}{K_G(t)}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} + (K_G \times 0) \quad (\text{D8})$$

$$\Rightarrow \dot{K} = \dot{K}_G \left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C(t)}{K_G(t)}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (\text{D9})$$

Eftersom  $\left( (1 + \beta) \left(\frac{K_C(t)}{K_G(t)}\right)^\varepsilon + 1 \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}$  är konstant och antar ett värde nära ett i jämvikt kommer  $\dot{K}$

drivas av  $\dot{K}_G$  och  $\dot{K} = \dot{K}_G$  i jämvikt. Av (B9) följer även att  $\frac{K_C}{Y}$  går mot noll och till slut

kommer i princip hela K utgöras av  $K_G$  så att  $K = K_G$ :

$$\dot{K} = \dot{K}_G \quad (\text{D10})$$

$$K = K_G \quad (\text{D11})$$

Sätt in (D10) och (D11) i (D5):

$$\dot{\tilde{k}} = \frac{K_G}{A_C^\gamma A_G L} \left( \frac{\dot{K}_G}{K_G} - \gamma g_{A_C} - g_{A_G} - n \right) \quad (\text{D12})$$

Sätt in (A4) i (D12):

$$\dot{\tilde{k}} = \frac{K_G}{A_C^\gamma A_G L} \left( \frac{s_{K_G} Y - \delta_K K_G}{K_G} - \gamma g_{A_C} - g_{A_G} - n \right) \quad (\text{D13})$$

$$\Rightarrow \dot{\tilde{k}} = s_{K_G} \left( \frac{Y}{A_C^\gamma A_G L} \right) - \left[ (\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n) \left( \frac{K_G}{A_C^\gamma A_G L} \right) \right] \quad (\text{D14})$$

Sätt in (D1) och (D2) i (D14):

$$\dot{\tilde{k}} = s_{K_G} \tilde{y} - (\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n) \tilde{k} \quad (\text{D15})$$

Sätt in (D4) i (D15):

$$\dot{\tilde{k}} = s_{K_G} \tilde{k}^\alpha \left( \frac{L_Y}{L} \right)^{1-\alpha} - (\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n) \tilde{k} \quad (\text{D16})$$

I jämvikt är  $\tilde{k}$  konstant och  $\dot{\tilde{k}} = 0$ :

$$0 = s_{K_G} \tilde{k}^\alpha \left( \frac{L_Y}{L} \right)^{1-\alpha} - (\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n) \tilde{k} \quad (\text{D17})$$

$$\Rightarrow \tilde{k} = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \left( \frac{L_Y}{L} \right) \quad (\text{D18})$$

Sätt in (D18) i (D4):

$$\tilde{y} = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left( \frac{L_Y}{L} \right)^\alpha \left( \frac{L_Y}{L} \right)^{1-\alpha} = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left( \frac{L_Y}{L} \right) \quad (\text{D19})$$

Av (D1) följer att:

$$y = \tilde{y} A_C^\gamma A_G \quad (\text{D20})$$



Sätt in (D19) i (D20)

$$y^* = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left( \frac{L_Y}{L} \right) A_C^\gamma A_G \quad (\text{D21})$$

*Härledning av (19)*

Av (B13) följer att:

$$A_C = \left( \frac{\theta L_C^\lambda E^{-\tau}}{g_{A_C}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (\text{D22})$$

*Härledning av (20)*

Av (B19) följer att:

$$A_G = \left( \frac{\theta L_G^\lambda}{g_{A_G}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (\text{D23})$$

*Härledning av (21)*

Sätt in (D22) och (D23) i (D21):

$$y^* = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{L_Y}{L} \left( \frac{\theta L_C^\lambda E^{-\tau}}{g_{A_C}} \right)^{\frac{\gamma}{1-\phi}} \left( \frac{\theta L_G^\lambda}{g_{A_G}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (\text{D24})$$

$$\Rightarrow y^* = \left( \frac{s_{K_G}}{\delta_K + \gamma g_{A_C} + g_{A_G} + n} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{L_Y}{L} \left( \frac{\theta E^{-\tau}}{g_{A_C}} \right)^{\frac{\gamma}{1-\phi}} \left( \frac{\theta}{g_{A_G}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} (L_C^\gamma L_G)^{\frac{\lambda}{1-\phi}} \quad (\text{D25})$$