



Faktorer som bör vägas in vid investering av solceller

Miljöanalys av de vanligaste solcellerna på marknaden

Factors that should be considered when investing in solar cells
An environmental analysis of the most common solar cells on the Swedish market

Lovisa Olsson

Fakulteten för hälsa, natur -och teknikvetenskap

Civilingenjör, energi -och miljösystem

Omfattning: 30 HP

Handledare: Venkatesh Govindarajan & Lars Nilsson

Examinator: Roger Renström

Datum: 2019-06-23

Intressent: Andreas Karlsson (BDAB) & Hanna Ljungstedt (LF)

Sammanfattning

Fyra solceller dominerar på den svenska marknaden idag och delas upp i två grupper; första generationen och andra generationen. Första generationen består av två stycken kisel-solceller som heter mono- och multikristallina solceller. Dessa solceller var som namnet indikerar först på marknaden och erhåller idag högst verkningsgrad. På grund av höga tillverkningskostnader utvecklades andra generationen som är tunnfilmssolceller, de två vanligaste solcellerna i den generationen är CdTe och CIGS, dessa står för cirka 20 procent av solcellsmarknaden idag medans första generationen står för de resterande 80 procenten. Att gå mot en hållbar framtid blir allt viktigare och det är tydligt att både företag, städer och länder är på tårna för att möta utmaningarna. Solcellstekniken har fått ett högt förtroende att inbringa en hållbar elproduktion. Investerare i Sverige upplever avsaknad av ett värderingskoncept ur ett miljöperspektiv mellan solcellerna på den svenska marknaden. Studien har granskat hur de fyra olika solcellerna påverkar olika miljökategori och vilka ämnen i solcellerna som är de mest kritiska. Genom att simulera elproduktionen för ett år med Göteborgs solinstrålning erhöles den mängd el som kan användas eller skickas ut på nätet. Där kisel-solcellerna som har högst verkningsgrad också erhöles mest el per kvadratmeter-solcell. Efter att ha tagit fram elproduktionen och elanvändningen beräknades energiåterbetalningstiden. Genom LCA togs 11 olika miljökategori fram för att analysera olika områden som blir påverkade utav solcells tillverkningen. *Akvatisk ekototoxicitet av marin miljö* var det miljökategori som blev mest påverkad av tillverkningen för alla fyra solcellstyper. Från miljökategori *Global uppvärmning* tog mängden koldioxidekvivalenter fram och från det togs en återbetalningstid fram för koldioxidekvivalenter. Solceller har generella drag tre olika faser; tillverkning, användning och avfall. Användningsfasen anses vara nästintill utsläppsfri, avfallsfasen är relativt ny för solcellsteknikerna. Det beror på att inga stora avfallsströmmar har kommit än då de första stora investeringarna skedde först på nittiotalet. Solcellerna behöver olika tekniker beroende på typ. Strategierna bör vara olika då olika delar ska återvinnas och återanvändas så långt det går. På grund av att det finns oetablerade avfallshantering har inte denna fas studerats utan enbart tillverkningsfasen.

En kvadratmeter-solcell analyserades. För solcellsproduktion i Europa betalar multikristallina solcellspanelen tillbaka koldioxidekvivalenterna efter 11,5 år medans monokristallina solcellspanelen betalar igen efter 14,3 år, det vill säga efter ungefär halva livslängden. CdTe betalade igen koldioxidekvivalenterna snabbast, efter 2,2 år, och CIGS efter 3,6 år. Det innebär att tunnfilmssolcellerna hinner snabbast att få minusutsläpp. Det är inte motiverat, efter att enbart studerat solcellsproduktionen, att investera i solceller tillverkade i Kina med användning i Göteborg. När återbetalningstiden för koldioxidekvivalenter har beräknats har en nordisk elmix beräknas med, beroende på vilken elmix som väljs ger det antingen motiv att inte investera eller att investera i solceller. Det är således viktigt att vara tydlig för vilken användning solcellerna kommer att ha och vilken el som faktiskt ersätts innan investerare avgör om solceller är rätt energikälla att investera i.

Abstract

Four solar cells dominate the Swedish market today and are divided into two groups; first generation and second generation. The first generation involves of two silicone solar cells called mono-and multicrystalline solar cells. These solar cells were, as the name indicates, first on the market and today receive the highest efficiency. Due to high manufacturing costs, the second generation was developed which became thin film solar cells. The two most common solar cells in that generation are CdTe and CIGS, which account for about 20 percent of the solar cell market today while the first-generation accounts for the remaining 80 percent. Going towards a sustainable future it's important and clear that both companies, cities and countries are ready meet the challenges. The solar cell technology has gained high confidence to bring in sustainable electricity production. Investors in Sweden experience the lack of a valuation concept from an environmental perspective between the solar cells on the Swedish market. The study has examined how the four different solar cells affect different environmental categories and which materials in the solar cells that are the most critical. By simulating the electricity production for a year with Gothenburg's solar radiation, the amount of electricity that could be used or sent to the grid was obtained. Where the silicon solar cells that have the highest efficiency also received the most electricity per square meter of solar cell. After producing electricity production and electricity consumption, the energy repayment period was calculated. Through LCA, 11 different environmental categories were developed to analyze different areas that are affected by solar cell production. Aquatic ecotoxicity of the marine environment was the environmental category that was most affected by the production for all four solar cell types. From the environmental category Global Warming, the amount of carbon dioxide equivalents was studied and then a payback time was calculated. Solar cells generally have three different phases; manufacture, operating and waste. The use phase is considered to be almost emission-free, the waste phase is relatively new for solar cell technologies. This is because no large waste streams have come than when the first major investments took place only in the nineties. The solar cells need different techniques depending on the type. The strategies should be different as different parts should be recycled and reused as far as possible. Due to the fact that there is unstable waste management, this phase has not been studied but only the manufacturing phase.

A square metered solar cell was analyzed. For photovoltaic production in Europe, multicrystalline solar cell panels pay back the carbon dioxide equivalents after 11.5 years, while monocrystalline solar cell panels pay again after 14.3 years, ie after about half the life. CdTe paid the carbon dioxide equivalents fastest, after 2.2 years, and CIGS after 3.6 years. This means that the thin-film solar cells have the fastest time to get minus emissions. It is not justified to invest in solar cells manufactured in China when operating in Gothenburg, only after studying solar cell production. When the repayment period for carbon dioxide equivalents has been calculated, a Nordic electricity mix has been calculated with, depending on which electricity mix is chosen, it either gives reasons to not invest or to invest in solar cells. It is therefore important to be clear about what use the solar cells will have and which electricity is actually replaced before investors decide whether solar cells are the right energy source to invest in.

Förord

Det här examensarbetet uppkom från ett samarbete mellan Lokalförvaltningen, Göteborg och Bengt Dahlgren AB i Göteborg. De båda parterna arbetar tillsammans i ett innovationsprojekt, Hoppet, som ska bli Sveriges första fossilfria byggnad. Byggnaden som ska byggas är ska bli en förskola och är tänkt att inbringa smarta lösningar för ett hållbart byggande. Solcellernas del i projektet blev mer ett parallellt steg och är inte i första hand tänkt till Hoppet (då förskolans geografiska läge inte är gynnsamt) utan till framtida nybyggnationer som har lönsamma geografiska lägen.

Studien omfattar en masteruppsats omfattande 30 HP och kursen är den avslutande delen på civilingenjörsprogrammet Energi -och miljöteknik med masterinriktning energi -och miljösystem på Karlstads Universitet. Under arbetets gång har två handledare från universitetet avlöst varandra, Venkatesh Govindarajan den första och längst delen och Lars Nilsson som under sista månaden av projektiden kastades in. Tack så mycket för Er hjälp med akademiskt stöd under mitt sista arbete.

Jag vill också rikta ett stort tack till min intressent på Bengt Dahlgren, Andreas Karlsson, som utan egentliga förkunskaper inom studiens område alltid varit tillgänglig och stöttat längs hela perioden. Christian Ek och Hanna Ljungstedt på Lokalförvaltningen ska också ha ett tack för att alltid hjälpa till att få svar på mina frågor och den stöttning som jag önskat.

Innehållsförteckning

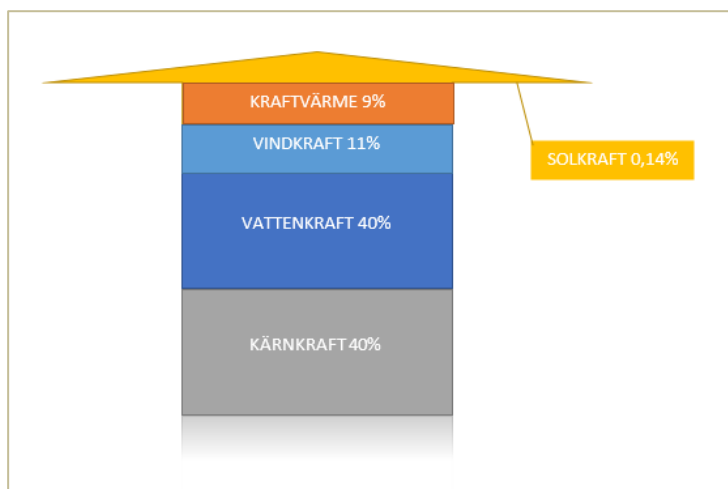
1. INLEDNING	1
1.1. BAKGRUND	1
1.2. SYFTE OCH MÅL	1
1.3. AVGRÄNSNINGAR.....	2
2. METOD	3
2.1. ENERGIÅTERBETALNINGSTIDEN (EPBT).....	3
2.2. KOLDIOXIDÅTERBETALNINGSTIDEN (CPBT)	3
3. TEKNISK BESKRIVNING	5
3.1. TILLVERKNING AV SOLCELLER.....	5
3.2. BALANCE OF SYSTEMS (BOS).....	8
3.3. AVFALLSHANTERING	8
3.4. TRANSPORT	9
3.5. KÄNSLIGHET FÖR ELPRODUKTION.....	9
3.6. KLIMATPÅVERKAN.....	10
4. INDATA	12
4.1. ELPRODUKTION	12
4.2. ELANVÄNDNING.....	12
4.3. SPARADE KOLDIOXIDEKVIVALENTER.....	13
4.4. LIVSCYKELANALYS.....	13
5. RESULTAT	16
5.1. ELPRODUKTION MED MONTERING I GÖTEBORG	16
5.2. ENERGIÅTERBETALNINGSTID	17
5.3. KLIMATPÅVERKAN FRÅN LIVSCYKELANALYS.....	17
5.4. KOLDIOXIDEKVIVALENTER FRÅN TILLVERKNINGEN	26
5.5. KOLDIOXIDÅTERBETALNINGSTID.....	26
5.6. KÄNSLIGHETSANALYS	26
6. DISKUSSION	30
6.1. KÄNSLIGHETSANALYS OCH DATAHANTERING.....	31
6.2. CPBT	32
7. SLUTSATS	33
8. BILAGA	34
8.1. LCA-RESULTAT	34
DE TRE FÖRSTA PROCESSTEGEN SOM ÄR LIKA FÖR KISELSOLCELLERNA	34
MONOKRISTALLIN	40
MULTIKRISTALLIN.....	50
8.2. ELANVÄNDNINGEN FÖR KISELSOLCELLERNA	60
8.3. INVENTERINGSLISTOR	61
9. REFERENSER	72

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Det här examensarbetet uppkom i ett samarbete mellan Bengt Dahlgren AB och Lokalförvaltningen i Göteborgs Stad. Göteborgs Stad har satt upp mål att bli en klimatneutral stad med en hållbar utsläppsnivå av växthusgaser, där de ska minska sina konsumtionsbaserade utsläpp fram till år 2050. Ett sätt att nå dit är att skapa intresse och förståelse kring behovet av förändring mot fossilfria material och metoder. (Göteborg u.å.) Till år 2030 är ett strategimål uppsatt att deras fjärrvärmesystem enbart ska bestå utav förnyelsebara energikällor samt att minst producera 500 GWh förnybar el. Elproduktion med solceller är beslutad att vara en väg för att nå dessa mål både storskaligt och småskaligt. (Göteborg 2014) Göteborgs Stad har initierat ett innovationsprojekt, Hoppet, som ska bli Sveriges första fossilfria byggprojekt. Initiativet ska skapa förutsättningar för fossilfria byggnationer. Projektet ska inbringa innovativa lösningar och kunskap för att uppnå Göteborgs Stads ambitiösa mål om att bli en klimatneutral stad. I projekten som Lokalförvaltningen nu initierar finns en önskan att kunna installera solceller. Det finns flera olika typer av solceller där dess tillverkningsmetod och innehåll av material varierar. Det är viktigt innan investering att granska val av solcell, om man som investerare vill sträva mot ett hållbart samhälle. Lokalförvaltningen har mål att öka sin satsning på just solceller. Därför är det av högst angeläget att välja rätt solcell för rätt ändamål för att klara av det ambitiösa målet om att få en klimatneutral stad. (Göteborg u.å.)

Den omfattande användningen av fossila råvaror ligger till grund för att vi idag globalt möts av stora utmaningar, att ändra vårt beteende gällande energikonsumtion och vårt sätt att producera elektricitet. Att producera el från så kallade förnybara energikällor har fått störst förtroende till att gå mot en mer hållbar elproduktion. (Zhang m.fl. 2018) Elproduktionssektorn har potential att reducera koldioxidutsläpp, och eliminera dem till 2050 (Tokimatsu m.fl. 2018). Enligt (Zhang m.fl. 2018) kommer utmaningarna också innebära möjligheter för att utveckla ett försvarbart energisystem som ska möta ett ökande energibehov långsiktigt med hjälp av förnybara energikällor. Idag står vattenkraft, kärnkraft och vindkraft för den största elproduktionen i Sverige vilket innebär att produktionsfasen är nästintill fossilfri. Om elproduktionen ska komma från enbart förnybara energikällor krävs det att kärnkraften, som klassas som fossilfri men inte förnybar, ska fasas ut och ersättas. (SCB 2018) Det som talar emot en 100 procent förnybar elproduktion är att de flesta energikällorna, exempelvis solenergi, är ett intermitterant energislag då genereringen av värme eller el produceras beroende på mängd solenergi som faller in. (Shivashankar m.fl 2016)

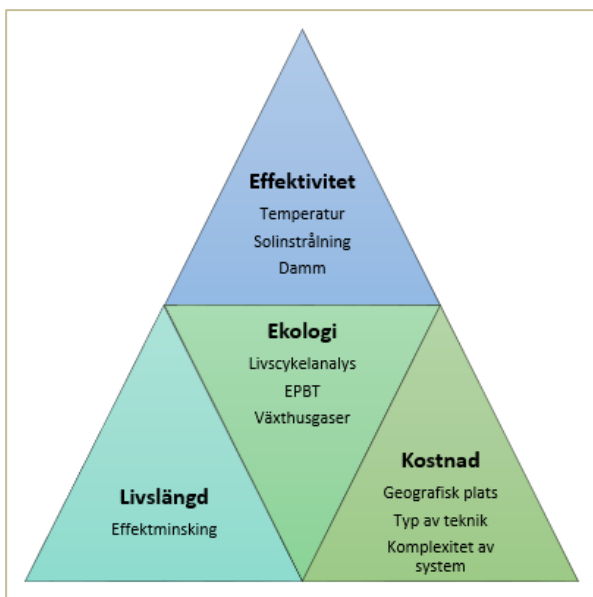


FIGUR 1 FÖRDELNINGEN AV ENERGIKÄLLORNA FÖR SVERIGES ELPRODUKTION 2017 DATA FRÅN (SCB 2018)

Flertalet länder runt om i världen är på väg mot en större andel förnybar elproduktion vilket har blivit möjligt genom exempelvis skatteinitiativ så som skattelättnader och ekonomisk kompensation för den el som man skickar ut till elnätet. Genom support från regeringen och kostnadsminskningar i produktionen har den installerade kapaciteten för solceller ökat kraftigt. (Zhou & Carbajales-Dale 2018) Det finns oräkneliga livscykelanalyser för de vanliga och mindre vanliga solceller på marknaden, där de flesta är med ursprung från Asien. Trots det upplever investerare att det saknas tydliga och rättvisa jämförelser mellan solceller som är producerade mer regionalt. Det finns olika alternativ för att få en lägre klimatpåverkan från elproduktionen. Det finns potential att bygga ut vattenkraften ytterligare om regeringen lättar på reglementet för skyddade älvar och vattendrag. Vindkraften har en

produktionskapacitet på cirka 15 TWh men har potential att öka 4–5 gånger till om de landbaserade vindkraftsprojekt som projekteras idag realiserats, samt dess potential att kunna vara havsbaserade. Om ny teknik ersätter konventionell teknik som finns i Sveriges kraftvärmeverk och om fler fjärrvärmenät byggs ut kan biokraften öka gånger tre. Tillgängligheten av solstrålning är flera gånger större än världens totala energibehov, solkraftens produktionskapacitet är 0,1 TWh. Om alla idag lämpliga tak beläggs med solcellspaneler och tillgängliga fält för solcellsparker kan produktionspotentialen öka till 50 TWh. (IVA 2016) Det finns alltså mycket potential för våra förnybara energikällor. Av alla tillgängliga förnybara tekniker menar (Zhang m.fl. 2018) att solenergin har högst förtroende att skapa ett hållbart energisystem långsiktigt globalt.

Det finns flera olika typer av solcellstekniker som är tillverkade med olika material och på olika sätt. Marknaden av solceller har dominerats av kiselceller men utvecklingen av andra solcellstekniker sker i hög framfart. Om kiselceller är den solcell som är lämpligast att investera i ur ett hållbart perspektiv råder det delade meningar om. Fyra olika delar är av intresse att studera vid investering av solcellspaneler; solcellens livslängd, dess effektivitet, investeringskostnad och den ekologiska aspekten, illustrerat i Figur 2. (Zhang m.fl. 2018)



FIGUR 2 FYRA ASPEKTER ATT ANALYSERA VID INVESTERING AV SOLCELLER, (SAMPAIO AND GONZ'ALEZ 2017)

Solcellsutvecklingen delas ofta upp i olika generationer; första, andra och tredje. Första generationen är kiselcellerna mono- och multikristallina solcellerna. Den andra generationen är tunnfilmssolcellerna och de vanligaste där är amorft kisel (a-Si), KadmiumTellurid (CdTe) och Koppar Indium Gallium Selen (CIGS). Tredje generationens solceller har ännu inte etablerat sig på marknaden än men de som är mest utvecklade är hybridceller (blandning av molekylär- och tunnfilmssolceller exempel perovskit solceller) och organiska. De kännetecknas av att vara mer effektiva och lönsammare än första och andra generationens. Kiselbaserade solceller dominerar runt 80 procent av marknaden idag och utav dem så är monokristallint kisel de mest dominerande. Andra generationens solceller, tunnfilmer, utgör av de övriga 20 procenten. (Zhang m.fl. 2018)

Förnybara energikällor är oftast mer metallintensiva än de energikällor som vi använder oss av idag. Det innebär att den omställning som vi går emot, att gå från fossilt till förnyelsebart, innebär mer brytning, framställning och återvinning av råvaror avsatta för denna teknik. De berörda industrierna kommer bli tvungna att utvecklas och anpassas för att möta behoven. (Tokimatsu m.fl. 2018) När förnyelsebara källor ersätter fossila sjunker halten av GHG (växthusgaser), NO_x (kväveoxiderna), SO₂ (Svaveldioxid) och CO (kolmonoxid) som orsakar hälsorelaterade problem och som har en negativ påverkan på klimatet. Solcellstekniken är ansedd som en av de renaste elproduktionsteknikerna under användningsfasen, dock producerar de föroreningar vid dess produktionsfas. (Ilias m.fl. 2018)

1.2. Syfte och mål

Syftet med studien är att förtydliga vilken miljöpåverkan solcellstillverkningen har och för att ge ett värderingsunderlag till investerare inför investering. Målet är att genom att studera livscykeln ta fram totala GWP (Global Warming Potential) samt att avgöra inom vilket miljöområde solcellstillverkningen påverkar mest. Målet

är också att ta reda på om investering i solceller i Göteborg är bättre utifrån ett miljöperspektiv än att köpa in el från elnätet.

1.3. Avgränsningar

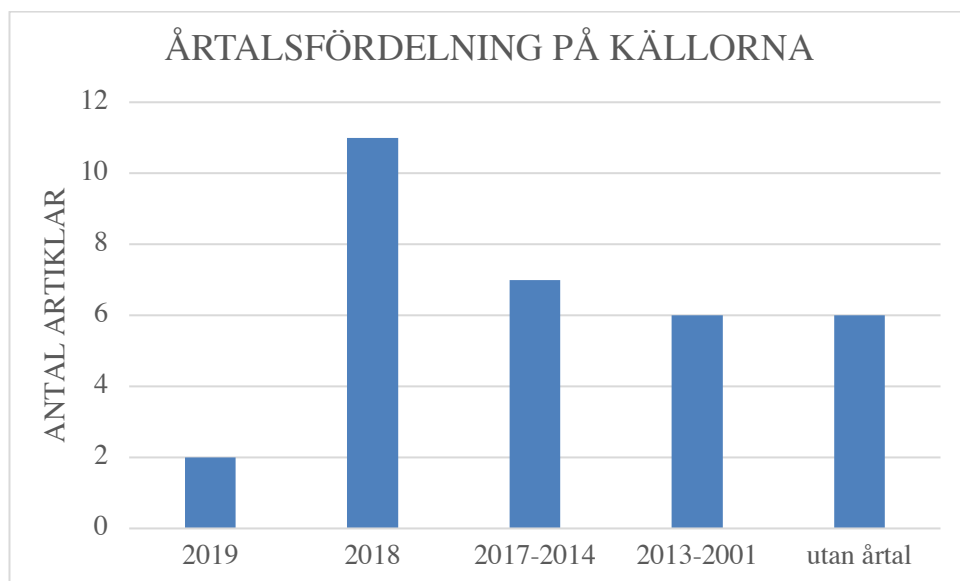
Vikten i arbetet ligger i att välja rätt solcell för att erhålla den som passar bäst in för att nå ett hållbart samhälle, lägst miljöpåverkan, därför är ekonomin och att välja den energieffektivaste solcellen inte i fokus. Miljöpåverkan i det här examensarbete är sett till 11 olika miljökategorierna där störst fokus är att studera koldioxidekvivalenter. I den här studien har det valts att studera första och andra generationens solceller då det är den dominerande tekniken på marknaden. Första generationens solceller är den solcellsteknik som Göteborgs Stad använder sig utav vid nuvarande investering av solceller. Andra generationens solceller har börjat etablera sig på marknaden där de två vanligaste solcellerna är CdTe samt CIGS. Fyra solcellstekniker kommer studeras, mono -och multikristallina solceller och CdTe samt CIGS.

Vid simulering av livscykelanalysen tas enbart tillverkningsprocesserna med, byggskedet eller rivningen är inte inkluderat inte heller avfallet som blir efter rivning. I simuleringen görs ett flertal förenklingar då tidsramen är begränsad. Det tas inte hänsyn till partiell skuggning. Enbart modulen av ett solcellssystem studeras. Det innebär att BOS (balance of systems) som inkluderar allting i ett solcellssystem som inte är själva modulen, exempelvis inverterare, kablar, växelriktare, inte tas med i beräkningarna.

I simuleringarna i SimaPro väljs den tillverkningsmetod som är (och har varit) mest förekommande i storskaliga produktioner. Ibland går de material som solcellerna innehåller inte att hämta från SimaPro databas, vid dessa tillfällen har materialet ersatts med liknande material. Exempel, i inventeringslistan användes *water, deionised, at plant* men i simuleringen användes dricksvatten, då det var det närmaste att ersätta.

2. Metod

För att få en nulägesrapport om vilka solcellstekniker som finns på den svenska marknaden, vilka tillverkningsprocesser som används och hur avfallet hanteras gjordes en systematisk litteraturstudie. En sammanställning av litteraturen har gjort utav 33 antal vetenskapliga artiklar mellan år 2019–2001, se illustrerat i Figur 3. Tidsspannet har medvetet valts på grund av att solcellstekniken är under pågående utveckling och det är nödvändigt att information är uppdaterad för att studien ska bli så korrekt som möjlig med uppdaterad vetenskap.



FIGUR 3 VISAR FÖRDELNINGEN FÖR PUBLICERINGSÅRTALEN PÅ DE ANVÄNDA ARTIKLARNAS I INLEDNINGEN

För att ta fram miljöpåverkan hos de vanligaste solcellstyperna och för att reda ut om en investering i solceller är rätt väg att gå för Göteborg valdes att beräkna en energiåterbetalningstid (EPBT) och koldioxidåterbetalningstid (CPBT) fram samt hur solcellerna påverkar olika miljöområden. EPBT tar inte hänsyn till all energi i tillverkningen utan enbart den mängd el som används och beräknas för att se hur snabbt den el som används i tillverkningen återbetalas då för att det är ofta en viktig parameter att ta hänsyn till då man vill åt en hållbar produktion. CPBT får med ett helhetsperspektiv på klimatpåverkan i form av koldioxidekvivalenter. Den tar både hänsyn till den el som använts i produktion (vilket land som elen produceras i), hur mycket el som produceras från solcellerna när de är i drift samt hur mycket koldioxidekvivalenter som produceras med det ingående materialet som används per kvadratmeter solcell. CPBT tas fram efter en livscykelanalys simulerats.

2.1. Energiåterbetalningstiden (EPBT)

För att beräkna och jämföra olika solceller är energiåterbetalningstiden vanligt att använda sig utav och beräknas i år. Den beskriver hur många år en solcell behöver producera el för att hämta hem den el som använts för att tillverka solcellen. För att ta reda på energiåterbetalningen för solcellerna analyserades hur mycket el har använts i tillverkningen. I Rhino simuleras hur effektivt de olika solcellerna kan omvandla solenergin till elektricitet och framförallt hur känslig elproduktionen är när solcellerna har olika montage. När den genererade elektriciteten är framtagen kan en energiåterbetalningstid tas fram i år.

$$EPBT = (\text{El som använts under tillverkning}) / (\text{Elproduktion under ett år})$$

2.2. Koldioxidåterbetalningstiden (CPBT)

För att beräkna koldioxidsåterbetalningstiden behövdes de koldioxidekvivalenter som släppts ut under tillverkningsfasen tas fram. Därefter delas den mängd med den mängd koldioxidekvivalenter som hade släppts ut vid elproduktion som köps in via elnätet när man inte hade producerat egen el via solceller enligt ekvation nedan;

$$CPBT = (\text{Mängd koldioxidekvivalenter som producerats vid tillverkning}) / (\text{total växthuseffekt} * \text{Elproduktion under ett år})$$

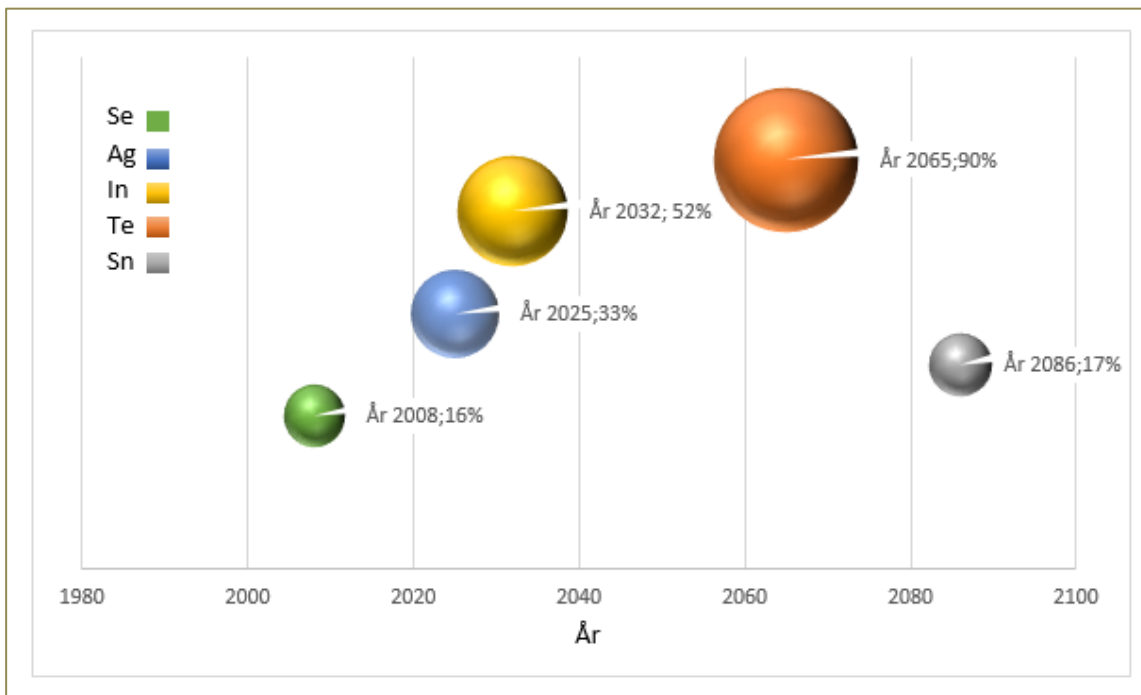
Sparade koldioxidekvivalenter

För att beräkna hur mycket koldioxidekvivalenter som "sparas" genom att producera sin egen el med hjälp av solceller istället för att köpa in el från elnätet används medel. Medel används istället för exempelvis marginalet, då beräkningen görs i linje med en bokföringsanalys.

3. Teknisk beskrivning

3.1. Tillverkning av solceller

Sverige har som mål att senast år 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, EU har satt ett liknade mål. För noll nettoutsläpp till år 2050 krävas en önskad ökning av installationer av soltekniker som motsvarar 2613 GW, för den här typen av upptrappning kommer en avsevärd mängd råmaterial krävas vilket för vissa ämnen kommer vara mer kritiskt än andra med avseende på dess tillgänglighet. I Figur 4 illustrerar kloten vilket år som de fem metallerna kommer nå sitt pik-år för utvinning samt hur stor del som går till PV teknologin om den förväntade ökningen av PV installationer etableras. Figuren påvisar att det redan finns ämnen som har nått gränsen. (Valero m.fl. 2018)



FIGUR 4 BESKRIVER VID VILKET ÅR SE, AG, IN, TE OCH SN KOMMER ATT NÅ SIN PIK I UTVINNING OCH HUR STOR ANDEL SOM FÅR TILL PV PRODUKTION. DATA FRÅN (VALERO M.FL. 2018)

Enligt Figur 4 har Selen redan nått sitt maximum, det gjordes redan år 2008. Närmast är silver och sju år efter att silver antas ha nått sin pik kommer också indium nå sin, dels på grund av solcellstillverkningen. Tellur antas nå sin pik år 2065 och det är nästan enbart på grund av PV tekniken. Dessvärre är det fler ämnen som har risk för utarmning vid den kumulativa efterfrågan på soltekniker än de fem ämnen som presenteras i samma figur. Kadmium, koppar, nickel, magnesium och indium är exempel på fler ämnen som är i farozonen. (Valero m.fl. 2018) De olika solteknikerna påverkar olika ämnen olika mycket. Antagandena och satta systemgränser kan vara väldigt avgörande på hur resultatet blir. I rapporten (Wetzel and Brochers 2014) sammanställs från olika LCA-studier GHG utsläpp i form av g CO₂-ekv. per kilowattimme. I den studien jämförs både första generationens solceller och andra generationens solceller där första har ett snittutsläpp på strax under 40 och andra generationens solceller har ett snitt på strax över 20.

1.2.1. Första generationen, kiselsolceller

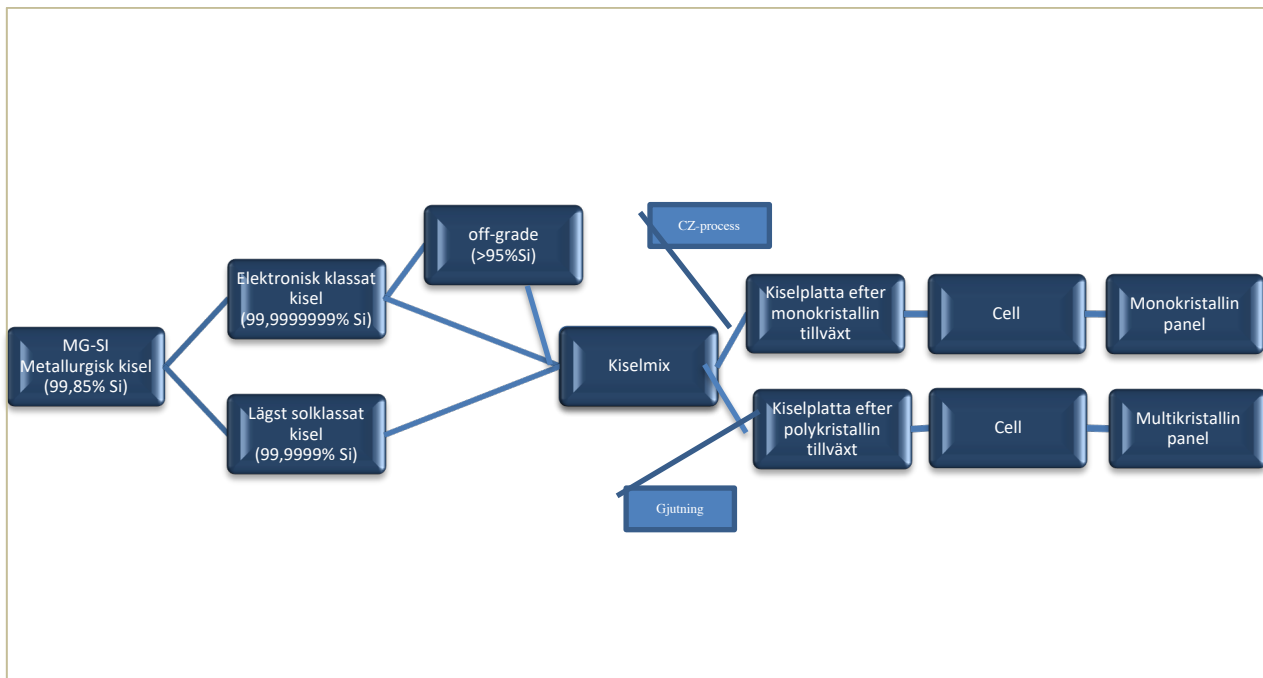
En solcellsmodul består utav flera celler som seriekopplas då varje enskild cell har för låg verkningsgrad för att praktiskt kunna användas till någon större produktion. Varje monokristallin cell består av en enda stor kristall (perfekt symmetri i en kristall) jämfört med multikristallina celler som består av många mindre kristaller (kristallerna har blivit brutna och har därför olika orientering, ojämnare ytskikt). (Solenergiutvetningen u.å)

När elektricitet ska erhållas från kisel är dess valenselektroner av störst intresse då de är avgörande för hur kiselatomerna placerar sig i fasta material. Kiselatomen har fyra stycken valenselektroner och binder sig i par med en närliggande atom, varje atom är bunden till fyra stycken atomer som i sin tur är bundna på samma sätt. Ström erhålls när elektronbindningarna och symmetrin bryts, det är därför väl motiverat att få till mer lösa bindningar i det

fasta materialet och fler hål. För att få lösa bindningar kan fosfor tillsättas då fosfor har fem stycken valenselektroner och då kallas det n-dopat, för att få fler hål i kristallstrukturen kan man tillsätta bor som bara har tre stycken valenselektroner. (Pellby och Larsson 2015) Efter att kiselnen har stelnat skärs tunna skikt ut (kiselplatta) och behandlas med kemikalier för att reducera reflektioner. I den här processen tillförs fosfors vid hög värme. (Pellby och Larsson 2015)

Mono -och multikristallina solceller som är den första generationens solceller har till största del likadan tillverkningsprocess se Figur 4. Kisel finns i jordskorpan och är världens näst vanligaste grundämne. Ämnet förekommer aldrig naturligt i ren form utan tillsammans i föreningar med andra ämnen, vanligen i form av kiseloxid. För att kunna använda sig av kiselnen framställs ämnet industriellt vanligast genom att kiseloxiden reagerar med kol. (Solenergibutiken u.å)

I Figur 5 illustreras de olika stegen i tillverkningsprocessen för de två kristallina solcellerna. Kvarssand renas först till 99,85 procent till metallurgisk kisel. Därefter måste den renas ytterligare för att kunna användas för att leda ström effektivt i solcellerna. Två reningsklasser erhålls; elektronisk klassat och lägst solklassat kisel. EG-Si är elektroniskt klassat kisel som har den högsta reningsgraden som både görs kemiska eller genom metallurgiska processer, denna klass erhåller en biprodukt som är mindre ren men också används för att hålla ner kostnader. Dessa två blandas i nästa steg upp med ett lägre klassat kisel, solklassat (SG-Si, modifierad simens). För att få en kiselplatta att skäras ner till en monokristallin cell krävs en monokristallintillväxt, den vanligaste metoden är genom Czochralski-processen (CZ-procesen), det är en relativt komplex process. Att skapa en polykristallin tillväxt är mindre komplicerat som handlar om att värma och kyla i en gjutform.



FIGUR 5 TILLVERKNINGSSTEGEN FÖR MONO -OCH MULTIKRISTALLINA SOLCELLER

Beroende på vilken tillverkningsteknik som används varierar också energianvändningen i produktionen. I (Wong et al, 2013) redovisades variationen för olika källor, i Tabell 1, visar energiåtgången för de olika processtegen för monokristallina solceller i ett medelvärde från (Wong et al, 2016) källor där medelvärdet för totala energiåtgången var 4525 MJ/m².

TABELL 1 ENERGIÅTGÅNGEN FÖR DE OLIKA TILLVERKNINGSPROCESSERNA FÖR EN MONOKRISTALLIN SOLCELL

MG-Si	kiselmix	CZ	Kiselplatta	Cell	Modul	Total [MJ/m ²]
14,28%	33,13%	64,13%	7,82%	10,56%	10,19%	4525

I Tabell 2 redovisas energianvändningen mellan olika tillverkningssteg för multikristallina solceller från (Wong et al, 2016).

TABELL 2 ENERGIÄTGÅNGEN FÖR DE OLIKA TILLVERKNINGSPROCESSERNA FÖR EN MULTIKRISTALLIN SOLCELL

kiselmix	kiselpatta	cell	modul	Total [MJ/m ²]
50,37%	21,57%	18,59%	11,67%	3830

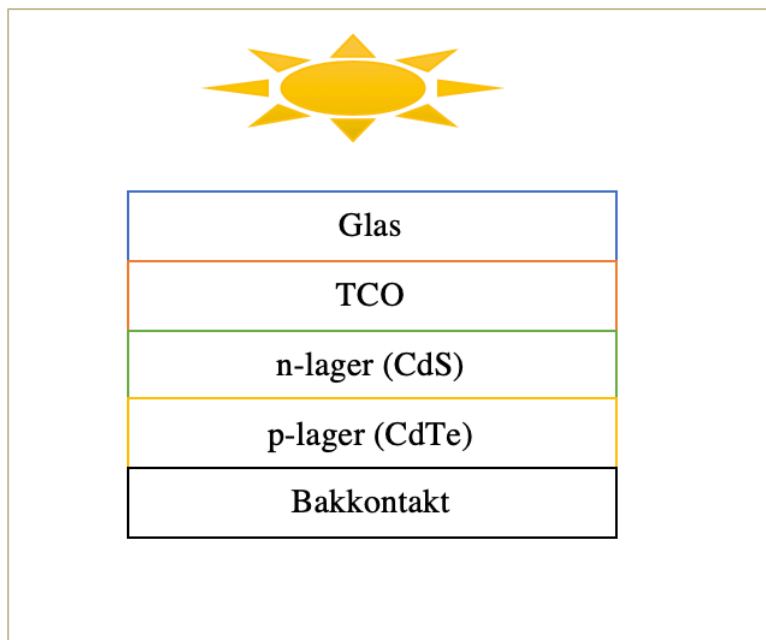
För varje år som gått har man sett att energiåterbetalningstiden har minskat, år 1975 var EPBT i snitt 15 år, 1995 var den runt 5 år och nu kan man se att de ligger runt 1 år. (Wetzel and Brochers 2014)

1.2.2. Andra generationen, tunnfilmssolceller

Den andra generationens solceller utvecklades med motivation av att den tidigare generationen hade hög produktionskostnad och ville då sänka denna. Gemensamt med tunnfilmssolcellerna är att halvledaren är tunnare (mindre material) än första generationens vilket ger lägre produktionskostnad och effektivitet. Solcellernas tillverkas så att halvledaren appliceras direkt på ett bärande material. (Pellby och Larsson 2015)

CdTe

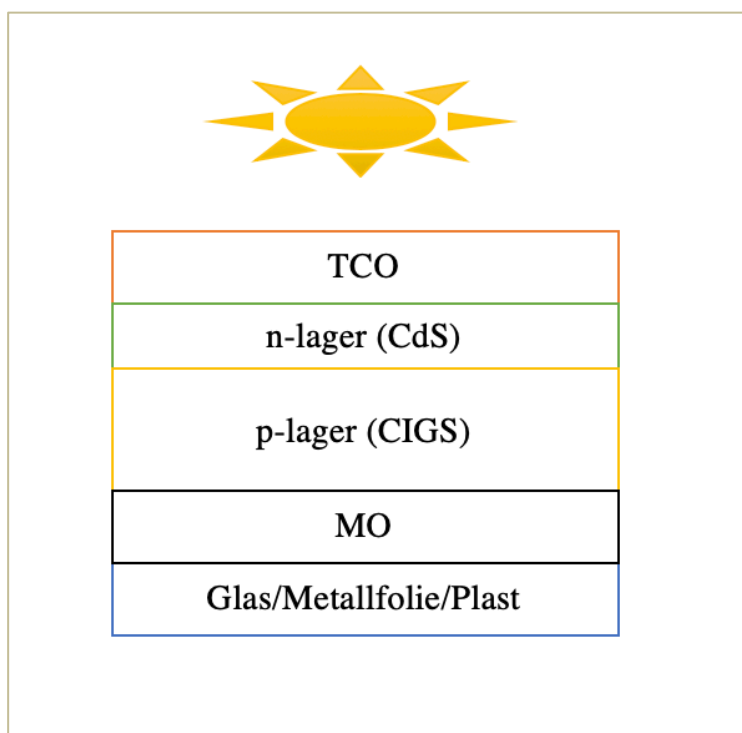
Kadmium är en biprodukt utav zink-, bly -och kopparproduktion och tellur är en biprodukt av kopparproduktionen. I tillverkningsprocessen appliceras filmerna i ångform på substratet, som kan vara en glasskiva se Figur 6. Genom att lägga på filmerna i ångform kan respektive ämne kondenseras på föregående lager och bilda en kristallform. TCO är kontaktlagret och läggs på först på det aktuella substratet därefter appliceras CdS som verkar som n-doping lager. CdTe är p-doping och läggs på innan bakkontakten. De olika skikten ritsas med hjälp av en laser förutom bakkontakten som beläggs med sputtering.



FIGUR 6 DE OLIKA LAGREN I EN CDTE-MODUL SOM APPLICERAS VID TILLVERKNINGSPROCESSEN (CDTE U.Å)

CIGS

Tillverkas med liknande steg som CdTe där ett substrat täcks med flera tunna filmer se Figur 7. CdS verkar också här som n-doping lager och CIGS som p-doping. CIGS har till en början lägre bandgap jämförelsevis med CdTe men kan genom att sänka halten indium och öka mängden gallium höja bandgapet och på så sätt få ett högre bandgap än CdTe. Vid korrigerig av bandgapet värms substratet upp i en 500 grader varm vakuumkammare.



FIGUR 7 DE OLIKA LAGREN I EN CIGS-MODUL SOM APPLICERAS VID TILLVERKNINGSPROCESSEN (CIGS U.Å)

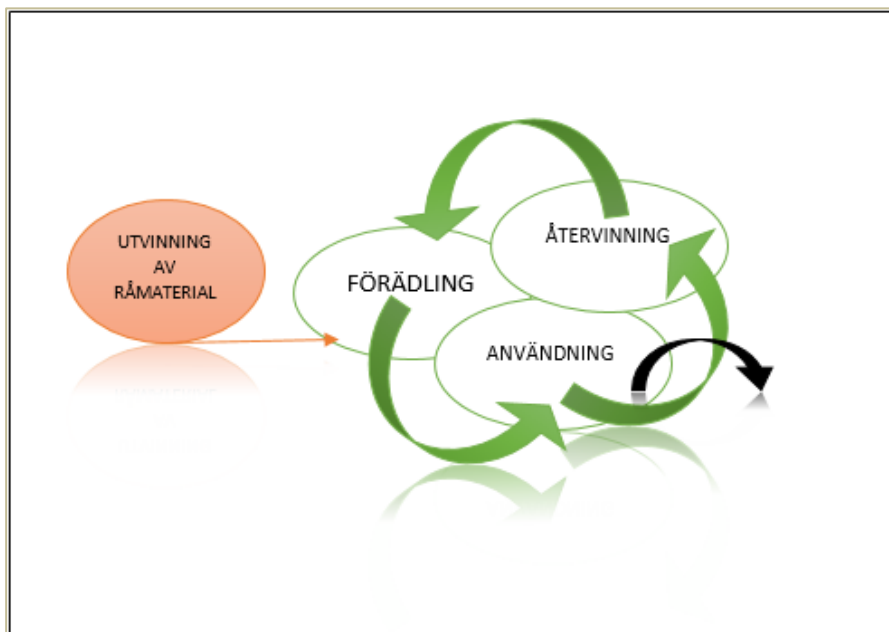
3.2. Balance of Systems (BOS)

Balance of systems (BOS) är ett samlingsnamn för allt material som behövs i en solcellsanläggning exklusive materialet som går åt till solpanelen. För att skapa sig en verklig uppfattning hur ett solcellssystem påverkar klimatet är det mer korrekt att inkludera BOS i beräkningarna. Enligt (Jones and Gilbert 2018) skiljer sig de olika solcellstyperna i hur stor andel BOS utgör för den totala klimatpåverkan. Eftersom varje solcellsanläggning är unik, krävs det olika typer av monteringsmaterial. Beroende på hur komplex orientering solcellerna är monterade gentemot varandra behövs exempelvis olika mängd växelriktare, olika längd på kablar och stålställningar. En-CdTe-anläggning utgör BOS ungefär för hälften av den totala klimatpåverkan menar (Jones and Gilbert 2018) medan för ett system med monokristallina solceller utgör BOS för cirka 15 procent när ett system på 1 kWp (producerad kilowattimme) takmonterade solceller har jämförts. (Elshurafa m.fl. 2018) På grund av att det skiljer sig mycket åt beroende på vad det är för system finns det avsaknad av tillgängliga data för att göra en LCA på detta. Därför tas inte BOS med i simuleringarna.

3.3. Avfallshantering

När solcellernas inte längre anses vara lönsamma blir solcellen avfall och det finns olika sätt att ta hand om avfallet; fyllnadsmassa, förbränning och återvinning. För de olika solcellstyperna är avfallshanteringen mer nödvändig än de andra. Tunnfilmssolcellerna består av olika tungmetaller som en del har begränsad tillgänglighet och andra kan vara väldigt giftiga om hanteras felaktigt. Det är därför viktigt att ha en ordentlig avfallspolicy och därmed ha ett cirkulärekonomitänk. (Lunardi m.fl. 2018) Både vid förbränning och för fyllnadsmassa sprids föroreningar ut i luften och/eller filtreras ner i marken. Vissa tungmetaller är persistenta och ackumuleras när de släpps ut i atmosfären via förbränning. Det skapar ohälsa för flora och fauna genom luft, vatten och mark. (Lunardi m.fl. 2018) Under nittioalet skedde stora förändringar för hur synsättet för ansvaret av avfallshanteringen skulle se ut. Efter att miljöbalken trädde i kraft 1999 blev också reglerna tydligare. De allmänna hänsynsreglerna i miljöbalken beskriver att producenten av avfallet har det yttersta ansvaret att skydda miljön och människors hälsa från de ogynnsamma effekterna från avfallet. (Naturvårdsverket 2009). Från miljöbalken kan man läsa i 15 kap 12 § ”Regeringen eller den myndighet som regeringen bestämmer får meddela föreskrifter om skyldighet för producenter att se till att avfall samlas in, transporteras bort, återvinns eller bortskaffas på ett hälso- och miljömässigt godtagbart sätt.” (Riksdagen u.å) År 2012 trädde ett nytt EU-direktiv i kraft, direktivet lägger större vikt vid producentansvaret för elektriska och elektroniska produkter och heter WEEE-direktivet (Directive on Water Electrical and Electronic Equipment). Det fungerar på så sätt att den producent som säljer elektronik i ett EU-land har ansvar för att ta hand om utrustningen när den har blivit avfall. (Naturvårdsverket 2009) Figur 8 illustrerar livscykeln för metaller som

WEEE-direktivet använder, där det är önskvärt att den svarta pilen som står för den del som inte hamnar i återvinningsflödet ska vara så låg som möjligt, helst noll.



FIGUR 8 LIVSCYKELN FÖR METALLEN. SVART PIL SYMBOLISERAR METALLEN SOM INTE HAMNAR I ÅTERVINNING. KAN EXEMPELVIS HA SORTERATS FEL.

Situationen idag med ett litet massflöde av solcellsavfall leder till att det finns en låg lönsamhet att återvinna modulerna. PV teknikerna har ofta en livstid på 25 – 30 år och de stora investeringarna var tidigast 90-tal. Därför har inte den stora avfallsströmmen kommit än, utan förväntas först om ett par år. (Lunardi m.fl. 2018). Enligt (Naturvårdsverket 2009) förväntas avfallsströmmen av solceller öka explosionsartat. Återvinning av solceller kan ske genom termisk, kemisk och mekanisk återvinning. Antingen kan man välja att återvinna att genomgå en av dessa eller i kombination. I Europa är det vanligaste tillvägagångssättet mekaniskt med en återvinningsgrad på 80 procent. (Lunardi m.fl. 2018)

3.4. Transport

Transporten är ett viktigt steg att inkludera när miljöaspekten ska studeras. Som investerare är det av högsta vikt att se var solcellen har tillverkats och transporteras ifrån om det är av betydelse att köpa en solcell med lägre klimatpåverkan. De vanligaste att köpa är solceller vars moduler och celler tillverkade i Kina, då över 65% av världens produktion är där ifrån. (iea-pvps 2016).

3.5. Känslighet för elproduktion

På den plats där systemet ska installeras är det bra att förstå vad det är för klimat på platsen. Temperatur, vind, snö, molnighet och inte minst solinstrålning, dessa faktorer påverkar elproduktionen. En solcells effektivitet går ner vid för varm modultemperatur och stabiliseras vid lägre temperaturer eller vinden ligger på som en fläkt och kyler modulen. Vid en ort med mycket snö är det bra att installera solceller på ett sådant sätt där solcellerna är enkla att frigöra modulerna från snötäcke.

När en del av ett system av seriekopplade solceller hamnar i skugga försämras elproduktionen avsevärt. Varje cell producerar sin egen effekt, men faller skugga på cellen stryker den ström från de andra cellerna som är kopplade till cellen. Det är alltså inte bara den enskilda cellens effekt som "försvinner" om bara den är i skugga utan hela modulens. Olika solcellstekniker är olika bra att leverera elektricitet vid skuggning. Kisel är en dålig elektrisk ledare vid skuggning. Detta är inget som undersöks vidare i den här studien. (Baranshai u.å.) När elproduktionen i Rhino 6 simuleras tas den faktiskt solinstrålningen under ett godtyckligt år i Göteborg, inte den maximala solinstrålningen som faller in. Solinstrålningen betraktas som direkt solljus och inte skuggat ljus.

Vinklar för hur solcellerna är placerade mot horisontallinje och hur solcellen är placerad i horisontalplan, azimut, har en stor påverkan på solcellsproduktionen och är viktigt att ta hänsyn till vid investering (Energirådgivningen u.å.). Hur solcellen är vriden bort från söderläge mot väster i det horisontella planen definieras som azimut. Oftast

är det mest optimalt att ha solcellen rakt söder ut då solinstrålningen är som högst där men i vissa klimat där solinstrålningen är hög och temperaturerna lika så är inte alltid söderläge det optimalaste. (YOO 2011)

Elproduktion varierar med omgivande temperatur. Den varierande elproduktionen beror på flera faktorer, en avgörande faktor är att modulen värms upp och sänker verkningsgraden. Det är gynnsamt att ha solceller i ett kallare klimat med hög solinstrålning än i ett varmt klimat med hög solinstrålning. I (Foad m.fl. 2018) visar de hur modultemperaturen varierar beroende på den omgivna temperaturer hos en fristående solcellsanläggning i Japan. Författarna menar att det är viktigt att ta hänsyn till omgivningstemperaturen och molntäcket när prognos för el genereringen från solcellsproduktionen ska bestämmas. Det är därför, om mer korrekta resultat eftersträvas, att inte använda sig utav en maxinstrålning vid beräkning av elproduktion då en liten molnighet påverkar resultaten. (Amarkoon m.fl. 2018)

3.6. Klimatpåverkan

En livscykelanalys (LCA) kan hjälpa till att identifiera de kritiska momenten hos en produkts livscykel utifrån klimatperspektiv och på så vis få förståelse om var man smartast bör reducera produktens klimatpåverkan. (ISO u.å.) En livscykelanalys är uppdelad i 4 sektioner; *mål och omfattning, inventering, bedöma miljöpåverkan samt tolkning*. I mål och omfattning ställs frågorna; Vad är syftet? Och vilka svar efterfrågas? Vad ska studien användas till, vad är kraven för datakvalité och hur omfattande behöver den vara? Här beslutas också systemgränsen. I inventeringen ska energi –och materialflöden identifieras som finns under produktens livscykel och hur stora dessa är med avseende på hur systemgränsen är satt i första delen. För att bedöma miljöpåverkan tas resultat fram som kan relateras till olika miljöproblem. Sista delen tolkas tillvägagångssättet, data och resultaten och sätts i relevant perspektiv. (Boverket 2019) Resultatet från inventeringen, LCI, listas i elva olika mittpunktskategorier som beskriver på olika sätt produkten påverkar miljön. De mittpunktskategorier som har gemensamma skadepåverkan på miljön. Vardera mittpunktskategorien erhålls i Tabell 3.

TABELL 3 BESKRIVNING AV MITTPUNKTSKATEGORIerna SOM ANVÄNDS VID LIVSCYKELANALYS

Mittpunktskategori	Enhet	Förklaring
Abiotisk utarmning	Kg Sb ekv.	Utarmning av naturresurser (icke-levande), näringsämnen, mineraler
Abiotisk utarmning (fossilt)	MJ	Utarmning av naturresurser (icke-levande), fossila ämnen
Global uppvärmning	Kg CO ₂ ekv	Uppvärmning av jorden
Ozonnedbrytning	Kg CFC-11 ekv	Utsläpp av ämnen som minskar det stratosfäriska ozonlagret
Giftigt för människan	Kg 1,2 DB ekv	Påverkan på människan vid ökad giftiga halter i miljön
Akvatisk ekotoxicitet i färskvatten	Kg 1,2 DB ekv	Utsläpp av kemiska och organiska substanser i färskvatten
Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö	Kg 1,2 DB ekv	Utsläpp av kemiska och organiska substanser till marin miljö
Terrestrisk ekotoxicitet	Kg 1,2 DB ekv	Utsläpp av kemiska och organiska substanser till mark
Fotokemisk ozonbildning	Kg C ₂ H ₄ ekv	Utsläpp av partiklar
Försurning	Kg SO ₂ ekv	Utsläpp av substanser som försurar vatten och luft
Övergödning	Kg PO ₄ --- ekv	Utsläpp till vatten och mark av gödande växtnäringssubstanser

Abiotisk utarmning

Abiotisk utarmning är mittpunktskategorier som behandlar naturresurser som är ändliga, där för hög produktion kan urholka dessa ur jorden och få de att försvinna. De brukar baseras på de totala reserverna och nuvarande utvinningstakt och har enheten antimonekvivalenter (Sb-ekvivalenter). Det material som används och likställs med denna kategori är icke-förnyelsebara naturresurser så som metaller, mineraler, jord och sten. För den fossila är det olja, kol och gas, och mäts i joule som är baserat på energiinnehållet i bränslet.

Global uppvärmning

Är det vanligaste sättet att beskriva klimatförändringen då den är baserad på utsläpp som är växthusgaser. Kategorin mäts i koldioxidekvivalenter och de utsläpp som finns med i den här kategorin likställs med hur mycket de påverkar den globala temperaturen på en tidshorisont på 100 år (GWP100). Utsläpp så som metan, vattenånga, koldioxid m.m. finns i den här kategorin.

Ozonedbrytning

Kategorin mäts i klorflurkol-11-ekvivalenter, i den här kategorin hamnar utsläpp så som dikväveoxid och CFC. Ämnen som berör denna kategorin bryter ner stratosfäriskt ozon som finns till för att skydda jorden mot farlig UV-strålning. Kategorin beskriver hur förhållandet mellan CFC-11 är relativt ozonets utspädningspotentialen för olika gaser är.

Giftigt för människan

Utsläpp som hamnar i den här kategorin baseras på de utsläpp som sker i utomhus miljö (alltså inte inomhuskvalitén). Hur tolererbara koncentrationerna som sprider sig till luft och vatten som i sin tur påverkar människan och dess accepterbara dagliga intag. Det har att göra med hur potenta gaserna är efter utsläpp. Dessa utsläpp likställs med 1,4-diklorbensensekvivalenter.

Ekotoxicitet

Denna kategori delas upp i mindre kategorier; sötvatten, marin miljö och för mark. Utsläpp som behandlar ekosystemen baseras på toleranta koncentrationerna är. Referensenheten är samma som ovanstående kategori, 1,4-diklorbensensekvivalenter, och mäts separat för vatten och mark.

Fotokemisk ozonbildning

Marknära ozon produceras med hjälp av solljus och utsläpp av NO_x kväveoxider) och VOC (flyktiga organiska föreningar). Dessa ämnen dyker upp i samband med kraftverk och lösningsmedel. Ozon på marken kan ge besvär för människan organ, dessa ämnen likställs med etanol/eten-ekvivalenter.

Försurning

Kategorin likställs med svaveloxids-ekvivalenter och ger försurade sjöar och vattendrag från exempelvis surt regn. Det sura regnet blir från utsläpp från SO₂ och NO_x.

Övergödning

Dessa ämnen som hamnar här är inte dåliga i små mängder, tvärtom de är nödvändiga för flora och fauna, det är i stora mängder det orsakar problem genom algökning och syrefattiga bottenar i sjöar. Utsläpp från ammoniak, nitrater, fosfor är exempel på ämnen som hamnar i den här kategorin och likställs med fosfatekvivalenter.

SimaPro är en LCA mjukvara som gör det möjligt att modellera system och produkter ur ett livscykelperspektiv. SimaPro följer ISO 14000 standarden och har valts av industri, forskningsinstitut och konsulter i mer än 80 länder. Från erhållna värden i SimaPro ska framtida investerare kunna se viken process i tillverkningen som är mest kritisk ur miljöperspektiv. Detta ger investerarna verktyg för att i sin tur få påtryckningsmedel att använda mot leverantörer att välja produkter som kan lämpa sig bäst för en hållbar utveckling.

4. Indata

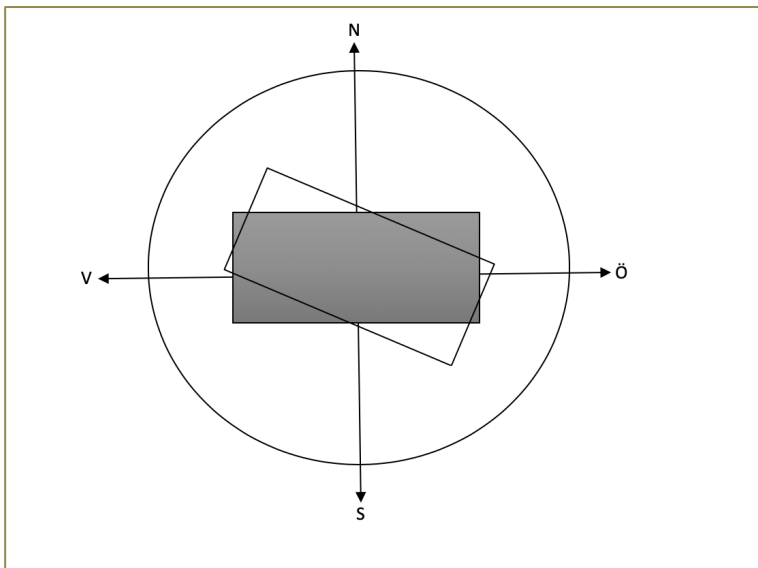
4.1. Elproduktion

Elproduktionen simuleras i mjukvarans om heter Rhino (version 6) som är en 3D programvara baserad på den matematiska modellen NURBS. I programmet väljs en modell som är tänkt att vara lik den effekt på solceller som är vanligt förekommande på Göteborgs stads fastigheter idag. Då Lokalförvaltningen inte än har investerat i tunnfilmssolceller väljs de två med högst maxeffekt ut från programmet. Rhino har tillgång till moduler från Sandia Model Module Database. Det är moduler som har funnits på marknaden ett tag och är inte de senaste på marknaden, därför är effekten något lägre än vad som kan erhållas på marknaden idag.

TABELL 4 MODULEGENSKAPER FÖR DE SOLCELLER SOM SIMULERAS I RHINO

	CdTe	CIGS	Mono	Poly
Modell	First Solar FS-275	Solar frontier SF-160S	SunPower SP305	Trina TSM-240PA05
Aktiv area [%]	90	90	90	90
Modulverkningsgrad [%]	11,57	14,49	20,81	16,44
Max effekt [W]	74,95	159,1	305,23	241,12

För att ta reda på hur mycket el vardera solcell producerar under ett år undersöktes hur känsliga de var vid olika montage. Simuleringarna genomfördes med klimatdata¹ (solinstrålning under ett godtyckligt år) från Göteborg. För att variera olika montage testades hur solinstrålningen varierades i olika vinklar och med olika väderriktningar (azimut, se Figur 9). Elproduktionen tog fram i datorprogrammet Rhino.



FIGUR 9 ILLUSTRERAS HUR AZIMUTEN STARTAR FRÅN I SYD, 180 GRADER. NÄR DEN ÖKAR POSITIVT BLIR DET VÄSTLIG RIKTNING OCH VID ÖKNING NEGATIVT BLI DET ÖSTLIG RIKTNING.

Utifrån erhållna värden ska framtida investerare kunna bedöma hur energiproduktionen varierar vid olika solcellstekniker. Modellen i Rhino6 var konstruerad på ett sådant sätt att en kvadratmetersolcell modellerades, vilket innebär att svaret erhöles i genererad effekt per kvadratmeter. Fyra olika solcellstyper varierades där dess skilda egenskaper (verkningsgrad, temperaturkoefficient) utgör vilken typ av solcell det var, därefter simulerades modulens lutning mot taket och azimut.

4.2. Elanvändning

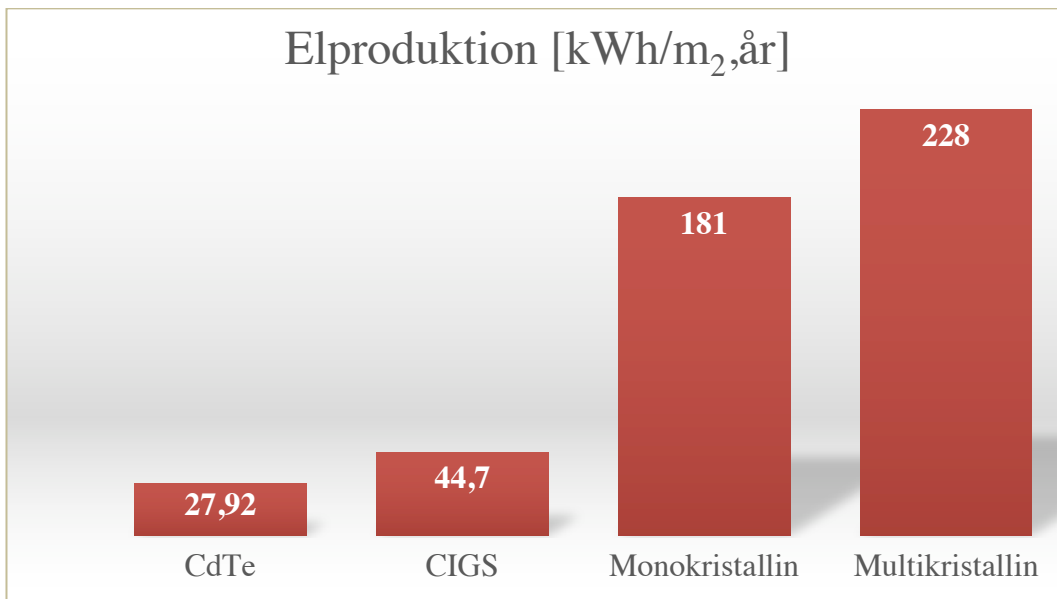
El som används i tillverkningen erhålls i tabellen nedan för monokristallina solceller, Tabell 5. Den el som inkluderas är totala elen som används i tillverkningsfasen från som är markerad som mellanspänning (eller el som är från icke förnybara energikällor). I det här avsnittet tas inte klimatpåverkan från elen med utan enbart mängden el, därför är det ointressant att redovisa från vilket land elen kommer ifrån.

¹https://energyplus.net/weather-download/europe_who_region_6/SWE_Goteborg.Landvetter.025260_IWEC/all

TABELL 5 ETABLERAS HUR MYCKET ELEKTRICITETS SOM KRÄVTS FRÅN ELNÄTET UNDER TILLVERKNINGEN IVA (2015)

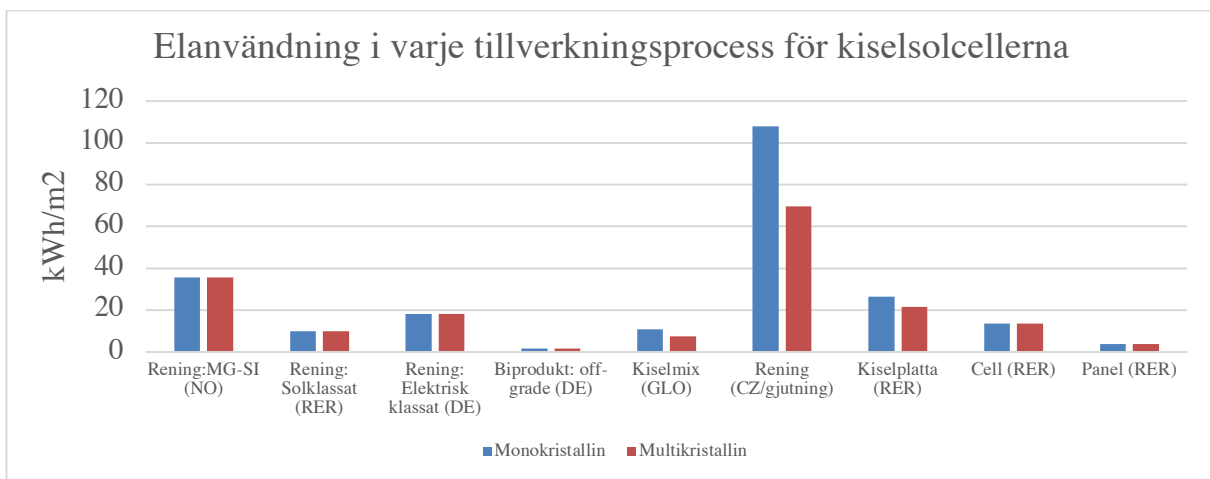
	CdTe	CIGS	Multi	Mono
Elanvändning[kWh]	27,92	44,7	181	228

Den elektricitet som krävdes vid de olika tillverkningstegen för kisel-solcellerna summerades från inventeringslistorna i Bilagorna och illustreras i Figur 10.



FIGUR 10 TOTALA ELANVÄNDNINGEN FÖR ATT TILLVERKA SOLCELLERNA IVA (2015)

För att se vad som skiljer de kristallina solcellerna åt med elanvändningen i produktionen erhålls skillnaderna i Figur 11.



FIGUR 11 VISAR PÅ SKILLNADEN I ELANVÄNDNING I TILLVERKNINGSSTEGEN FÖR KISELSOLCELLERNA IVA (2015)

4.3. Sparade koldioxidekvivalenter

Mängd emissioner varierar beroende på vilken region som väljs för medelelen, i beräkningarna används medel för Norden som en total växthuseffekt på 0,106² kg CO₂ekv per kWh.

4.4. Livscykelanalys

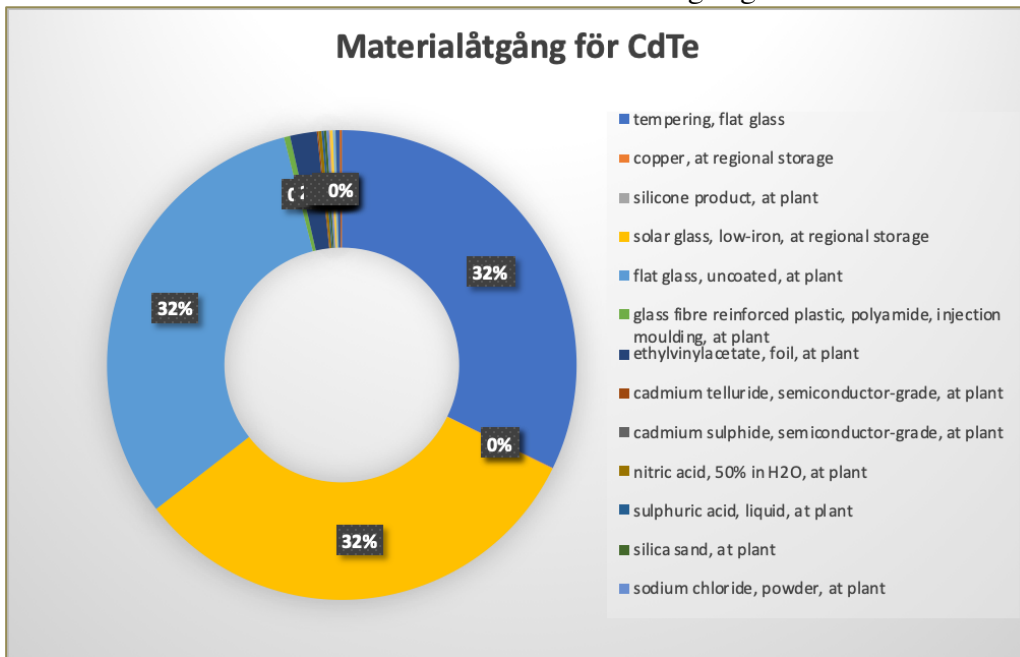
I IVA (2015) hämtades materialdata för de fyra olika solcellerna, data för materialåtgången från första processteget som är metallurgisk kisel (MG-Si) till en färdig modul. För att få fram hur emissionsintensiteten i tillverkningsprocessen för solceller görs en inventeringslista för de olika processtegen i tillverkningen.

² Muntlig källa, Andreas Karlsson BDAB, värden från interna källor

Inventeringslistan innehåller materialåtgång för en kvadratmeters solcell. Inventeringslistan används sedan i SimaPro för att få ut mittpunkterna i LCA-analysen. I simuleringarna simulerades resultat där den funktionella enheten var en kvadratmeters solcell, detta för att vid beräkning av verkliga anläggningar lättare kan beräkna fram resultat. För tunnfilms solcellerna är det enbart ett processteg vilket innebär en simulering i SimaPro, kisel solcellerna har åtta tillverkningssteg som kräver varsin simulering i SimaPro. Innan simuleringarna körs väljs en LCA metod, metoden CML-IA används för de fyra modulerna då det är den som är tillgänglig. Metoden är Europa baserad och har blivit utvecklad vid *Centre of Environmental Science (CML-IA)* på Leiden Universitetet i Nederländerna. Hur mycket el som används från nätet erhålls i tabell 20 i Bilagorna och illustreras i Figur 12. I samma figur etableras också vilken el som har använts i Simapro, där RER är europeisk elmix, GLO är global elmix.

CdTe

Materialinnehållet för en CdTe modul är fördelat enligt figur 12.

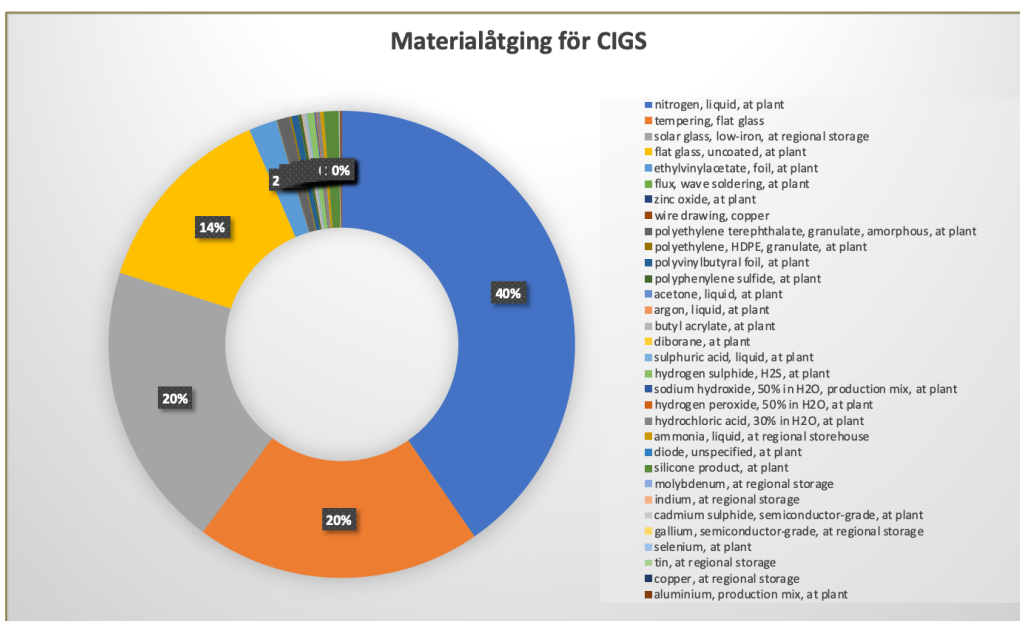


FIGUR 12 ILLUSTRERAR HUR FÖRDELNINGEN MELLAN INGÅENDE MATERIAL I EN CDTE-MODUL IVA (2015)

Lista för data med enhet erhålls i Bilagorna.

CIGS

Materielinnehållet för en CIGS modul erhålls i Figur 13.

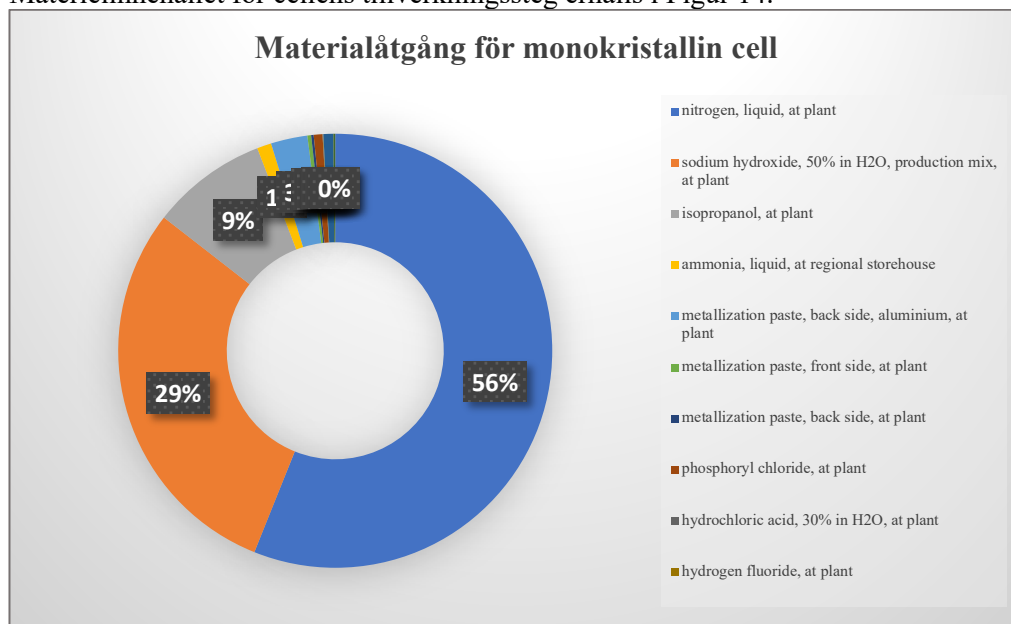


FIGUR 13 ILLUSTRERAR HUR FÖRDELNINGEN MELLAN INGÅENDE MATERIAL I EN CIGS-MODUL IVA (2015)

Lista för data med enhet erhålls i Bilagorna i Tabell 21.

Monokristallin cell

Materielinnehållet för cellens tillverkningssteg erhålls i Figur 14.

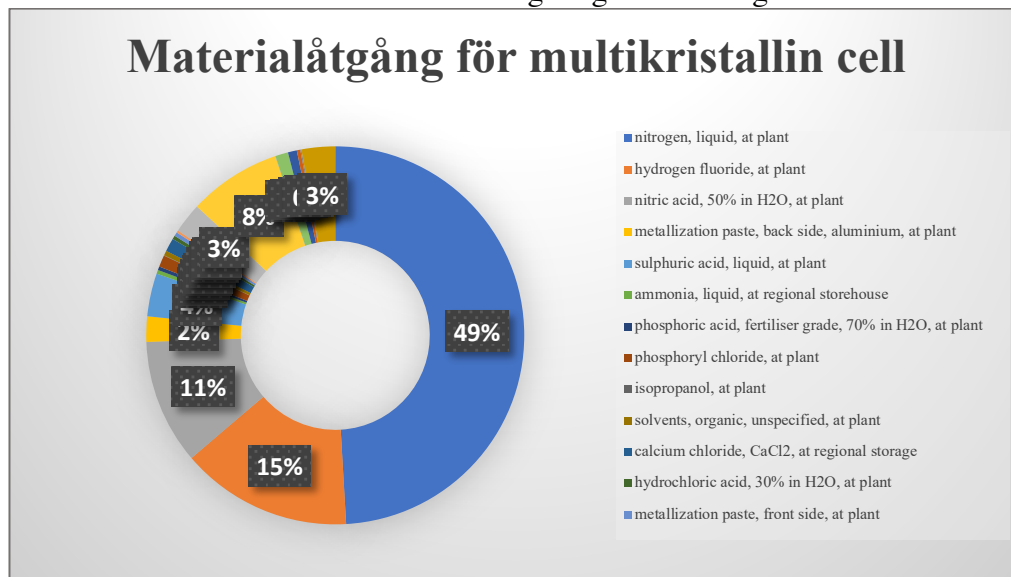


FIGUR 14 VISAR VILKET MATERIAL SOM ANVÄNDS MEST I DEN MONOKRISTALLINA CELLEN IVA (2015)

Lista för data med enhet erhålls i Bilagorna för cellen samt de andra tillverkningsstegen i Tabell 22.

Multikristallin cell

Materielinnehållet för cellens tillverkningssteg erhålls i Figur 15.



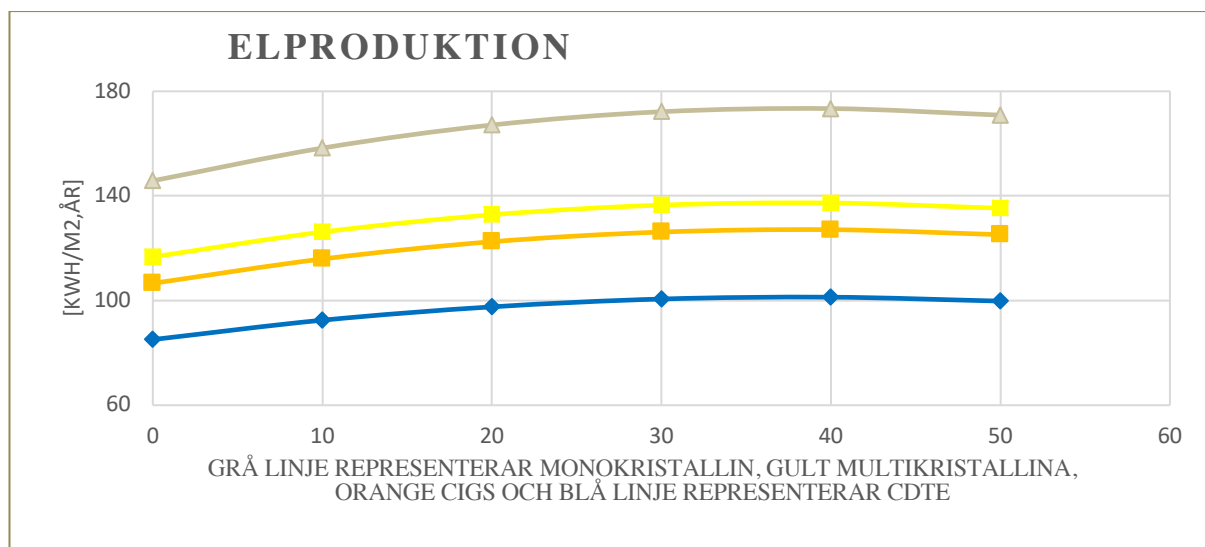
FIGUR 15 VISAR VILKET MATERIAL SOM ANVÄNDS MEST I DEN MULTIKRISTALLINA SOLCELLEN IVA (2015)

Lista för data med enhet erhålls i Bilagorna för cellen samt de andra tillverkningsstegen i Tabell 23.

5. Resultat

5.1. Elproduktion med montering i Göteborg

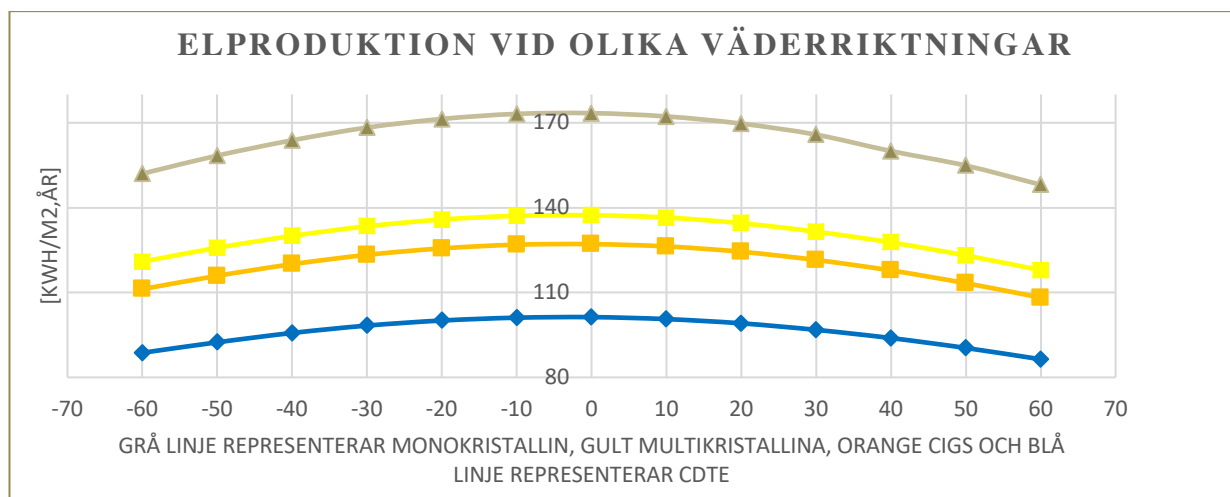
I Figur 16 illustreras hur mycket el som producerad när lutningen på modulen varierar, beroende på vilken lutning som är monterad faller olika mängd solinstrålning in. Att optimera solinstrålningen är avgörande om man vill optimera elproduktionen. Noll grader innebär att solcellen ligger platt på taget.



FIGUR 16 MÄNGD GENERERAD EL BEROENDE PÅ MODULENS LUTNING FRÅN EN HORIZONTELL TAKYTA.

Den monokristallina solcellen har högst verkningsgrad, och producerar således mest el. De fyra modulerna påvisar samma trend vid de olika lutningarna. Vilket innebär att vid 40 grader faller mest sol in på modulerna, vilket innebär att det är det optimala fallet för att generera mest el.

I Figur 17 illustreras simuleras solcellerna vid 40 graders lutning där azimuthen varierar från väst till öst, och på så vis ändras också mängd solstrålning som faller in på modulen. Vid -45 grader är modulen placerad rakt i sydväst, vid +45 grader är modulen placerad rakt i sydöst.



FIGUR 17 HUR ELPRODUKTIONEN VARIERAS MED NÄR VINKELN PÅ AZIMUTEN ÄNDRAS.

För alla fyra solcellerna är rakt i söderläge mest optimalt. Elproduktionen sjunker en aning snabbare om solceller står åt öst än om den skulle stå åt väst. Den totala elektriciteten som genererades från de olika solcellerna erhålls i Tabell 6 när solcellerna står i söderläge med 40 graders lutning. För de fyra olika solcellerna är trenden lika, de producerar mest el när solcellen är rakt i söderläge och lägst desto mer öst den placeras.

TABELL 6 SIMULERING MED 40 GRADERS LUTNING RAKT I SYD ERHÖLLS TOTAL VÄXELSTRÖM

Total växelström (AC) [kWh/år]	CdTe	CIGS	Mono	Multi
40 grader rakt i syd	101,3	127,1	173,4	137,3
0 grader	85	107	146	117
50 grader	100	125	171	135
Sydväst (-45 grader)	94	118	161	128
Sydöst (+45 grader)	92	115	157	125

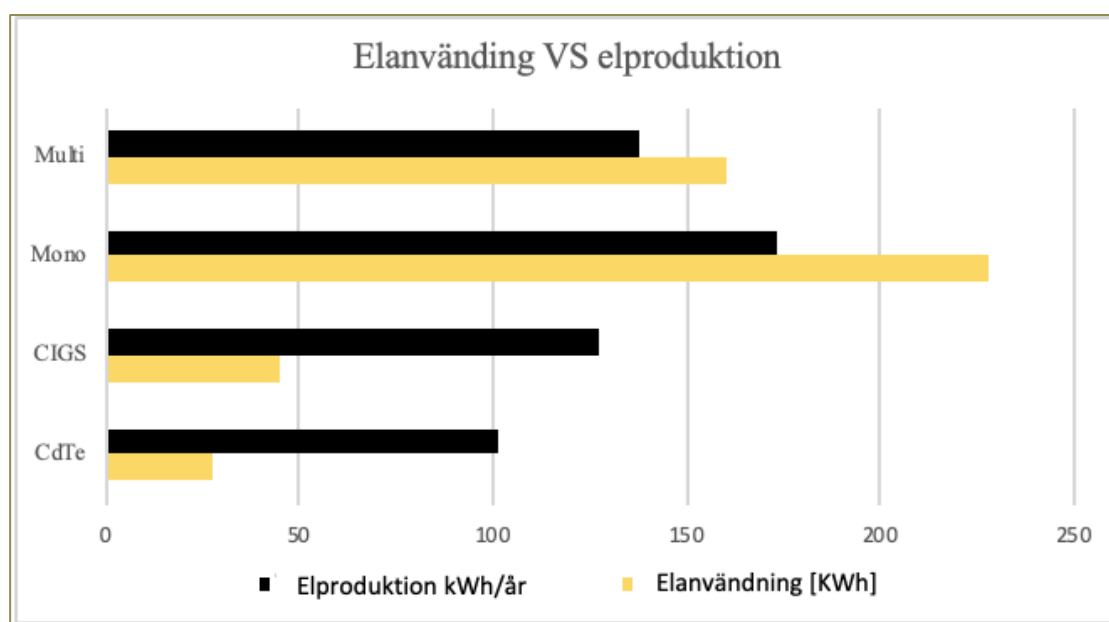
5.2. Energiåterbetalningstid

Energiåterbetalningstiden som i den här rapporten endast inkluderar el, speglar hur lång tid det tar att producera den mängd el som användes till tillverkningen, är kortare än 2 år för alla fyra solceller vilket etableras i Tabell 10.

TABELL 7 ENERGIÅTERBETALNINGSTID

	CdTe	CIGS	Mono	Multi
EPBT [år]	0,276	0,352	1,04	1,66
[mån]	3,3	4,2		

Figur 18, görs också en illustration av skillnaden i elproduktion och elanvändning från tillverkningen. Om den svarta och den gula stapel är lika stora tar det exakt ett år att betala tillbaka elektriciteten. För första generationens solceller är den gula stapeln större än den svarta, och tar således längre tid att betala tillbaka än ett år.



FIGUR 18 ILLUSTRERAR SKILLNADEN MELLAN ELANVÄNDNINGEN I TILLVERKNINGEN OCH ELPRODUKTIONEN

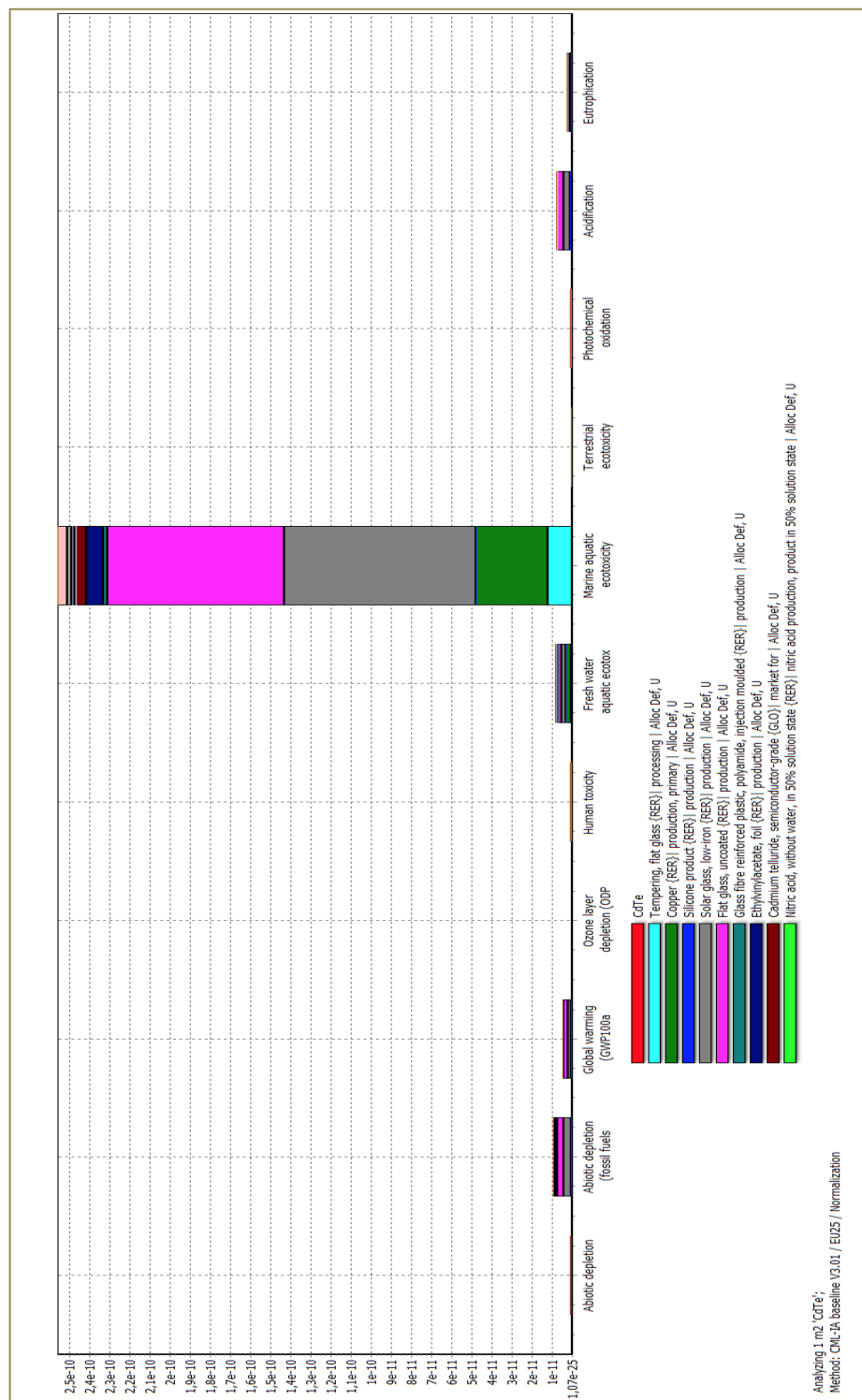
5.3. Klimatpåverkan från livscykelanalys

Klimatpåverkan bestämdes genom att simulera de ingående materialen och den energin som krävs för att tillverka en kvadratmeterssolcell. Varje processteg i produktionen simulerades var för sig. Eftersom kisel-solcellerna har relativt många tillverkningssteg redovisas enbart det sista tillverkningssteget som är panelen, resterande steg erhålls i Bilagorna. Klimatavtrycket redovisas både i en normalisering och i en kategorisering. En normalisering visar vilken kategori som ger störst utslag i det land som LCA-metoden refereras till. I den här studien används metoden CML-IA som refererar till Nederländerna. Den totala mängden som släpps ut utav en kvadratmeterssolcell delas med det specifika landets totala utsläpp för samma kategori. En kategorisering visar vilken andel varje material som

påverkar i en specifik kategori. Där materialens påverkar delas med den totala påverkar från en kvadratmeterssolcell. Y-axel visar relativ andel inom respektive kategori.

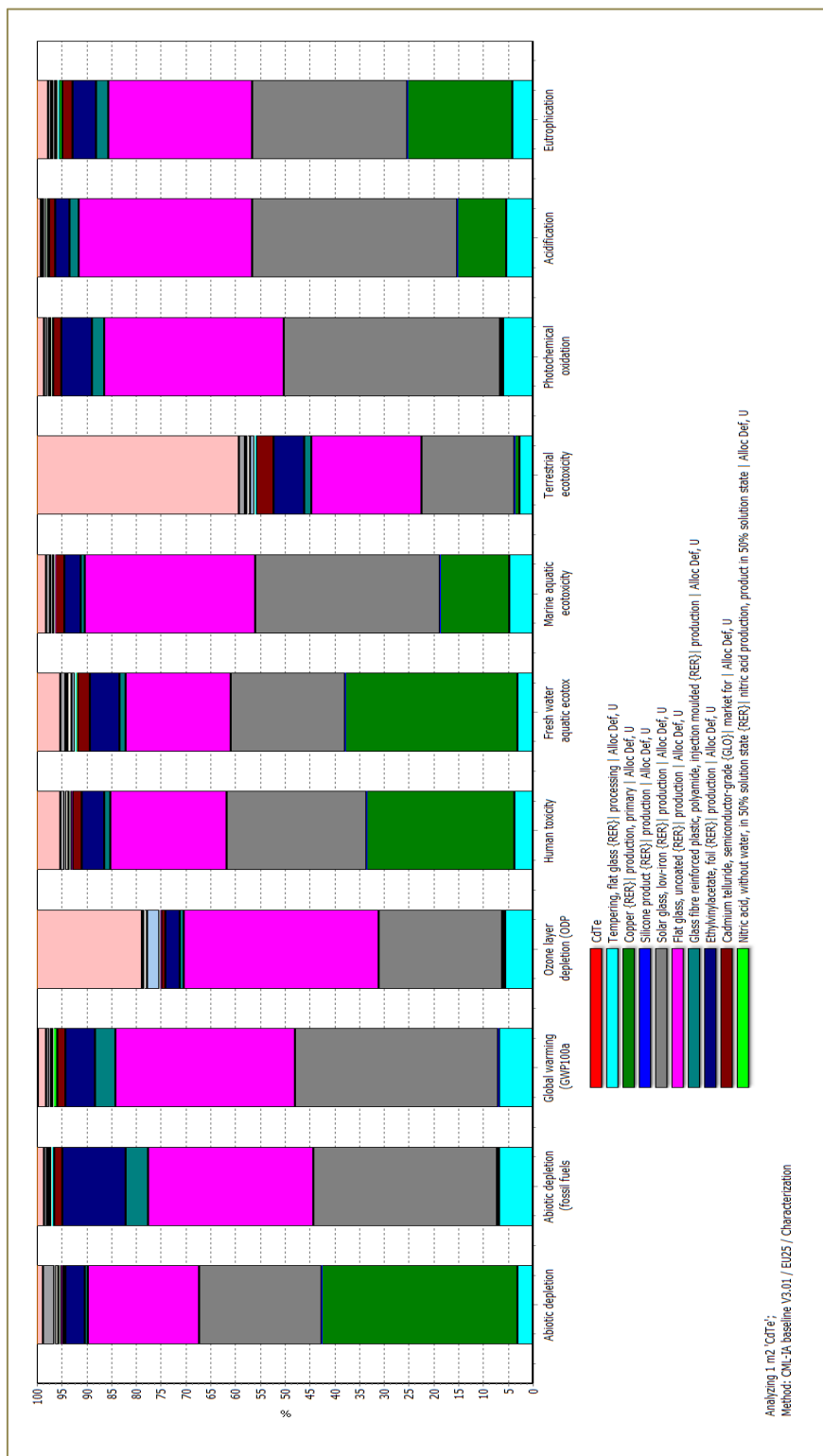
CdTe

För en CdTe-modul visar normaliseringen, Figur 19, att *Akvatisk ekototoxicitet i marin miljö* (Marine aquatic ecotoxicity) den kategori som påverkar mest vid produktion av CdTe. Modulen står till störst del utav olika typer av glas, och det är också det material som påverkar kategorin mest. Det som påverkar kategorien efter glaset är etylen-vinylacetat (EVA) och elektricitet från det danska elnätet.



FIGUR 19 VISAR I VILKA MITTPUNKTS KATEGORIER CDTE-MODULEN PÅVERKAR

De material som påverkar de 11 miljökategorierna för modulen är nästan samma för alla kategorier. Glas i olika sammansättningar påverkar runt 50-60 procent i nästan varje kategori, elektriciteten utgör också stora delar av kategorierna *ekotoxitet för marken* och *ozonnedbrytningen*. Koppar påverkar betydande för *abiotisk utarmning* av mineraler och metaller, *giftigt för människan*, *akvatisk ekotoxitet* för marin miljö och för färskvatten, *försurning* och för *övergödning*, vilket erhålls i Figur 20.

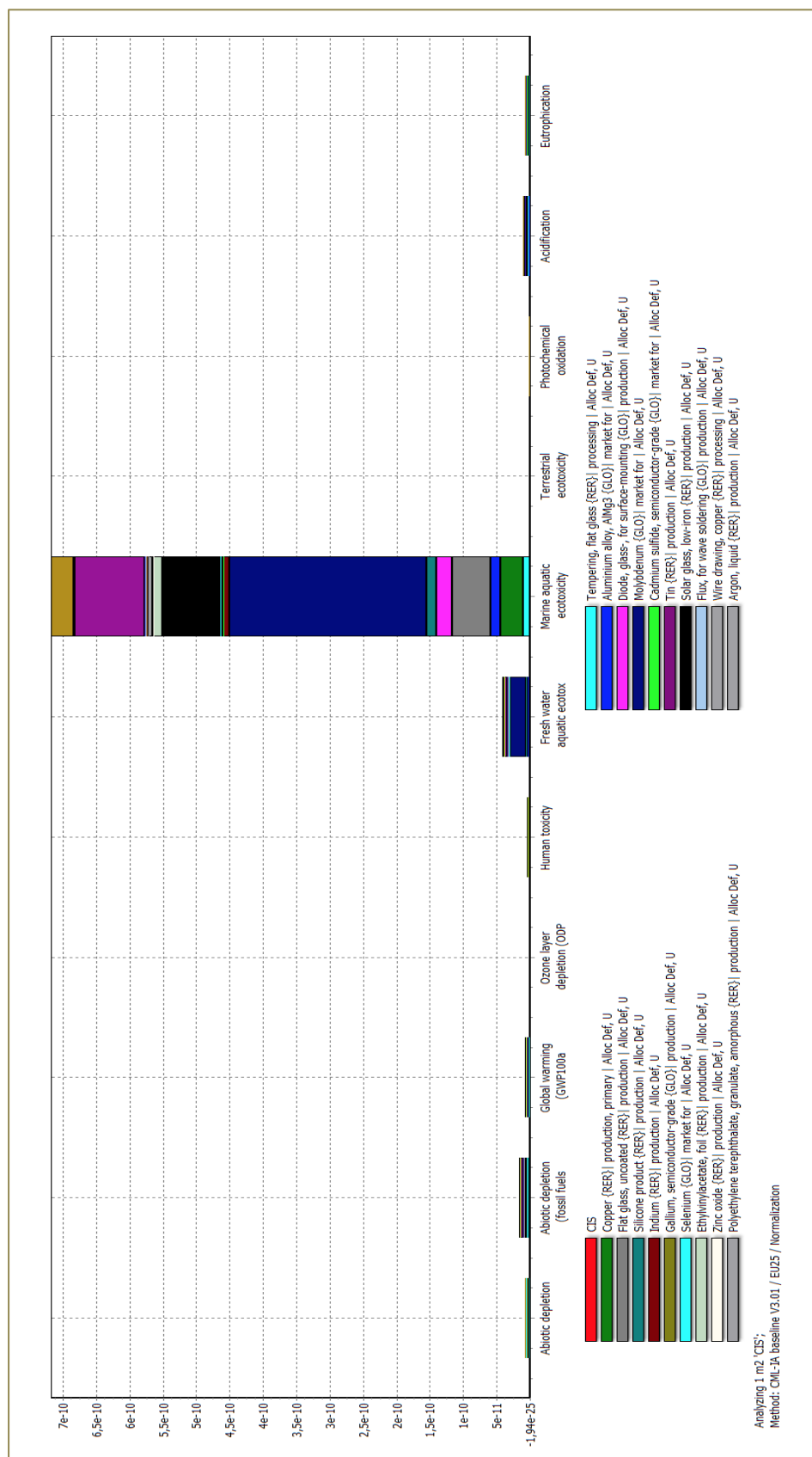


FIGUR 20 GLAS, EVA OCH ELEKTRICITET UTGÖR MEST PÅVERKAN I DE ANGIVNA KATEGORIERNA

CIGS

För en CIGS-modul utgör likt en CdTe modul glas det största materialinnehållet och på samma sätt påverkas *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö* (Marine aquatic ecotoxicity) mest för produktionen av solcellen efter

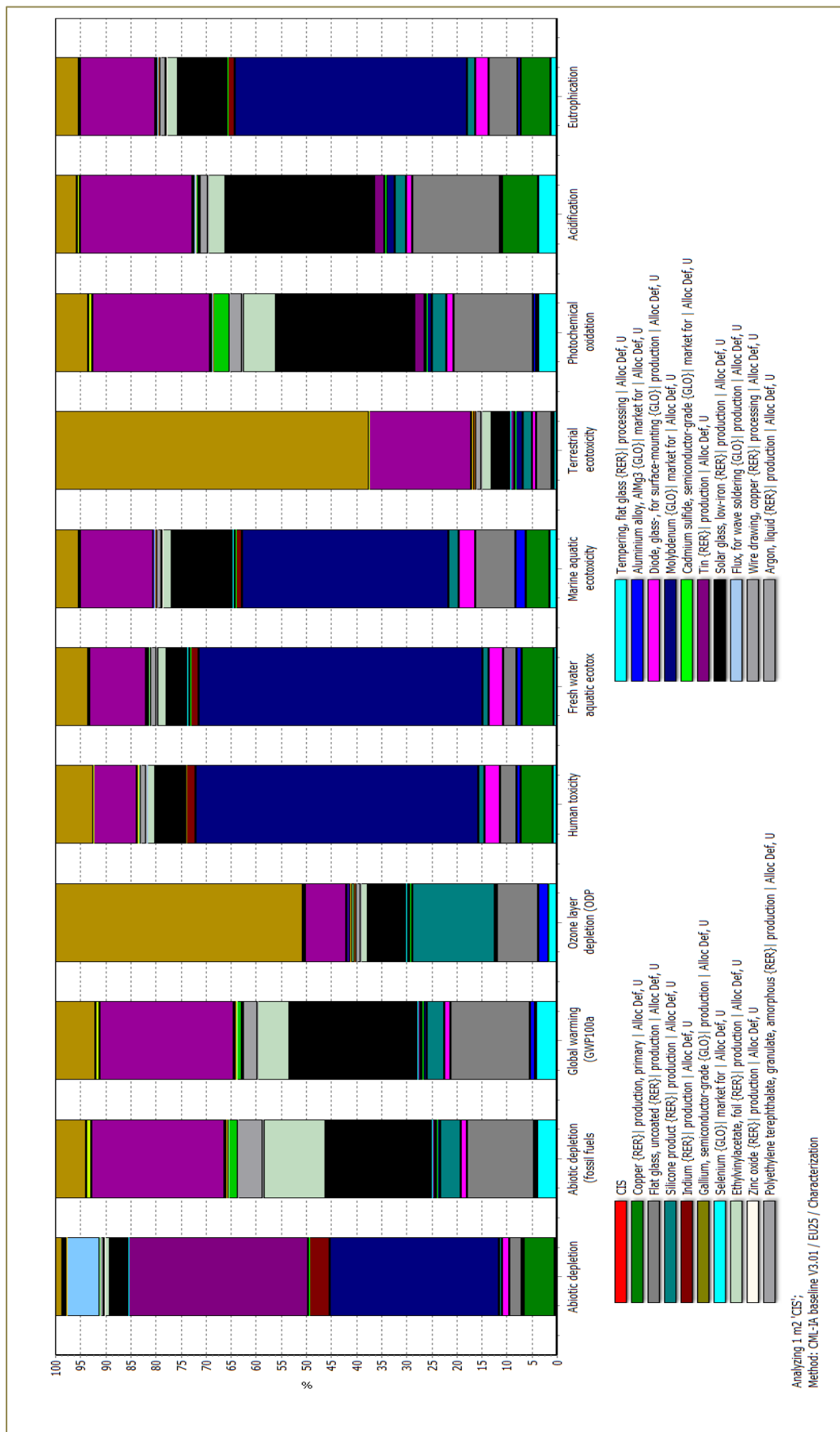
normalisering. Molybden störst andel i kategorin (utgör bara 0,02% av materielinnehållet), följt efter tenn, glas och gallium se Figur 21.



FIGUR 21 VISAR I VILKA MITTPUNKTS KATEGORIER CIGS-MODULEN PÅVERKAR

I Figur 22 påverkar olika ämnen de olika kategorierna. Molybden står för ungefär 40 procent i kategorin *akvatisk ekototoxicitet i marin miljö* men påverkar även *abiotisk utarmning* för mineralen och metaller, *giftigt för människan*, *akvatisk ekototoxicitet* för färsk vatten och *övergödning* i stor utsträckning. Elektriciteten (mörkgul) påverkar främst i

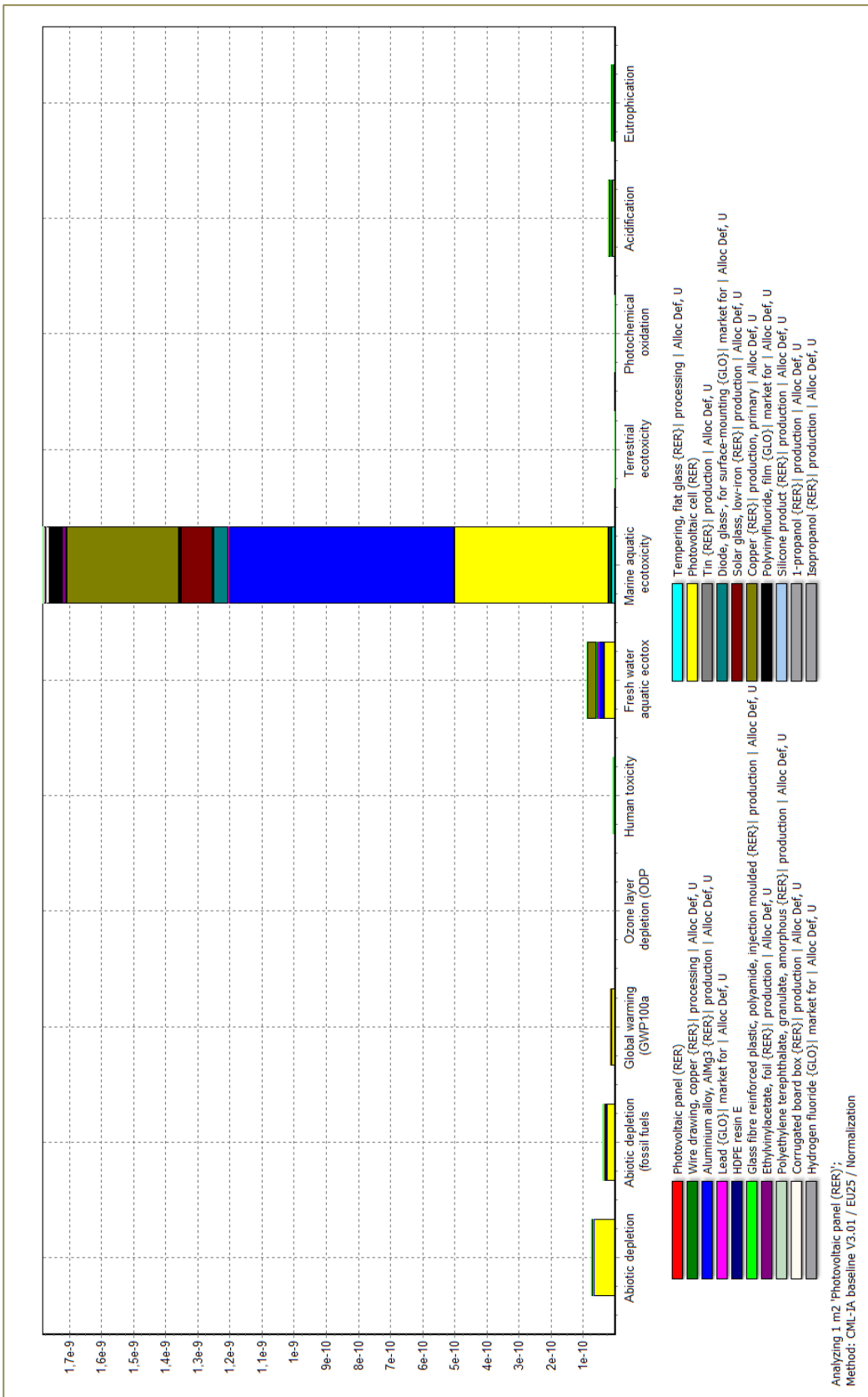
mittpunktskategorierna *ozonnedbrytning* och *ekotoxicitet* för marken, i de kategorierna utgör inte molybden en miljöpåverkan i någon större utsträckning.



FIGUR 22 MOLYBDEN, ELEKTRICITET, GLAS PÅVERKAR ÄR TRE MATERIAL SOM PÅVERKAR DE OLIKA KATEGORIERN I EN STÖRRE UTSTRÄCKNING

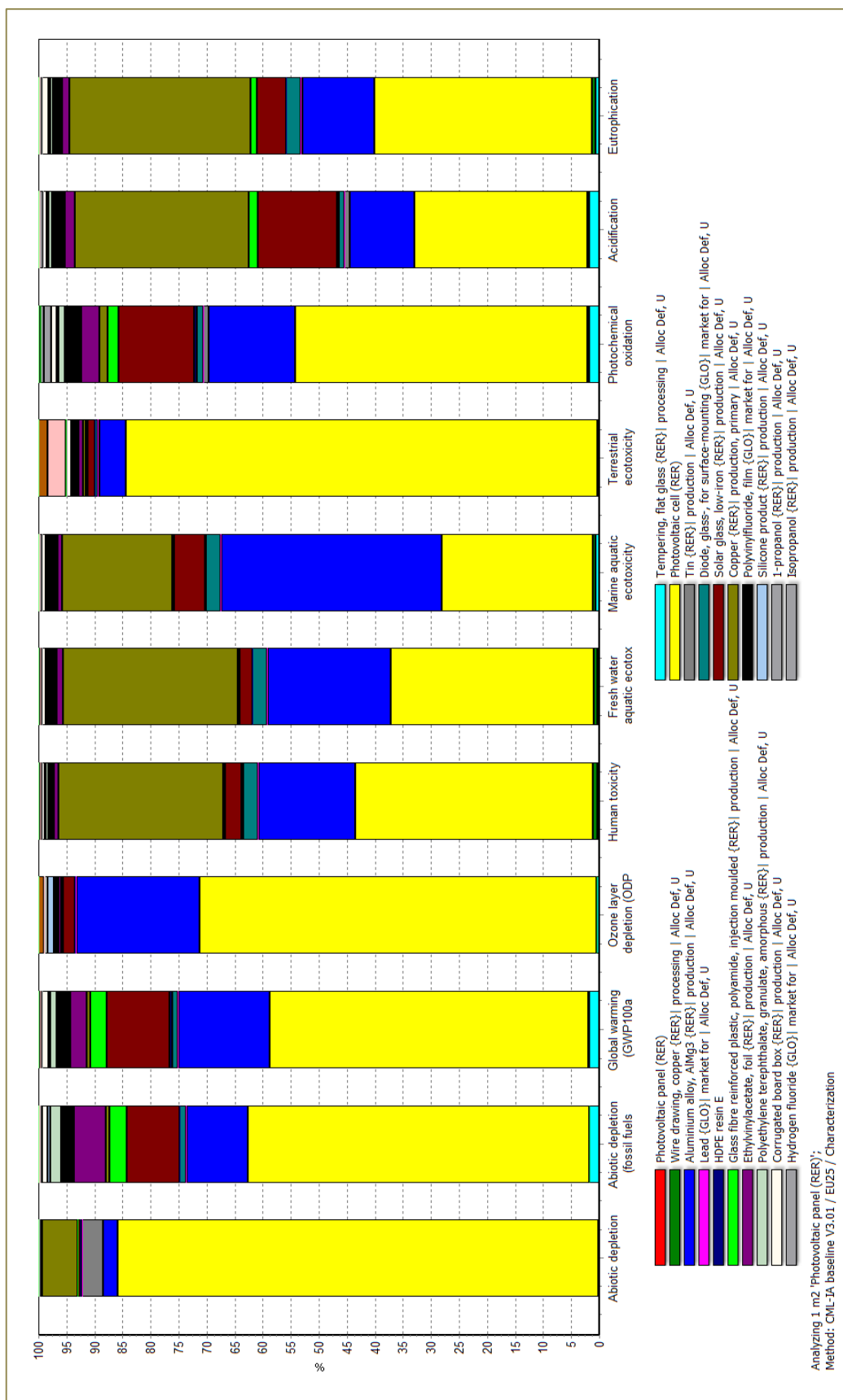
Monokristallin solcell

Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö är även här den kategorin som påverkas överlägset enligt Figur 23. Aluminium är det material som påverkar den kategorin mest. Koppar utgör också en betydande del. Den gula färgen innebär att de tidigare processtegen utgör en betydande del.



FIGUR 23 VISAR I VILKA MITTPUNKTS KATEGORIER MONOKRISTALLINA SOLCELLEN PÅVERKAR

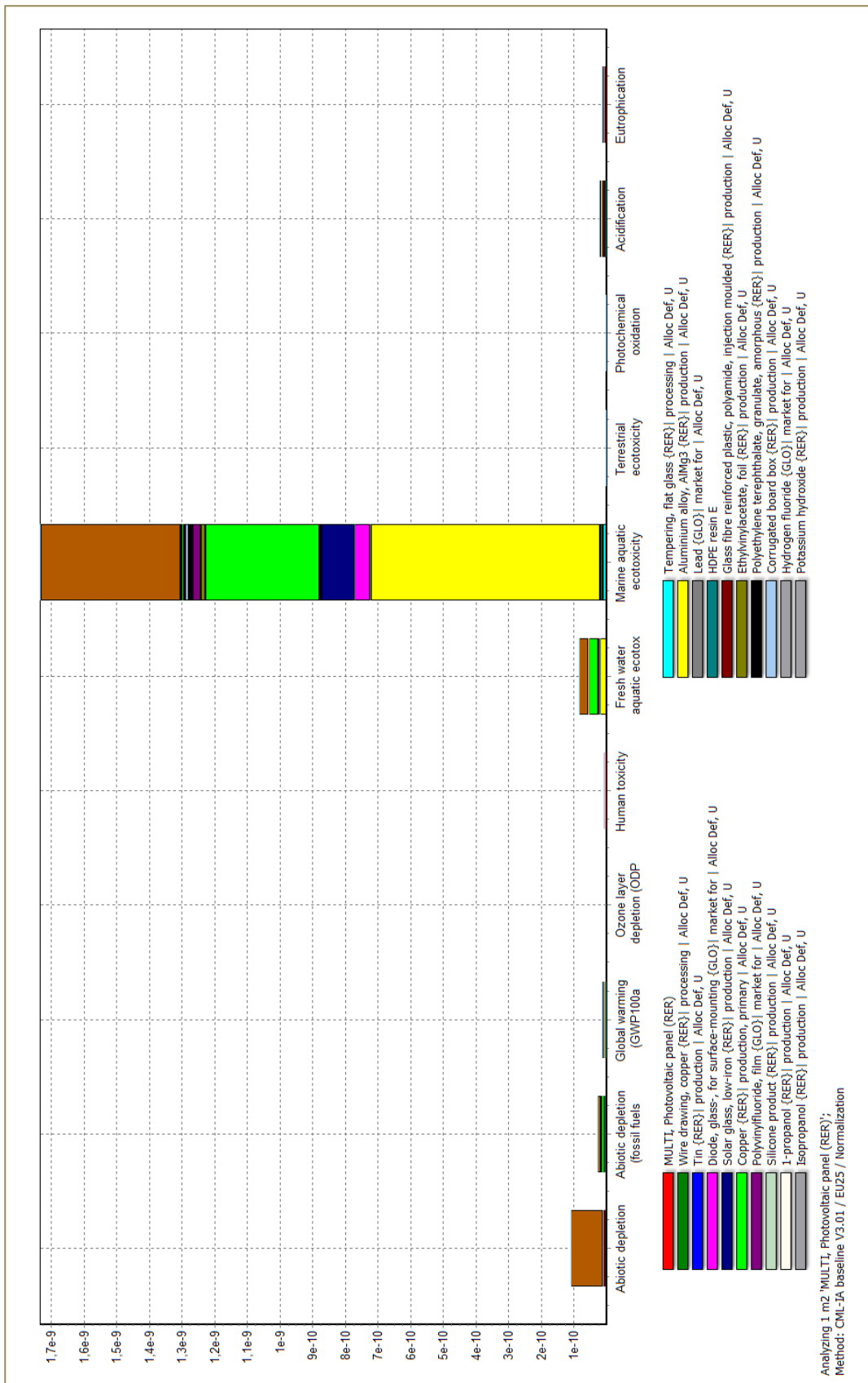
I Figur 24 ser vi hur tidigare processteg påverkar mer än de ingående materialen i sista processteget, panelen, förutom i just *Akvatisk ekototoxicitet* och *Giftigt för människan*. I Bilagorna följs processtegen för att se vilka material som påverkar totalt sett mest i varje kategori. Aluminium påverkar varje kategori, desamma gäller för koppar i nästan lika stor utsträckning.



FIGUR 24 ILLUSTRERAR ATT DE TIDIGARE PROCESSTEGEN UTGÖR MER PÅVERKAN ÄR DE SISTA. MEN ATT ALUMINIUM OCH KOPPAR TILLSAMMANS MED GLASMÄNGDEN ÄR BETYDANDE DELARI KATEGORIerna

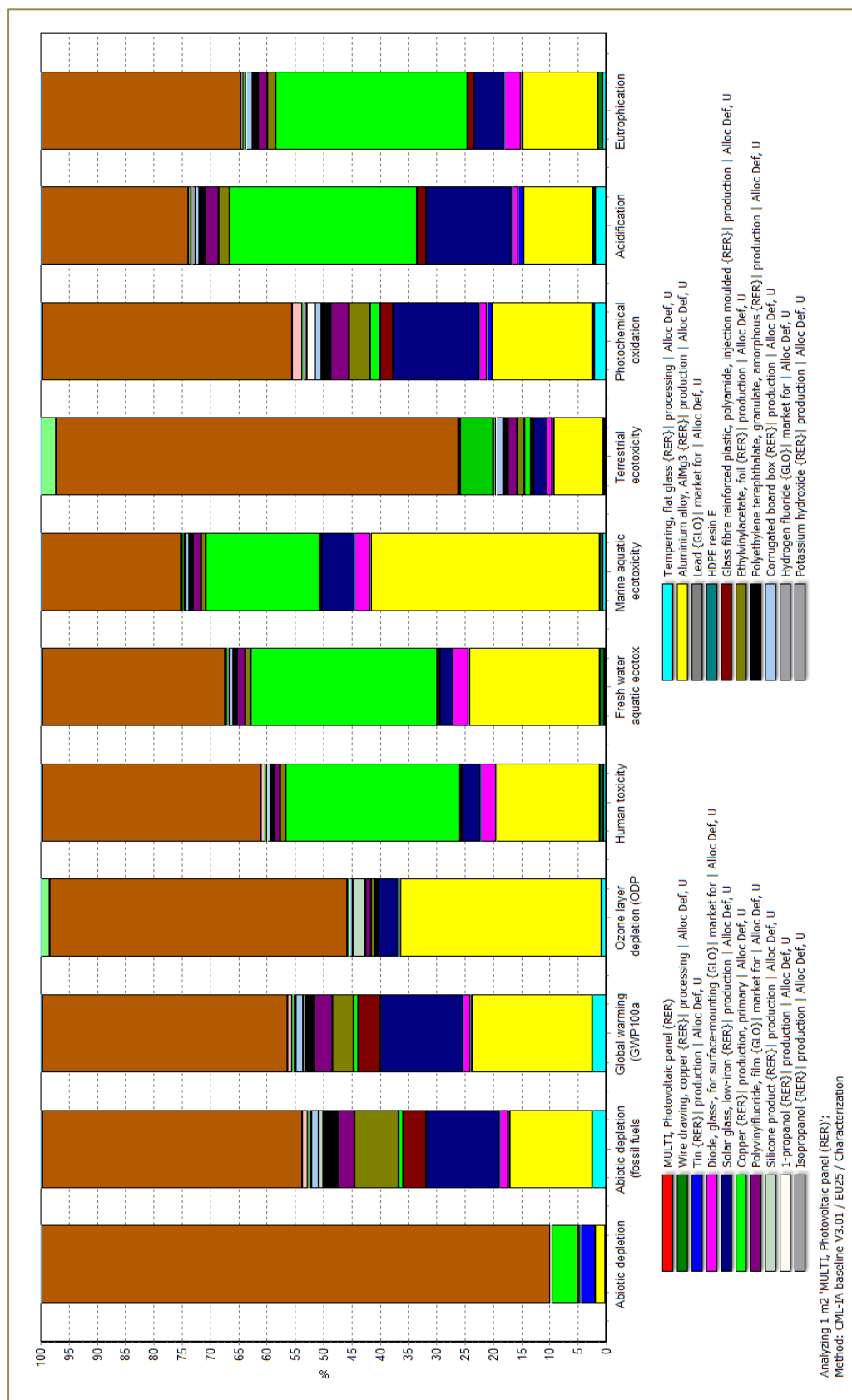
Multikristallin solcell

Samma kategori som för de tre solcellerna ovan är det enbart en mittpunktskategori som dominerar, *Akvatisk ekototoxicitet i marin miljö* vilket illustreras i Figur 25. Där aluminium, koppar och de tidigare processteg (brun färg) dominerar.



FIGUR 25 VISAR I VILKA MITTPUNKTS KATEGORIER MULTIKRISTALLINA CELLEN PÅVERKAR (BRUN), LJUSGRÖN STÅR FÖR ELEKTRICITET FRÅN NÄT

På samma sätt som de monokristallina utgör de tidigare processtegen (brun färg) den stor del för alla mittpunktskategorier. Aluminium har också signifikant påverkan i flera kategorier lika så elektriciteten som grön färg se Figur 26.



FIGUR 26 ILLUSTRERAR HUR MATERIALEN I PANELEN FÖR MULTIKRISTALLIN SOLCELL PÅVERKAR DE OLIKA KATEGORIENA

5.4. Koldioxidekvivalenter från tillverkningen

Från *Global uppvärmning* kategorin hämtades hur många koldioxidekvivalenter som har producerats under tillverkningen för en kvadratmeterssolcell som erhålls i Tabell 8.

TABELL 8 ETABLERAS HUR MYCKET CO2EKV. SOM ERHÅLLITS VID TILLVERKNINGEN

	CdTe	CIGS	Mono	Multi
Mängd koldioxidekvivalenter [Kg CO ₂ ekv/ m ²]	23,4	34,6	263	168

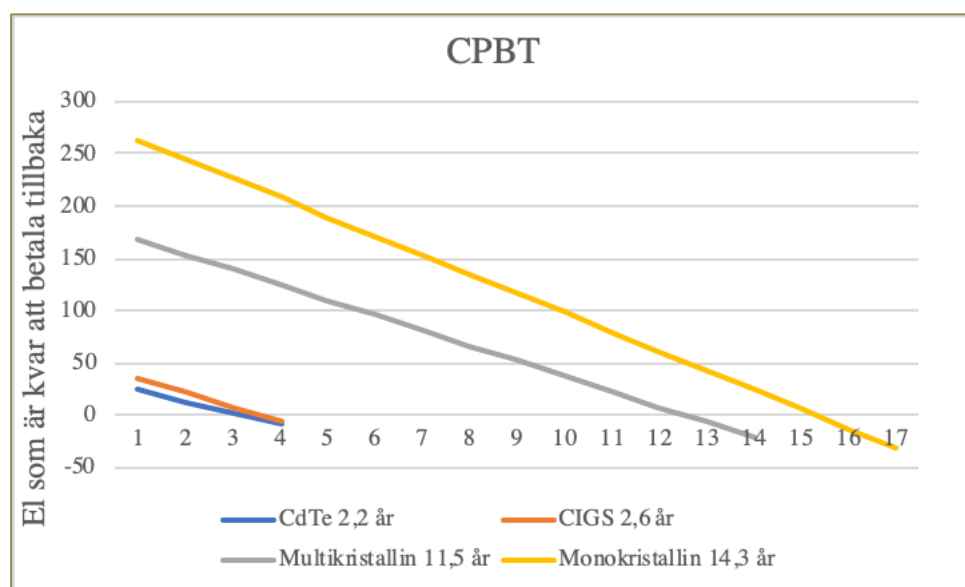
5.5. Koldioxidåterbetalningstid

Koldioxidsåterbetalningstiden (CPBT), varierar mer mellan modulerna än EPBT, vilket etableras i Tabell 9. Monokristallina solcellen producerar mest el men släpper också ut mest koldioxidekvivalenter i tillverkningen och erhåller också högst CPBT.

TABELL 9 ETABLERAR KOLDIOXIDSÅTERBETALNINGSTIDEN FÖR DE FYRA SOLCELLERNA

	CdTe	CIGS	Multi	Mono
CPBT [år]	2,2	2,6	11,5	14,3

I Figur 27 illustreras hur mycket av koldioxidekvivalenterna som är kvar att betala tillbaka varje år.



FIGUR 27 ILLUSTRERAR HUR SNABBT KOLDIOXIDSÅTERBETALNINGSTIDEN BETALAS TILLBAKA

5.6. Känslighetsanalys

Vid simulering och beräkningarna har olika antaganden gjorts som haft inverkan på resultatet. En känslighetsanalys konstrueras för att se hur stor inverkan antagandena har haft.

Energiåterbetalningstid

Hur mycket el som produceras per år är beräknad när solcellen är monterad i bästa utgångsläge. Hur bra solcellerna producerar el har en direkt påverkan hur låg EPBT blir. Olika montage ger olika hög elproduktion och i Tabell 10 illustrerar hur olika montage avviker från optimal elproduktion med Göteborgs solinstrålning.

TABELL 10 BESKRIVER HUR MYCKET EPBT AVVIKER FRÅN DET OPTIMALA FÖRHÅLLET, 40 GRADER RAKT I SÖDERLÄGE VID OLIKA MONTAGE

EPBT	Modulerna
40 grader, syd	100%
0 grader rakt i syd	119%
50 grader rakt i syd	101%
Sydväst 40 grader	108%
Sydöst 40 grader	110%

Koldioxidsåterbetalningstid

Koldioxidsåterbetalningstiden påverkades, på samma sätt som EPBT, beroende på hur solcellerna var monterade syns i Tabell 11.

TABELL 11 VISAR HUR CPBT AVVIKER I PROCENT NÅR MONTAGET INTE ÄR MONTERAT OPTIMALT.

	Modulerna
0 grader rakt i syd	119%
50 grader rakt i syd	101%
Sydväst 40 grader	108%
Sydöst 40 grader	110%

Olika elmix

Den elmix som valt att beräkna med var nordisk medel med utsläppsvärde på 0,106 kg CO₂ekv per kWh. Andra alternativa elmixar att räkna med hade kunnat varit svensk eller europeisk elmix, marginaler för ren kolkondens eller miljömärkt el. Beroende på vilken elmix man väljer kommer CPBT och EPBT ändras, antingen längre tid eller kortare tid. Beroende på vilken man väljer avviker resultaten olika mycket, från Tabell 12 erhålls med hur många procent de kan avvika.

TABELL 12 SKILLNAD I EPBT OCH CPBT BEROENDE VAD MAN ERSÄTTER SIN SOLEL MED. (ANDREAS)

CPBT	Total klimatpåverkan [CO ₂ ekv/kWh]	Ändringen i % för EPBT och CPBT beroende på elmix
Bra miljöval	0,002	5300%
Svensk elmix	0,049	216%
Europeisk elmix	0,516	-79%
Marginal kol	1	-89%

Transport i produktion och till investerare

I studien är det beräknat att de fyra solcellsmodulerna är tillverkade i Europa. För att se hur mycket transporten påverkar med att köpa solceller från Kina beräknas utsläpp från transport via containerfartyg och lastbil från Hong Kong till Göteborg, då är det antaget att alla steg för en kristallin solcell tillverkas på samma plats i Kina.

Tunnfilmssolceller

En lastbil full med solcellsmoduler är beräknat kan lasta 20 ton i moduler. En CIGS modul väger cirka 12 kg/m², transporten producerar koldioxidekvivalenter per kvadratmetersolcell enligt ekv:

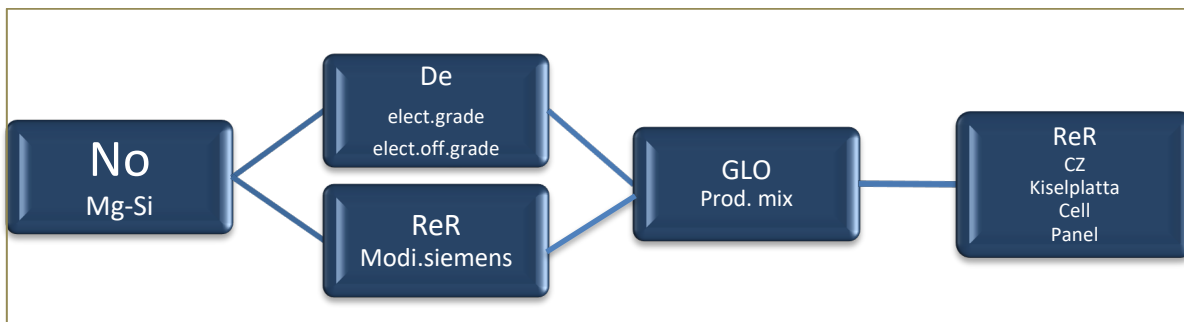
$$CO_2eq [kg]/m^2 = 9706/(20000/12)$$

Tunnfilmssolceller har bara ett processteg, därför och har därför bara en transportsträcka; från produktionssteget till investerare. Det är beräknat att CdTe och CIGS tillverkas i Danmark och skickas till Göteborg, Sverige till investerare. Sträckan är 315,43 kilometer vilket ger 816,9 kg koldioxidekvivalenter. En CdTe-modul väger runt 23 kg per kvadratmeter vilket innebär att transporten kostar enligt nedanstående ekv i koldioxidekvivalenter:

$$CO_2eq [kg]/m^2 = 816,9/(20000/23)$$

Kiselsolceller

Transporten är beräknad från ländernas huvudstäder, för ReR (Europa) och GLO (Global) är beräknad från Berlin, Tyskland som är störst i Europa att tillverka moduler och celler, enligt Figur 28. Efter tillverkningsprocessen antas modulerna skickas till investerare i Göteborg, Sverige. Simuleringen har gjorts i transportmeasures³ när en Rigid truck på 14-20 ton har angetts som fordon, lastbilen antas vara maxfylld till 20ton.



FIGUR 28 BESKRIVER I VILKET LAND DE OLIKA PROCESSERNA FINNS I EUROPA

De koldioxidekvivalenter som produceras vid transporten mellan länderna etableras i Tabell 13.

TABELL 13 ETABLERAS ANTAGEN STRÄCKA MELLAN PROCESSERNA OCH UTSLÄPP VID TRANSPORT MED LASTBIL

	No-De	No-ReR (genom danmark och rostock)	De-GLO	ReR-GLO	GLO-RER	RER- SWE	1 full lastbil 20 ton
Sträcka [km]	602.87	1341.56	750.67	0	0	1053.06	
CO ₂ eq [kg/lastbil]	1561	3474	1944			2727	9706

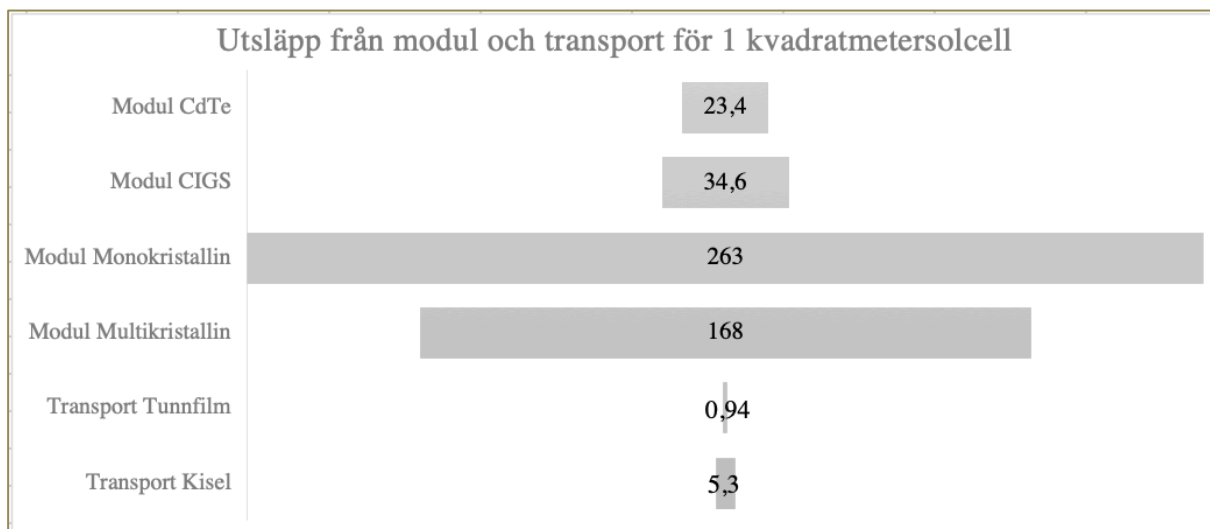
För att ta reda på om CO₂ekv. utsläppen är höga eller låga för europatillverkade solcellsmoduler undersöktes hur mycket utsläpp som producerades vid transporten. Utsläppen erhålls i Tabell 14.

TABELL 14 UTSLÄPP FRÅN TRANSPORT MED LASTBIL NÄR SOLCELLERNA ÄR TILLVERKADE I EUROPA

	Kiselsolceller	Tunnfilmssolceller
Utsläpp [kg CO ₂ ekv/m ² solcell]	5,3	0,94

³ Onlinemätverktyg <https://www.transportmeasures.org/ntmcalc/v4/basic/index.html#/>

Jämförelse mellan transportens utsläpp från europatillverkade solceller och tillverkningsprocessen i Europa erhålls i Figur 29 där det tydligt etableras att transporten utgör en mycket liten del förhållandevis till tillverkningen.



FIGUR 29 SKILLNADEN I PRODUCERADE KOLDIOXIDEKVIVALENTER MELLAN TRANSPORT OCH MODULTILLVERKNING

Beroende på var ifrån man köper solcellen kommer transportmedel och transportsträckorna variera och påverka utsläppen. För att få en känsla om hur mycket utsläppen ökar för transporten när man köper kinatillverkade solceller erhålls nedanstående värden i Tabell 15.

TABELL 15 UTSLÄPPSVÄRDEN FRÅN KINA OCH TRANSPORT TILL KUND I GÖTEBORG

	Hong Kong – Göteborg (Båt)	Hong Kong – Göteborg (Lastbil)
Sträcka [km]	18 242	11 505
Utsläpp [kg CO ₂ ekv/m ²]	6 583	17 874

BOS

För att se hur mycket CPBT ökar genom att använda de schblon värdena som nämndes i inledningen, hur mycket BOS stod för av den totala miljöpåverkan hos en CdTe modul och en monokristallin solcell, antogs 50 procent av den totala miljöpåverkan i GWP påverka tunnfilmssolcellerna och 15 procent påverka kiselcellerna.

Förhållande till varandra påverkas det inte utan enbart ökar CPBT enligt Tabell 16.

TABELL 16 VISAR NYTT CPBT NÄR BOS ÄR INKLUDERAT

	CdTe	CIGS	Mono	Multi
CPBT [år]	4,4	5,2	16,4	13,2

6. Diskussion

Från Rhino kunde den optimala elproduktionen tas fram genom att simulera vilken lutning och väderriktning modulerna bör ha för att optimera mängd infallande solinstrålning på modulen. Det bästa montaget var 40 grader i rakt söderläge enligt Tabell 6. Om man som investerare har två tak att välja mellan för solcellsmontage som antingen står en aning väst eller en aning öst bör man välja det tak som är åt väst, på grund utav att den tar in mer solstrålning än ett tak åt öst. Att inte ha någon lutning alls var det sämsta montaget och då blev återbetalningstiden längst.

Elproduktionen är beräknad från specifika moduler med en viss verkningsgrad och maxeffekt. Det är viktigt att ha i bejakande att alla solceller inte har samma modulverkningsgrad, det gäller för alla solcellstekniker. Rhino simulerade infallande solinstrålning med Göteborgs solinstrålning för ett godtyckligt år. Det innebär att solstrålning varierar från år till och därför är resultaten en fingervisning om vad solcellerna kan producera, men de kan både producera mer eller mindre.

Alla fyra solcellerna betalar tillbaka den el som används i produktionen under mindre än två år, för tunnfilmssolcellerna tar det så kort tid som fyra månader. Återbetalningstiden för el är kortast för tunnfilmsolcellerna än för kiselcellerna trots att tunnfilmsolcellerna hade betydligt lägre verkningsgrad och maxeffekt. Även om kiselcellernas maxeffekt och effektivitet skulle öka, har de svårt att få en snabbare återbetalningstid än tunnfilmsolcellerna. Det beror på att elanvändningen är så pass mycket högre för kiselcellerna. Energiåterbetalningstiden beräknades enbart från elen, hade all energianvändning i produktionen tagits med hade det blivit ännu längre återbetalningstider och med stor sannolikhet hade kiselcellerna blivit än mer högre jämfört med tunnfilm då de också använder betydligt mer värme än de.

Klimatpåverkan bestämdes genom att analysera elva stycken miljö kategorier från simuleringarna i SimaPro, där de tagit hänsyn till utsläppen som producerats med de ingående materialen och energin för att tillverka en kvadratmetersolcell från respektive teknik. Resultaten etablerar sig i Figur 19–26 där det illustreras att *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö* blev störst för alla fyra solceller. Det innebär att solcellsproduktion producerar en viss mängd 1,2 DB ekvivalenter i förhållande till landets totala 1,2 DB ekvivalents utsläpp. I jämförelse med exempelvis global uppvärmningen, där CO₂ ekvivalenterna som produceras vid solcellsproduktionen i jämförelse med landets totala CO₂ ekvivalenter är lägre än för den andelen från *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö*. För tunnfilmssolceller är det nästan den enda kategorin som berörs, för kiselcellerna påverkas också *Global uppvärmning* och *Abiotisk utarmning* men i lägre utsträckning. Varför inte tunnfilmssolcellerna påverkar den *Globala uppvärmningen* är troligtvis för att de använder så pass lite elektricitet vilket verkar vara den stora boven för att påverka den kategorin, desamma kan sägas om kategorin *Abiotisk utarmning*, där elektriciteten också är en stor påverkande faktor vilket etableras i Bilagorna. De elva olika kategorierna kan inte jämföras mellan varandra då de påverkar olika områden på olika sätt, det skulle innebära att man först måste avgöra vilken kategori som är värst.

CdTe

I en CdTe-modul består glas av 95,99% av materielinnehållet, etylen-vinylacetat (EVA) av 1,84% och koppar av 0,04 %, om kranvattnet räknas bort. Från Figur 19 utgör respektive material 70, 5, 15 procent av *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö*. Glas är fortfarande det material som påverkar mest. Trots koppar bara står för 0,04 procent av materielinnehållet utgör det ändå 15 % till *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö* kategorin. Från normaliseringen i Figur 20 utgör GWP för CdTe bara för en bråkdel av totala utsläppet i Nederländerna. Det betyder således inte att kategorin släpper ut lite CO₂ekv. Karakteriseringen visar att även här utgör glas och EVA en stor procentandel av utsläppen.

CIGS

I en CIGS-modul består glas av 53,15% av materielinnehållet, tenn av 0,03 % och molybden av 0,02 %, om kranvattnet räknas bort. Från Figur 22 utgör det av 20, 15 och 43 procent av *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö*. Flytande kväve som utgör 70,4 procent av materielinnehållet påverkar alltså inte den kategorin. Molybden utgör bakkontakten för solcellen och ses som plussidan (likt ett batteri), små mängder av ämnet gör ett stort avtryck för den marina miljön. Samma sak gäller för tenn men inte i lika stor utsträckning. Från normaliseringen, Figur 21, utgör GWP för en än mindre skillnad än CdTe modulen. En stor variation av ämnen ger en gemensam påverkan till denna kategori. Glas, EVA och kisel är tre material som ger en större påverkan.

Monokristallin

I en monokristallin solcell påverkar aluminium och koppar för den stora delen hos kategorin *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö*, där de utgör 40 respektive 20 procent vilket etableras från karakteriseringen i Figur 24. Från normaliseringen i Figur 23 är det fler kategorier som har en relativ påverkan jämfört med tunnfilmssolcellerna. I kategorin *Global uppvärmning* utgör elektriciteten den största delen med 24 procent, aluminium är näst störst med 15 procent och glas till modulen utgör 10 procent. Elektriciteten som påverkar är i reningssteget CZ-processen där det använts europeisk elmix.

Multikristallin

Figureerna som visar den multikristallina normaliseringen utgör likt en monokristallin solcell att det är fler kategorier som har en relativ stor påverkan på miljön. Aluminium, koppar, glas och metallpasta påverkar mittpunktskategorin *Akvatisk ekotoxicitet i marin miljö* med 35, 15, 10, 8 procent vardera som illustreras i Figur 25. I samma figur erhålls att aluminium är också störst vid utsläpp av koldioxidekvivalenter i kategorin *Global uppvärmning* där den står för 20 procent, glas står för 15 procent och elektriciteten står för 14 procent.

Alla fyra solceller hämtar igen den krävda elkonsumtionen från tillverkningen på mindre än två år. Det är tydligt att tunnfilmssolceller har en bättre återbetalningstid för koldioxidekvivalenter än vad kiselceller har, oavsett solcell. Att jämföra solcellerna ur ett klimatperspektiv borde göras med CPBT istället för EPBT, detta för att då tas hänsyn till klimatpåverkan för elen och inte bara dess elanvändning. Eftersom EPBT var så pass låg för alla fyra solcellerna också finns det ingen solcell som är jättemycket sämre än någon annan.

För tunnfilmssolcellerna är förhållandevis utarmningen av abiotiska ämnen låg med tanke på att det är mycket tungmetaller i, eftersom både *Abiotic Depletion* eller *Abiotic Depletion Fossil fuel* är låg.

6.1. Känslighetsanalys och datahantering

Datan som erhålls i inventeringslistorna i Bilagorna är från Ecoinvent för en specifik solcell och för en specifik tillverkningsmetod. Det finns flera olika sett och varje tillverkning är unik. Eftersom tillgång till data lik denna är svåråtkomlig gör det också att det är svårt att bedöma om det är typiska medelvärden för tillverkningen eller om resultaten är i över eller underkant, svaren kan således skifta åt två håll. Ecoinvent är en stor databas som används världen över i till både forskning och konsultuppdrag, därför kan det antas att det trovärdiga indata för tillverkningen. Solcellsmarknaden är relativt ny och eftersom den fortfarande växer väldigt mycket finns det olika sätt att tillverka samma typ av solcell samt att det pågående uppdragas nya metoder. Därför kan vald tillverkningsprocess och materielinnehåll inte vara helt uppdaterad till den bästa valda metoden.

För att få en rättvis bild av klimatavtrycket vid installering av solceller är det lämpligt att inkludera hela systemet och inte enbart solcellsmodulen. Balance of System (BOS) omfattar allt material i ett solcellssystem som inte tillhör själva solcellsmodulen, till exempel kablar, inverterare, montage. BOS varierar beroende av solcellstyp.

Databasen CML-IA användes som har sin referens från Nederländerna, landet har en väldigt fossilintensiv elmix. När Sveriges elproduktion är nästintill fossilfri består Nederländernas elproduktion utav cirka 80 procent. Det kan vara en anledning till varför normaliseringsfigurerna i avdelning 4.3 visar att *Global uppvärmning* är förhållandevis väldigt låg.

Beroende på vilken elmix som väljs i metoden ger det stora skillnader i CPBT och i EPBT. Desto mer förnybar och mindre fossila bränslen som används i elproduktionen och skickas ut till nätet, desto "renare" blir elmixen. Det blir alltså längre återbetalningstid för koldioxidekvivalenter ju renare elmix används i metoden och vice versa. Motiv till att investera i solceller när man beräknar CPBT och EPBT med "smutsigare" elmix blir alltså större, det är således viktigt att vara källkritisk när man får presenterat dessa nyckeltal för en.

Eftersom det var europatillverkade solceller som beräknades blir också transportutsläppen relativt små då det är relativt korta avstånd, tunnfilmssolcellerna tillverkades i Danmark och kiselcellerna producerades mestadels i Norge samt Tyskland och därefter en leverans till Göteborg. Andelen utsläpp från transporten är således små vid tillverkning i Europa jämförelsevis vad tillverkningen släpper ut. De kristallina solcellerna har större utsläpp i transporten än tunnfilmssolcellerna. Transporterna antogs vara med en lastbil som fick plats med 20 ton moduler. Skulle tillverkningen vara i Kina ökar också transportutsläppen kraftigt. Har inte utsläppsvärden för solcellstillverkning i Kina tagits fram, men i Tabell 10 kan man se utsläppsvärden från transporten från Kina till

Göteborg. Lika mycket material skulle användas om tillverkningen placerades i Kina den stora skillnaden skulle vara elmixen som används från nätet. Där Kinas elproduktion mestadels består av kolkraft.

6.2. CPBT

Det tar 11,5 och 14,3 år att betala tillbaka de producerade koldioxidekvivalenter för multi -respektive monokristallina solcellen. Om den tekniska livslängden är satt till 30 år är det nästan halva dess livslängd, detta när man räknar med att den el som annars skulle köpas in från elnätet är nordisk elmix. Det är alltså inte helt självklart att i Sverige med dessa förutsättningar investera i kiselsolceller. Att välja att ersätta med nordisk elmix är inte heller ett självklart val att göra vid montering i Sverige, att köpa in el med avtal "Bra Miljöval" innebär att återbetalningstiden blir 53 gånger längre. En kiselsolcell tillverkad i Nordeuropa transporterad till Sverige och oavsett livslängd hinner alltså inte betala av sin CO₂ekv-återbetalningstid. Enkla beräkningar i känslighetsanalysen påvisar också att oavsett vilken elmix som räknas med kommer en Kina-tillverkad kiselsolcell aldrig heller att kunna återbetala inom livslängden. Men att använda kiselsolceller i ett land med sämre elmix blir det alltså mer motiverat.

För CdTe och för CIGS så var CPBT betydligt lägre, 2,2 respektive 2,6 år. De får på samma sätt som för kiselsolcellerna också svårare att motivera en investering om elmixen som ersätts med är från "Bra Miljöval". För CIGS skulle det innebära att det tar cirka 140 år att betala tillbaka, fortfarande betydligt bättre än kiselsolcellerna dock.

Det är än en gång viktigt att påpeka att endast modulen analyserad. BOS är inte inkluderat, om det hade varit det indikerar detta att återbetalningstiderna hade ökat för alla fyra tunnfilmer mellan 15 och 50 procent. Hade avfallsfasen tagits med skulle med stor sannolikhet återbetalningstider minskat på grund av återanvändning och återvinning. Investerare bör således fokusera på att modulerna efter användning blir rätt sorterade och har en så bra som möjligt avfallspolicy, då i Figur 3 man ser att många vanliga ämnen i solcellen kan nå en pik i utvinning. För kiselsolcellerna så är det samma kategorier som påverkas men lite olika ämnen som orsakar påverkan, för multikristallina solceller har elektriciteten ett stor inflytande.

Förbättringspotential i studien

I beräkningarna för LCA för CIGS-modulen har en viss mängd gallium används. Den mängden kan variera förhållandevis mycket beroende på vad tillverkarna efterfrågar. Ju mer gallium som tillsätts ökar solcellens absorptionskoefficient (som ger utslag till en högre verkningsgrad) men det betyder också att solcellen blir tjockare, vilket har andra negativa funktioner.

Att studien har utgått ifrån specifika moduler kan både ge en positiv inverkan på studien men också negativ. Varför specifika moduler valdes var för att när elproduktionen skulle varieras med fyra olika typer av moduler var så det, det enda tillvägagångssättet. Det kan ge utslag att om man efterfrågar generella värden att resultaten kan antingen vara i överkant eller underkant. För att få en mer solid studie skulle flera specifika moduler simuleras av samma solcellstyp.

En passande väg att fortsätta med studien hade vart att ta med avfallsdelen. I studien fanns inte tiden att utreda hur en avfallshantering skulle kunna påverka CPBT och i viss mån EPBT. Troligtvis hade den kunnat minskat CPBT om en effektiv hantering av avfallet hade funnits. Flera material i modulen kan återanvändas och återvinnas till nya moduler eller till nya produkter, det skulle innebära att tillverka en modul från äldre moduler skulle innebära ett mindre klimatavtryck. Olika miljömärkningar specifikt för solceller skulle också vara intressant av att gå vidare med att undersöka, detta för att än mer underlätta för att investera med att skilja de åt.

Det skulle också vara intressant att se hur återbetalningstiderna för CPBT förändras om studien hade riktat in sig på Kina-tillverkade solceller monterade i Kina. På så vis tas den stora transportsträckan bort. Det kanske skulle visa att vi bör fokusera på att tillverka våra egna solceller regionvis för att om ens möjligt att hinna betala tillbaka CPBT.

7. Slutsats

Beroende på vilken elmix man väljer att ersätta sin egentillverkade solcell med ändras CPBT. Med nordisk elmix är det motiverat att både investera i första och andra generationens solceller då återbetalningstiden är inom solcellens livslängd. Att köpa solceller tillverkade i Kina är dock inte motiverat då inte CPBT hinner att betalas igen.

Kiselsolcellerna ger högst värden och är således minst klimatvänliga vid jämförelse av de elva miljökategorierna. Det material som sticker ut är aluminium, koppar och elektriciteten. Dessa tre material influerar flera kategorier. Den kategorien gav högst utslag var *Akvatisk ekotoxitet för marin miljö* för alla fyra solcellerna. För CdTe gav glas och koppar högst utslag och för CIGS gav glas, tenn och molybden högst. För kiselsolcellerna var det glas, aluminium och koppar.

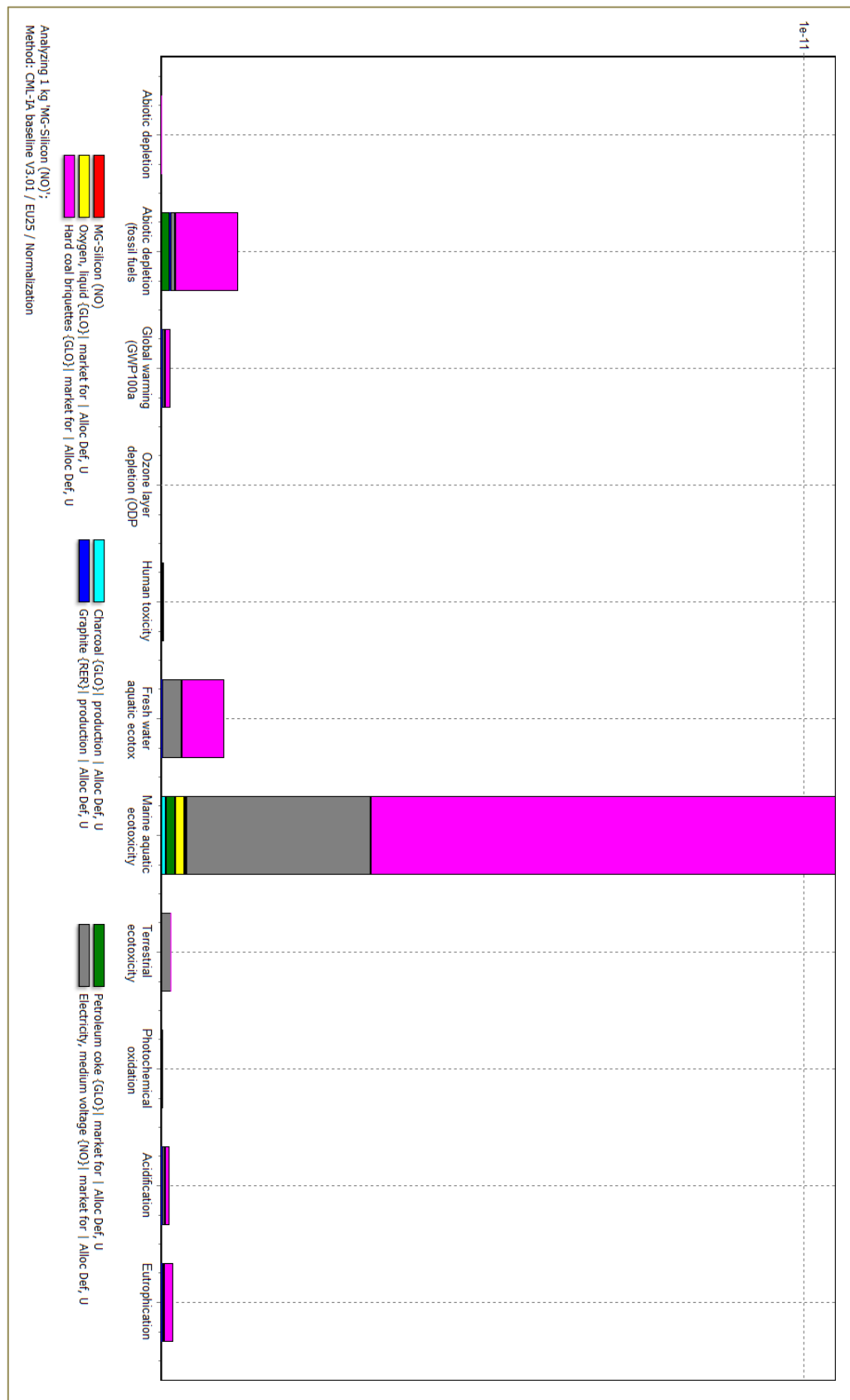
För att ge lägst klimatavtryck vid investering av solceller bör en tunnfilmssolcell väljas, då helst en CdTe. Om en kiselsolcell ska investeras i bör man undersöka vad för elektricitet som används vid produktion då den är högst influerande och speglar tydligt klimatpåverkan.

En solcell som är tillverkad i Europa betalar tillbaka de koldioxidekvivalenter som de producerar under tillverkningsfasen inom deras livslängd. Tunnfilmssolcellerna gör detta inom 3 år medans kiselsolcellerna gör det under 15 år, en tunnfilmssolcell kan därför under längre period ha minusutsläpp.

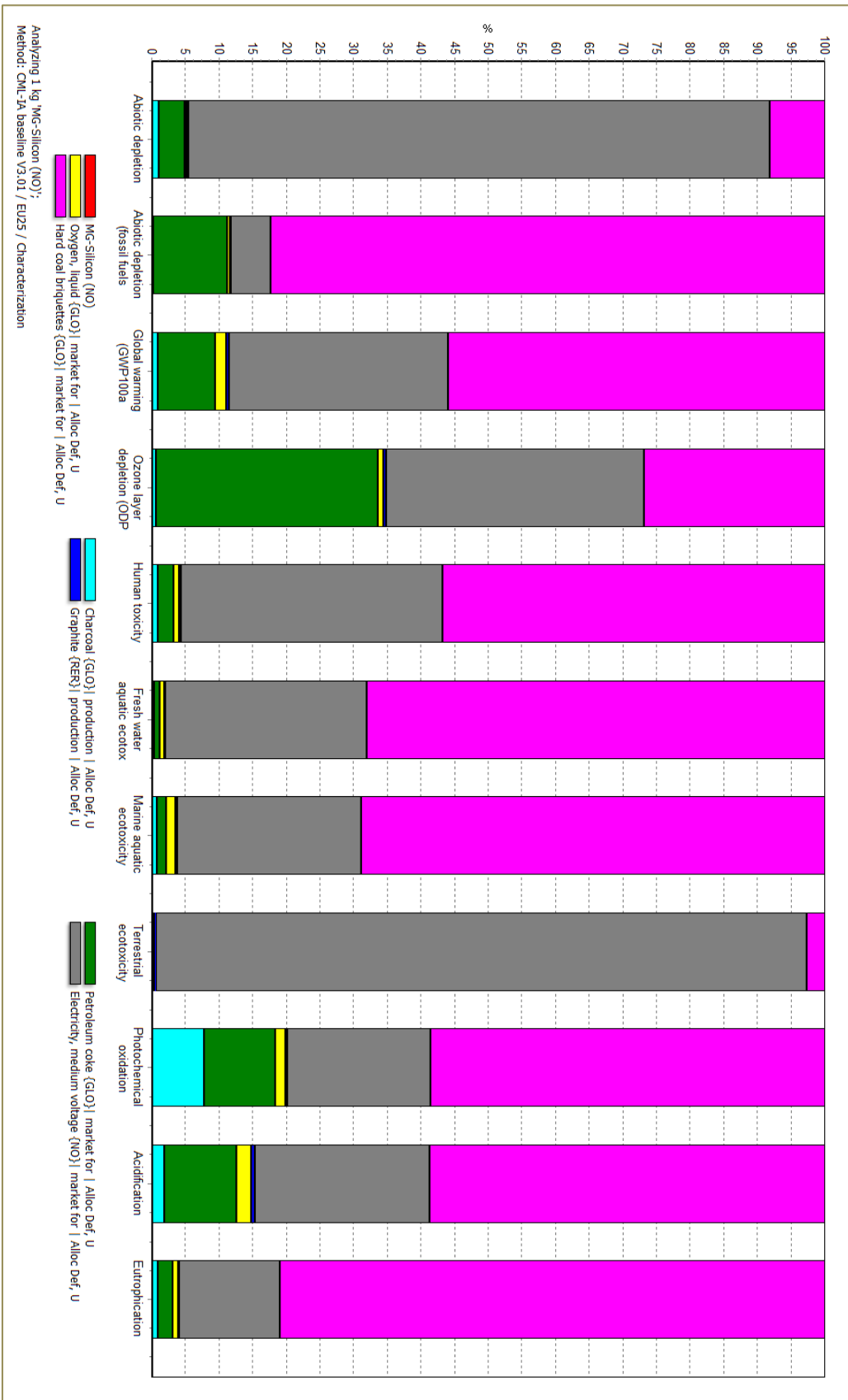
8. Bilaga

8.1. LCA-resultat

De tre första processtegen som är lika för kiselsolcellerna
 Metallurgisk kisel; MG-Si

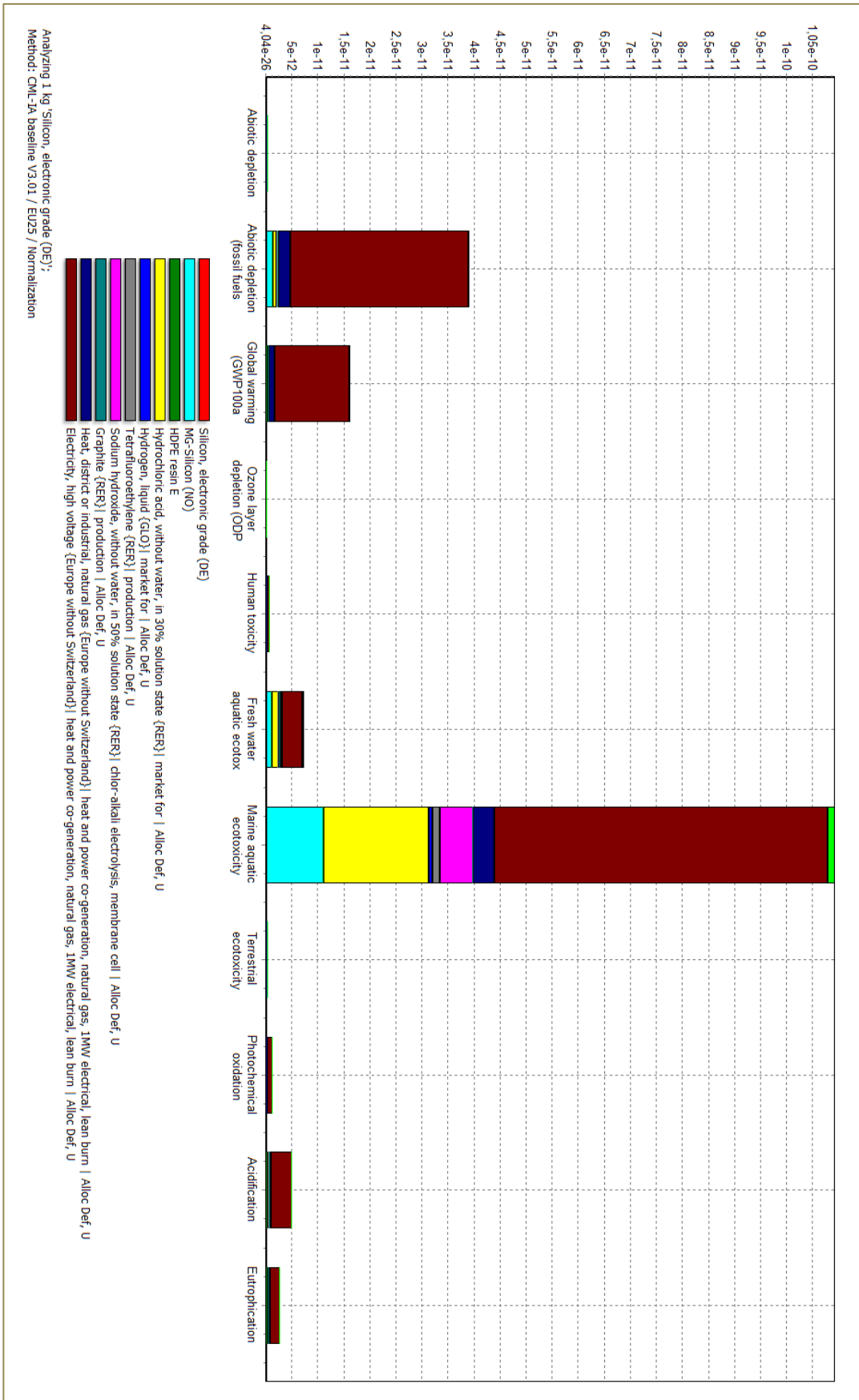


FIGUR 30 NORMALISERING

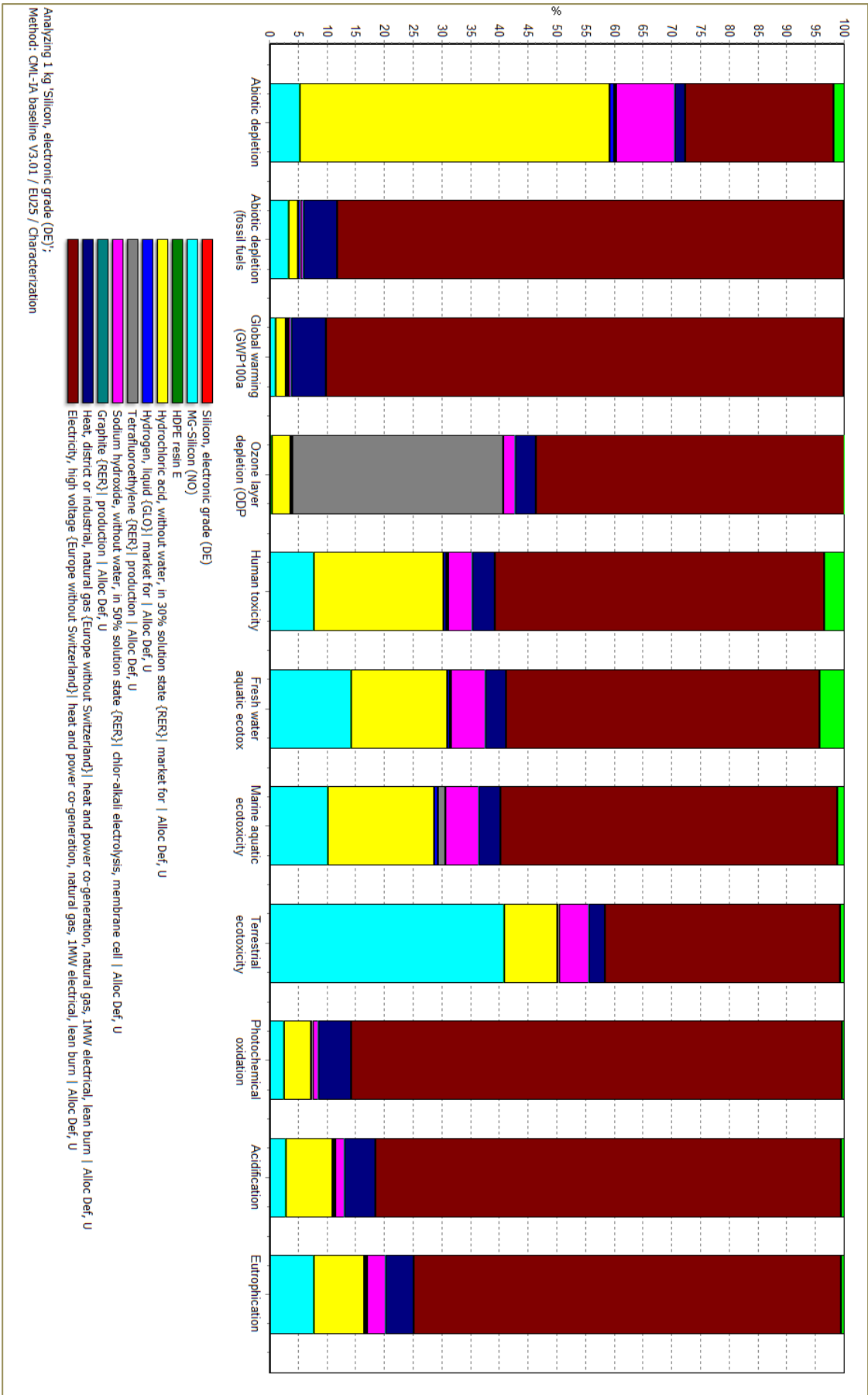


FIGUR 31 KARAKTERISERING

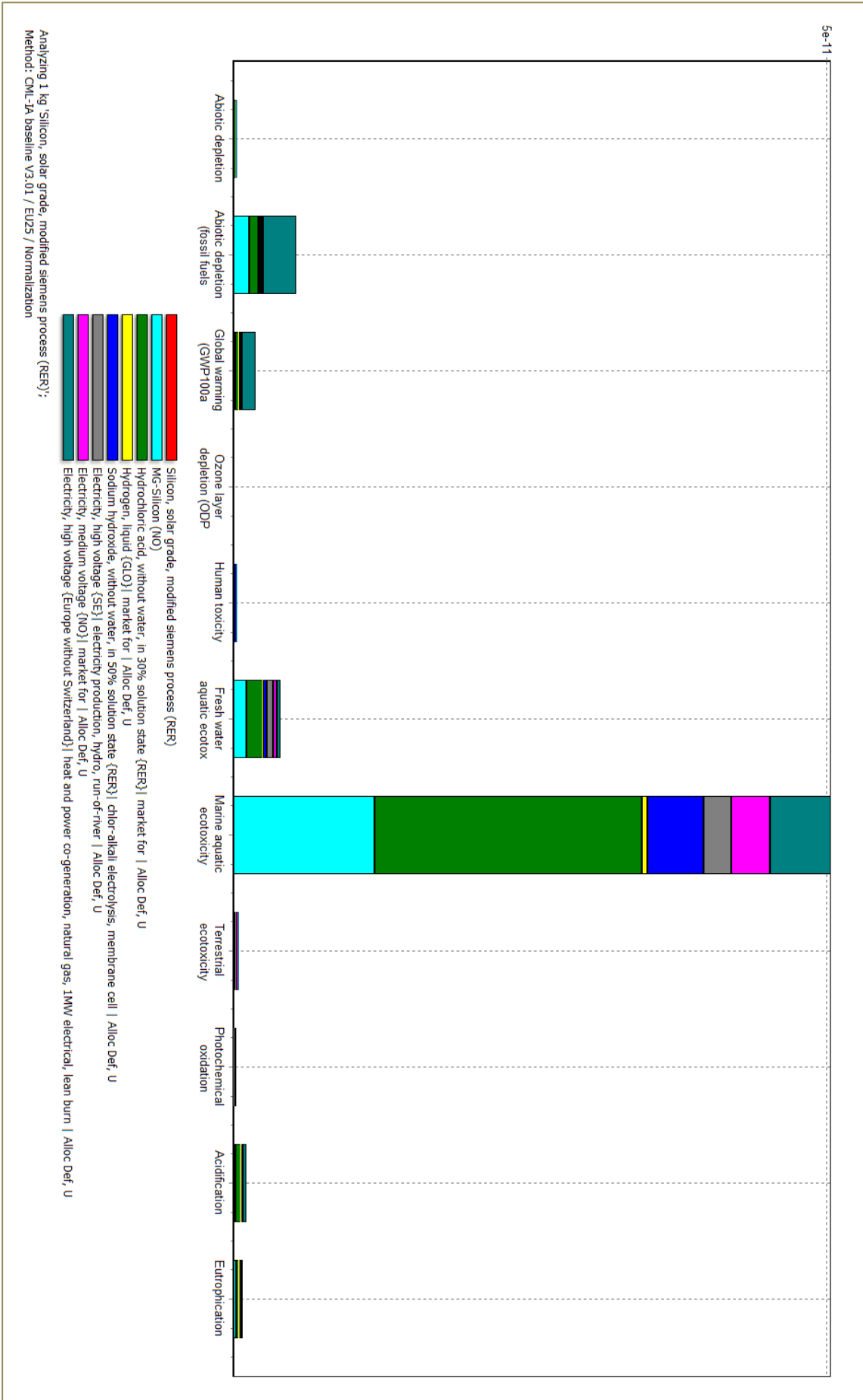
Elektrisk klassat; EG-Si



FIGUR 32 NORMALISERING

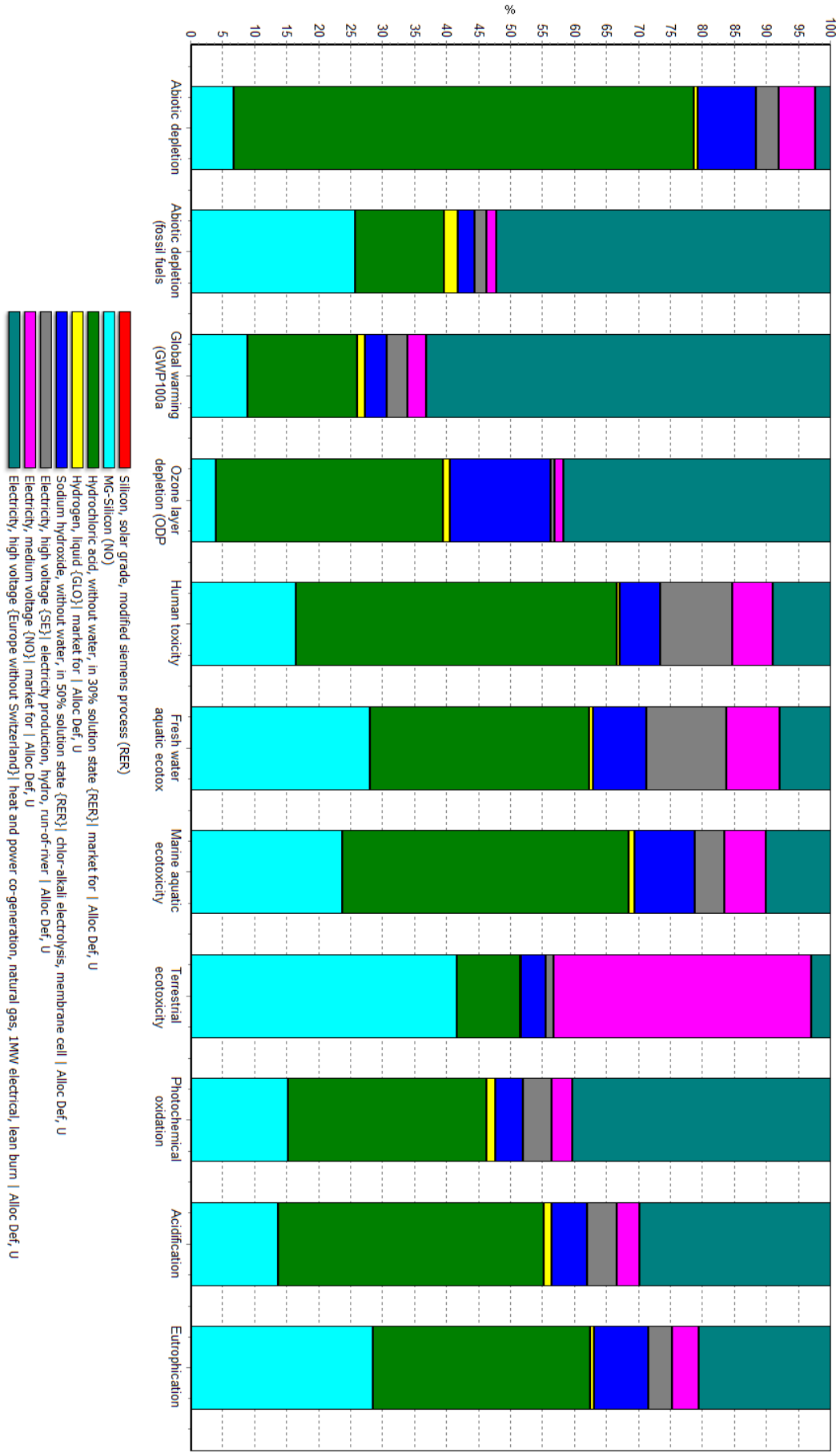


FIGUR 33 KARAKTERINGERING



FIGUR 34 NORMALISERING

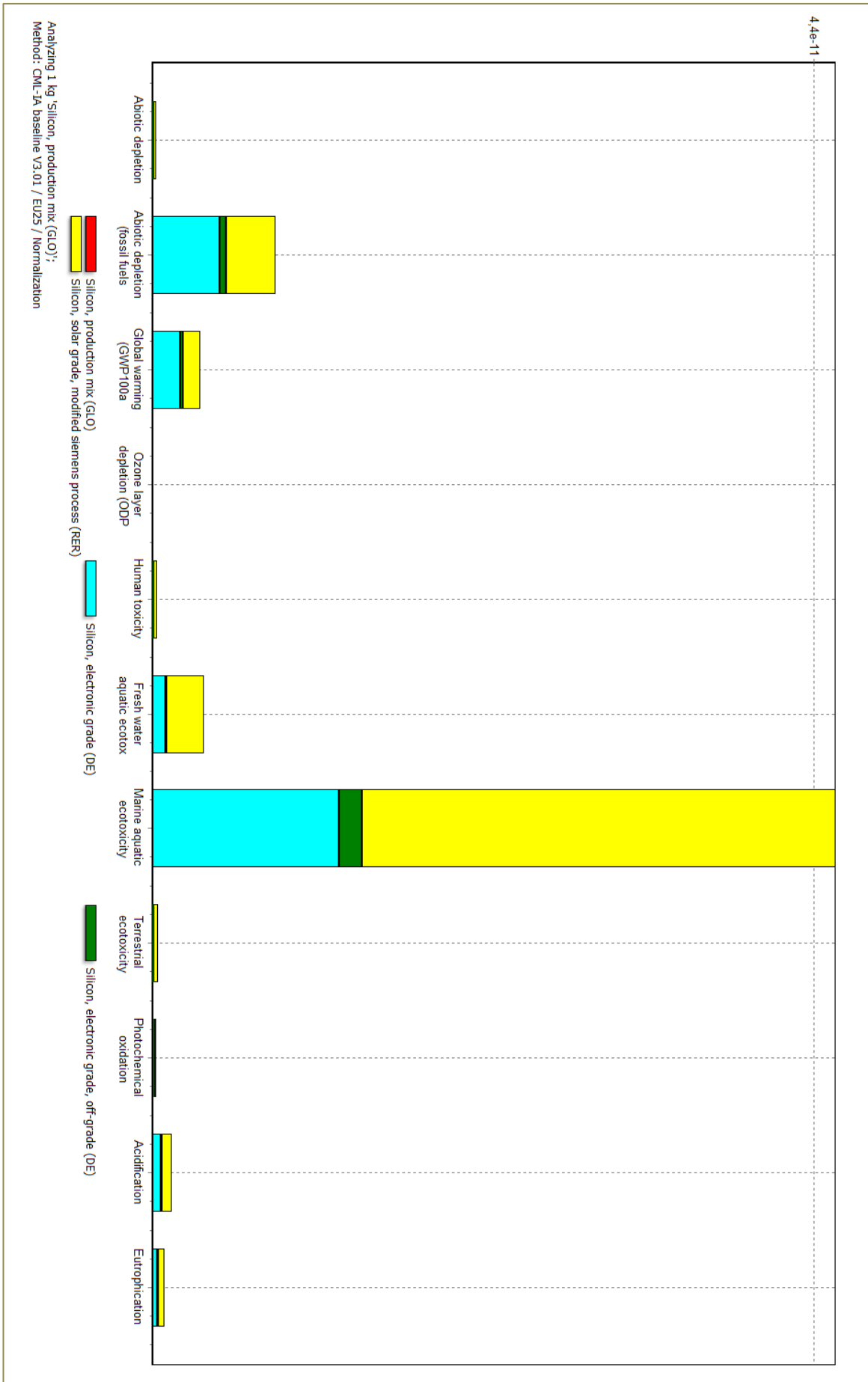
Analyzing 1 kg Silicon, solar grade, modified siemens process (RER);
 Method: CML-IA baseline V3.01 / EU25 / Characterization



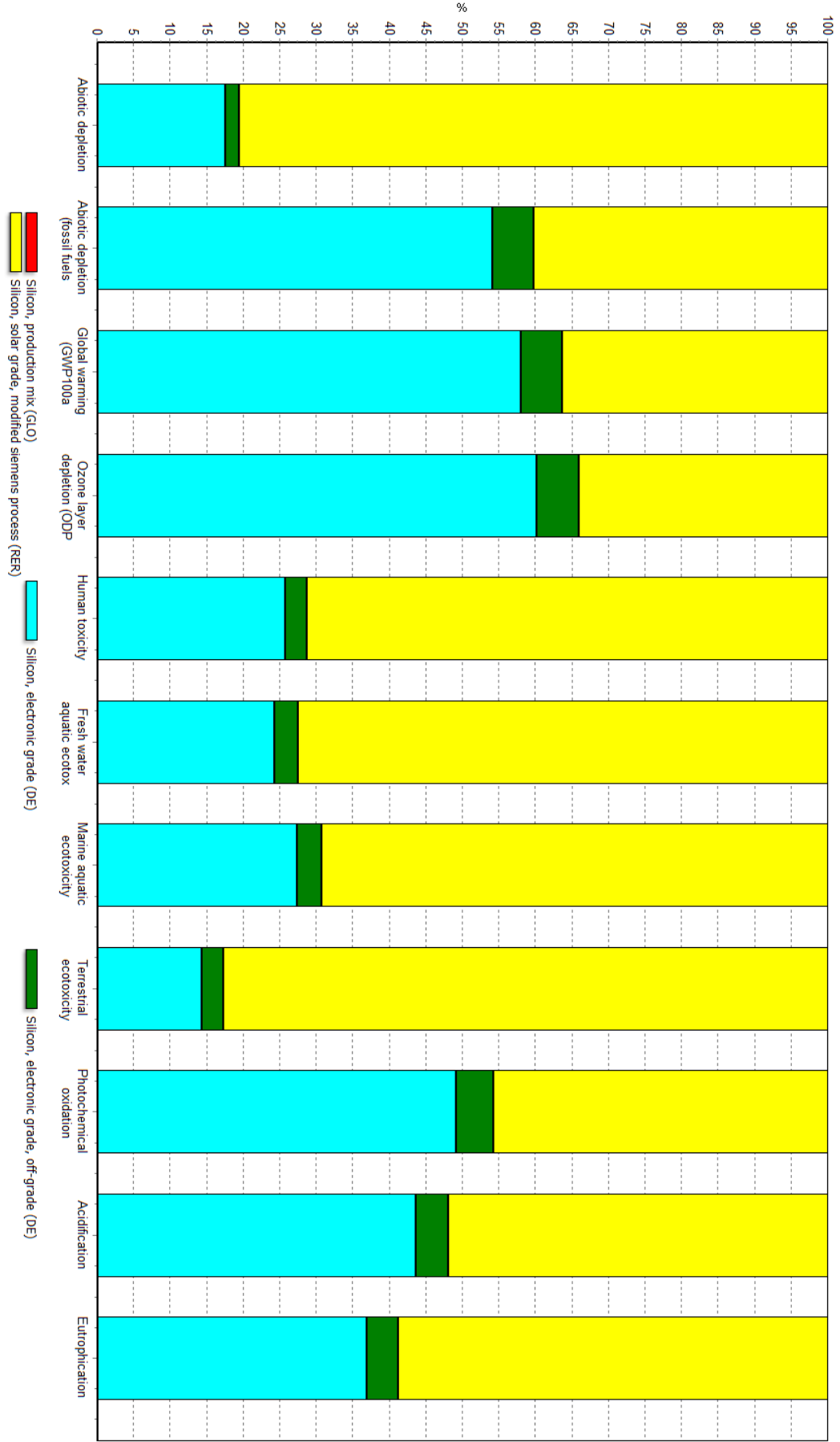
FIGUR 35 KARAKTERINGERING

Monokristallin

Kiselmix



FIGUR 36 NORMALISERING

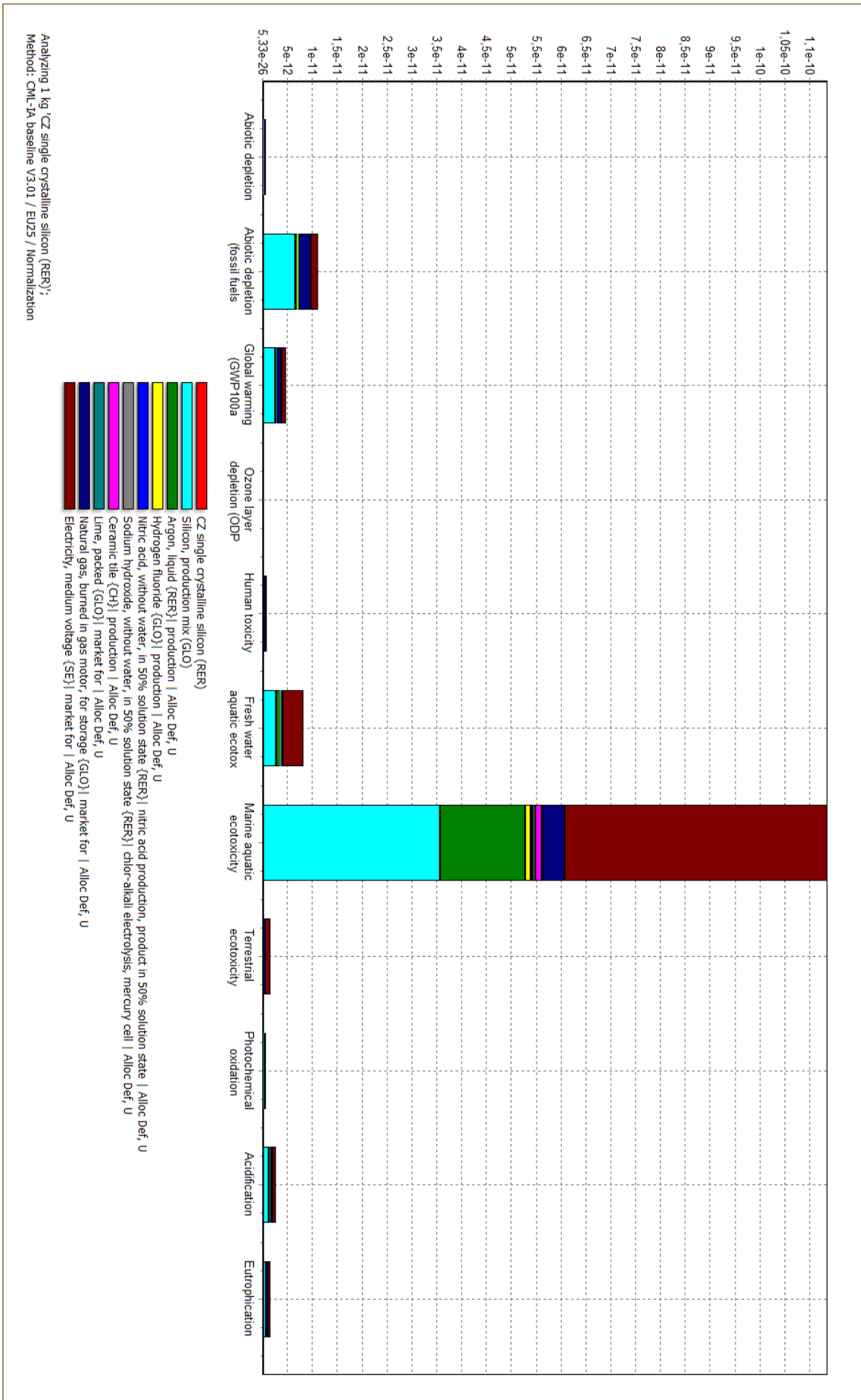


Analyzing 1 kg Silicon, production mix (GLO);
 Method: CML-IA baseline V3.01 / EU25 / Characterization

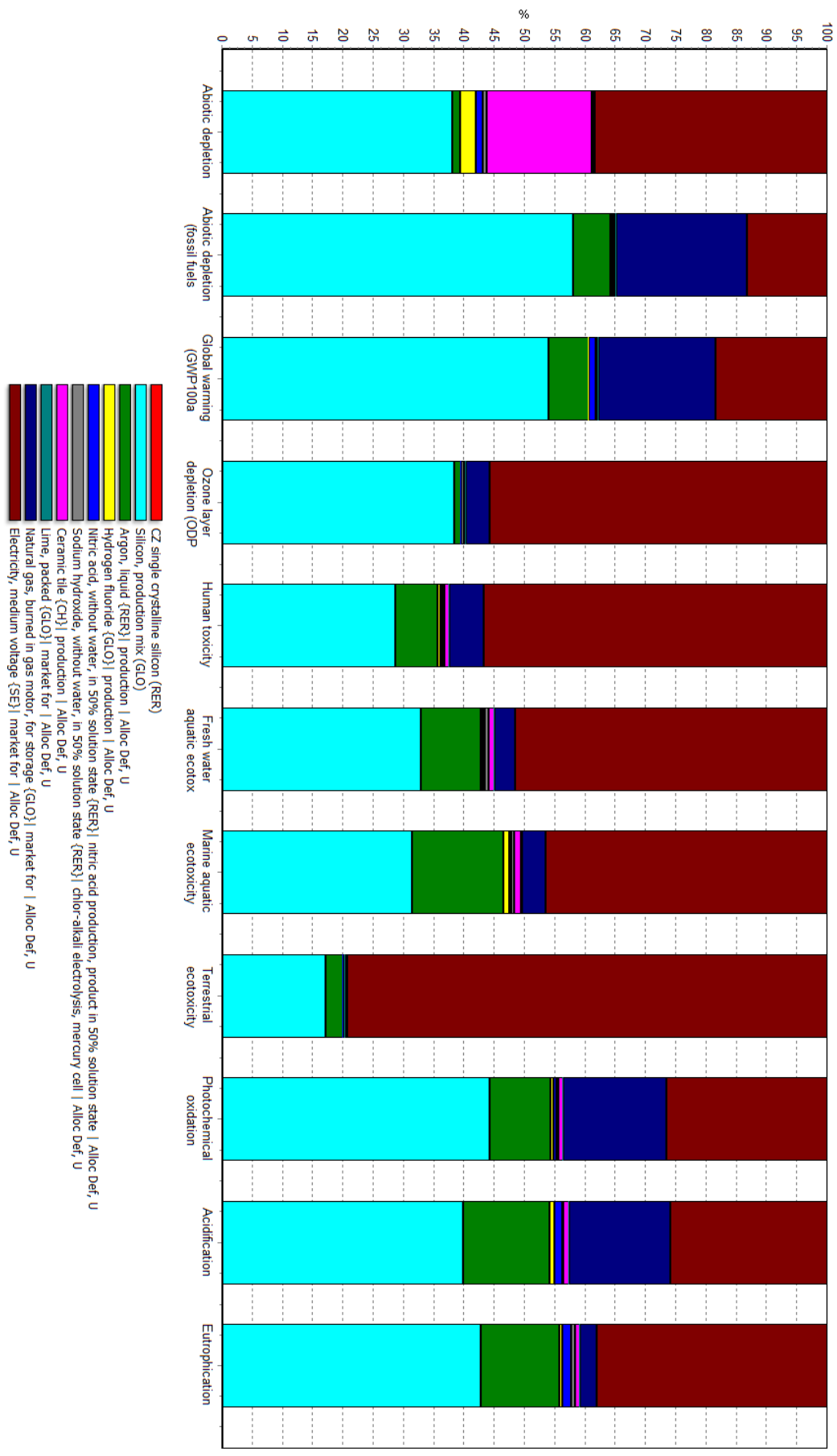
■ Silicon, solar grade, modified siemens process (RER)
■ Silicon, production mix (GLO)
■ Silicon, electronic grade (DE)

FIGUR 37 KARAKTERINGERING

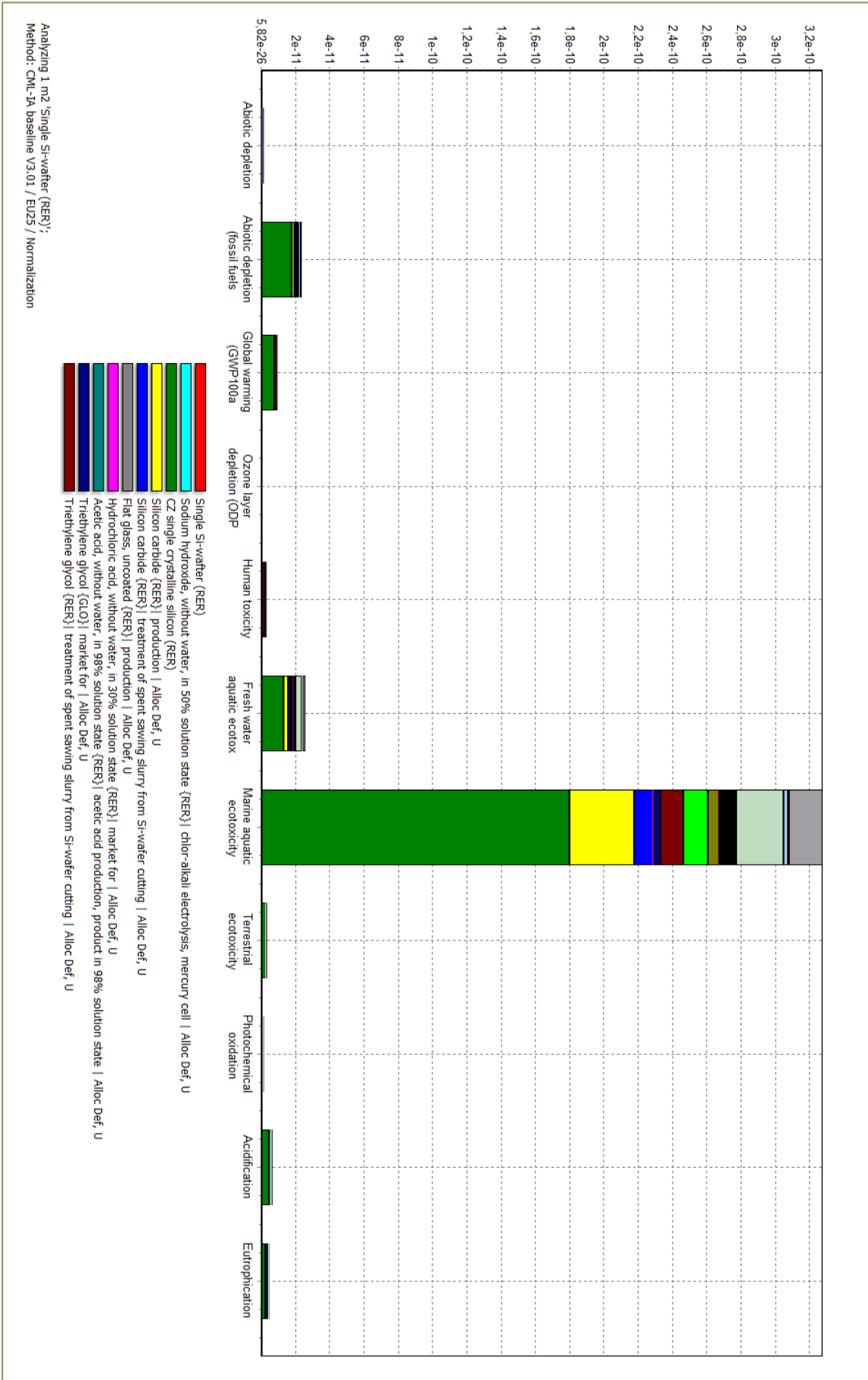
CZ-process



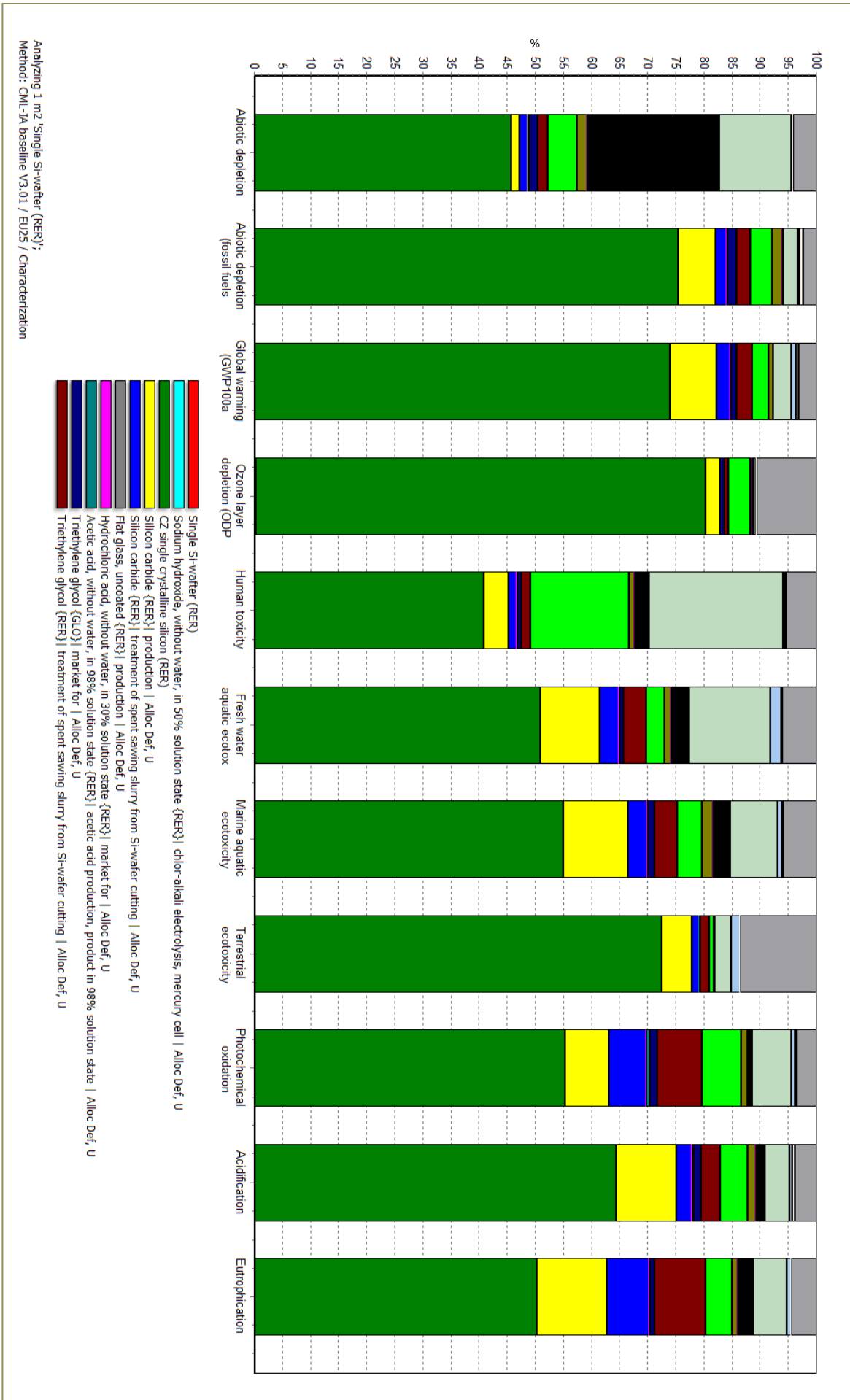
FIGUR 38 NORMALISERING



FIGUR 39 KARAKTERINGERING

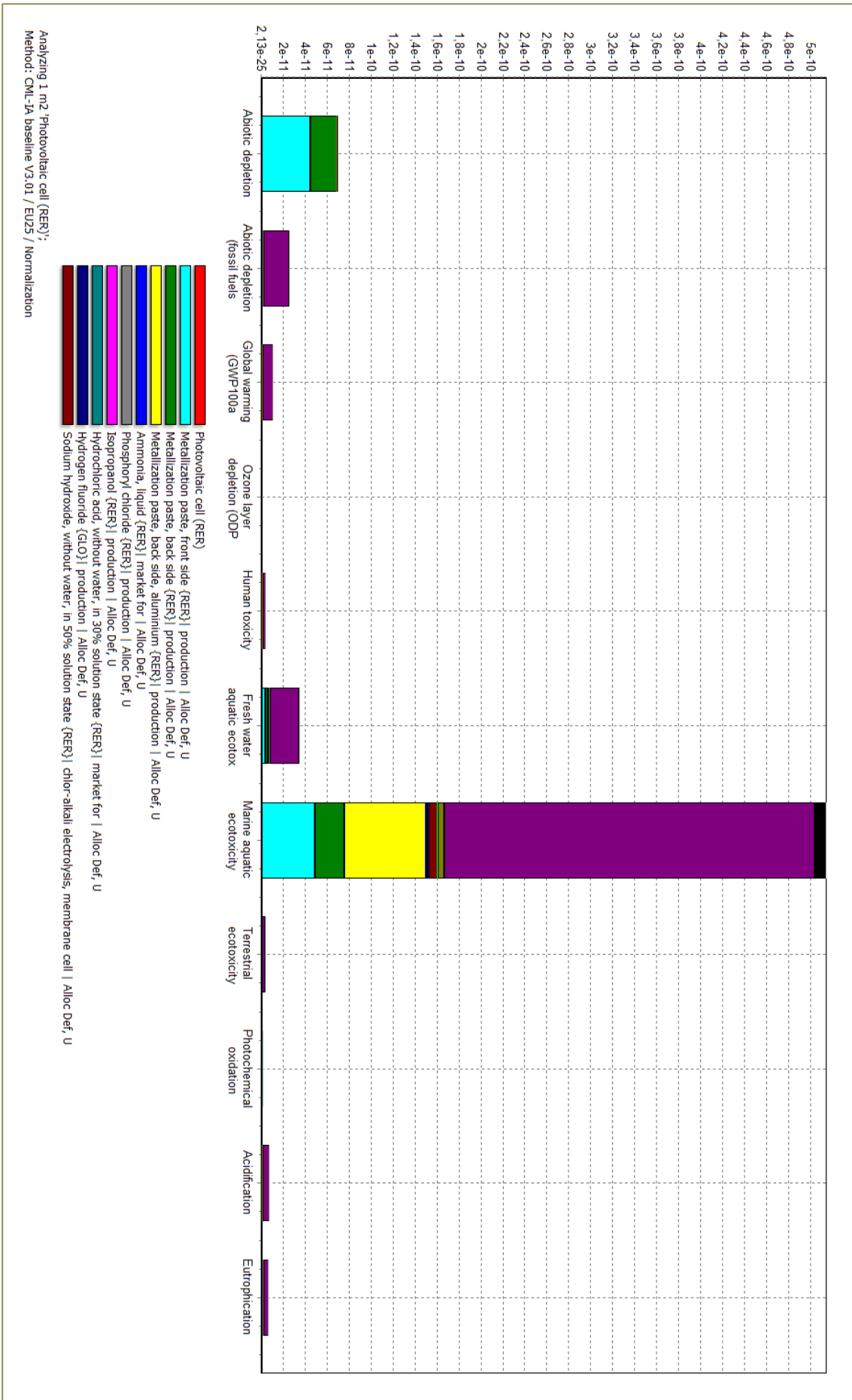


FIGUR 40 NORMALISERING

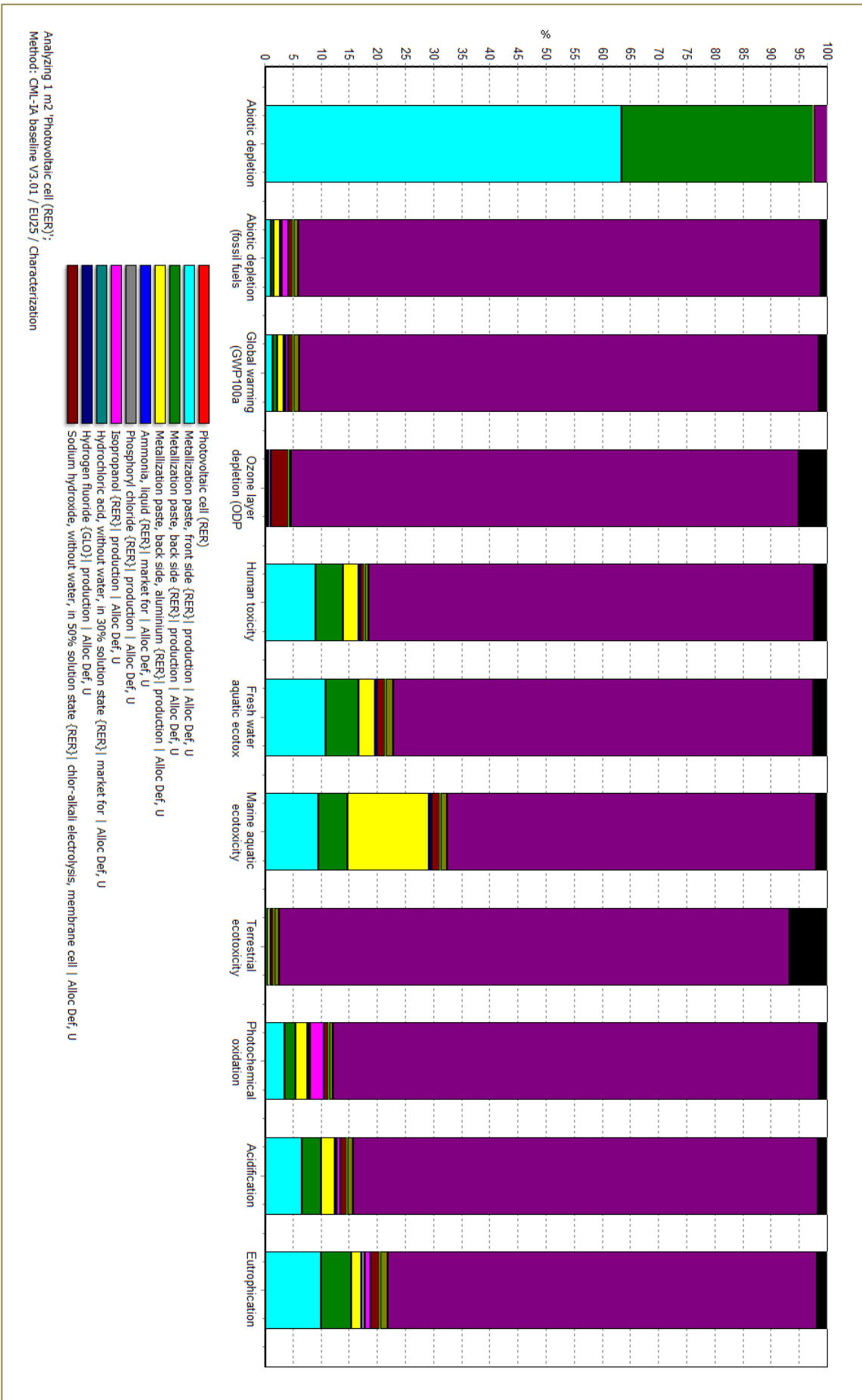


Analyzing 1 m2 Single Si-wafer (RER);
 Method: CML-IA baseline V3.01 / EU25 / Characterization

FIGUR 41 KARAKTERINGERING

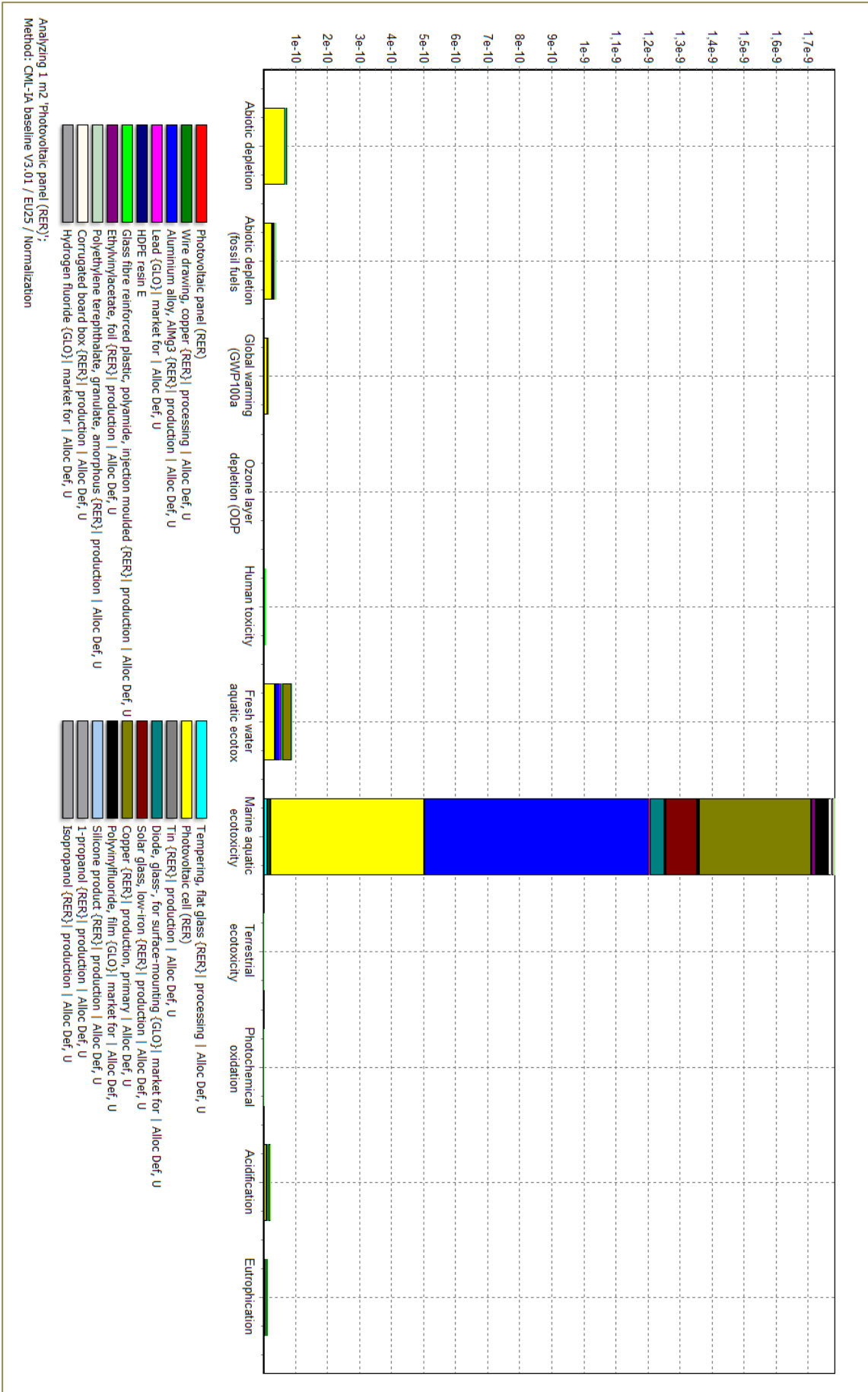


FIGUR 42 NORMALISERING

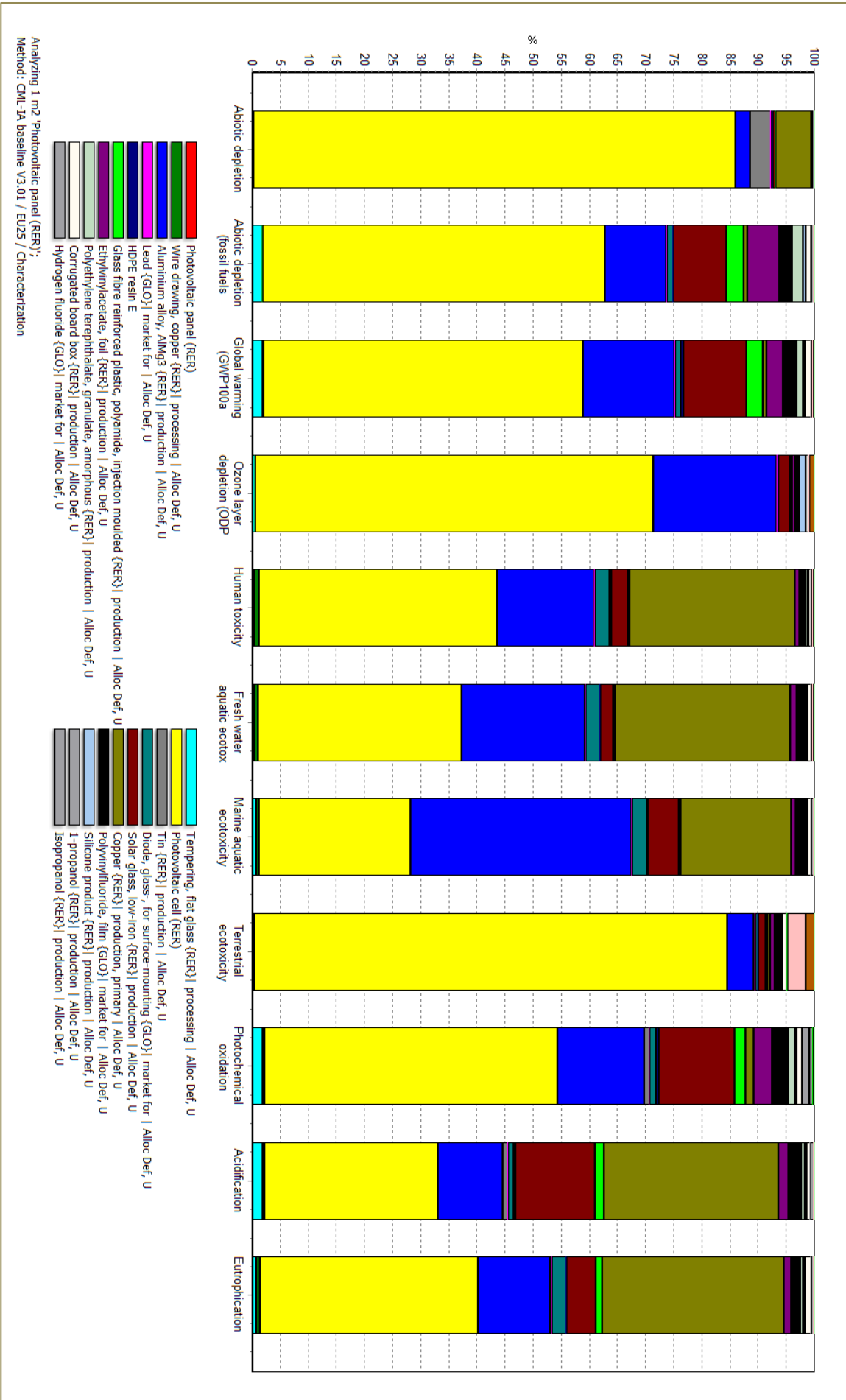


FIGUR 43 KARAKTERINGERING

Panel



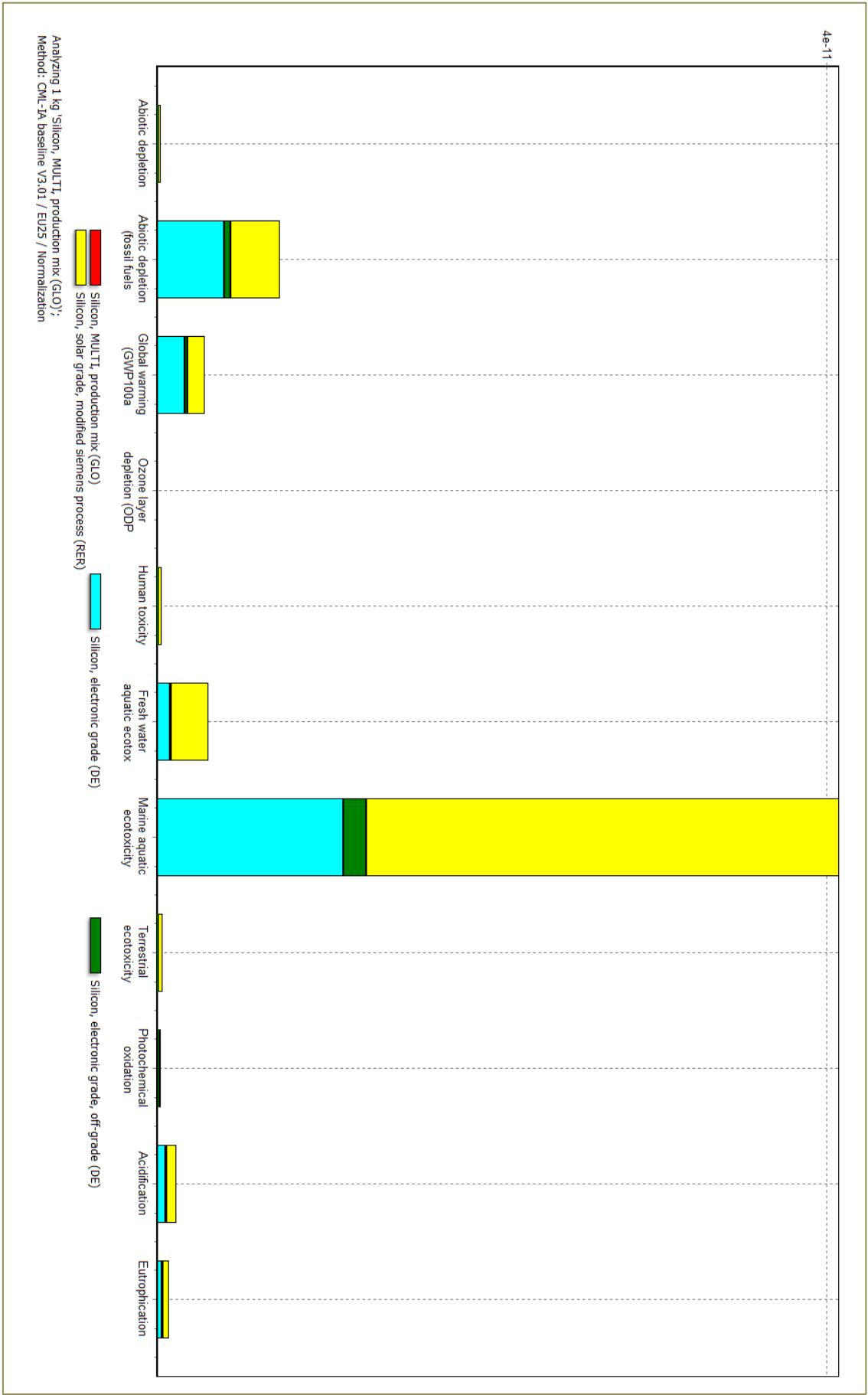
FIGUR 44 NORMALISERING



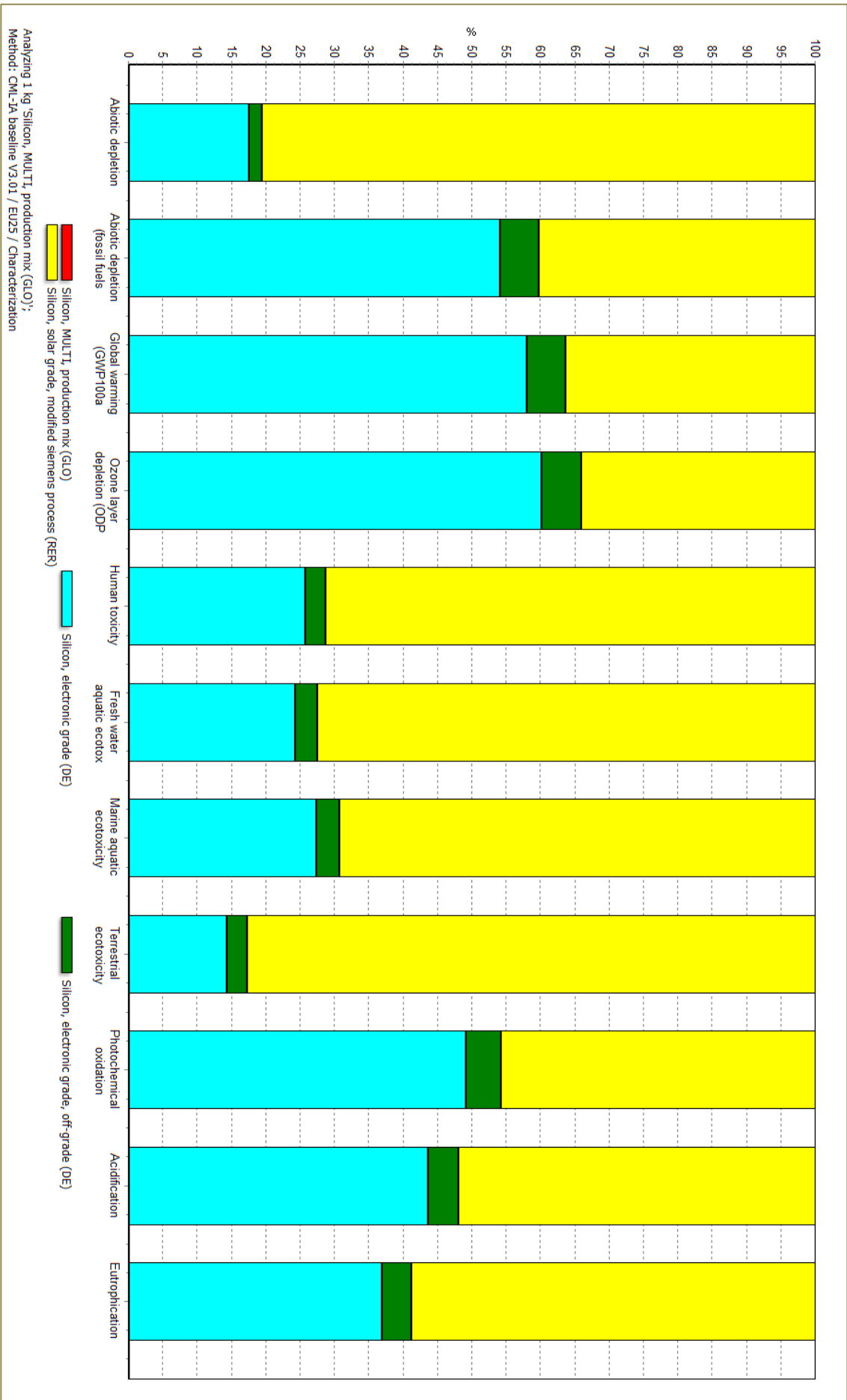
FIGUR 45 KARAKTERINGERING

Multikristallin

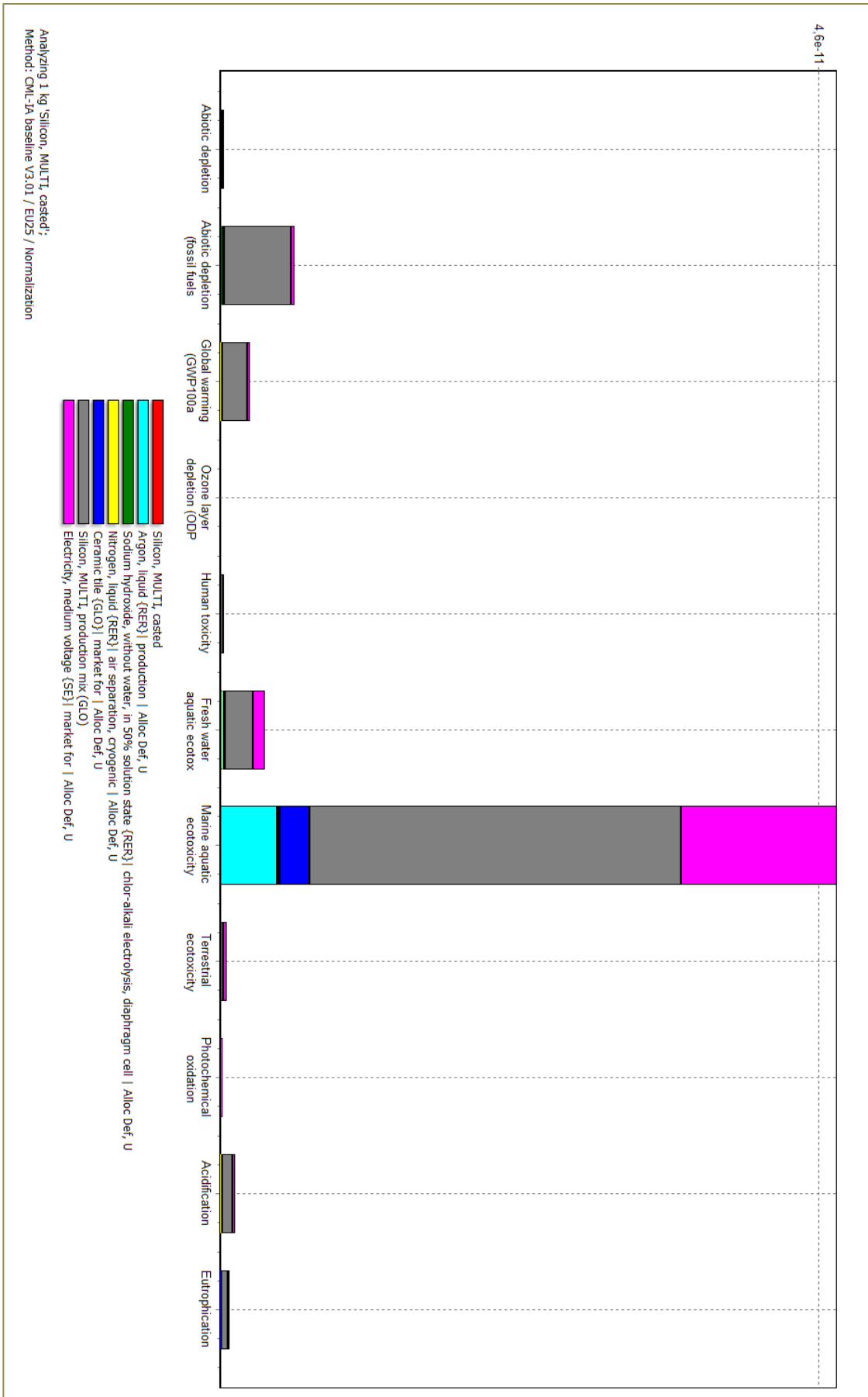
Kiselmix



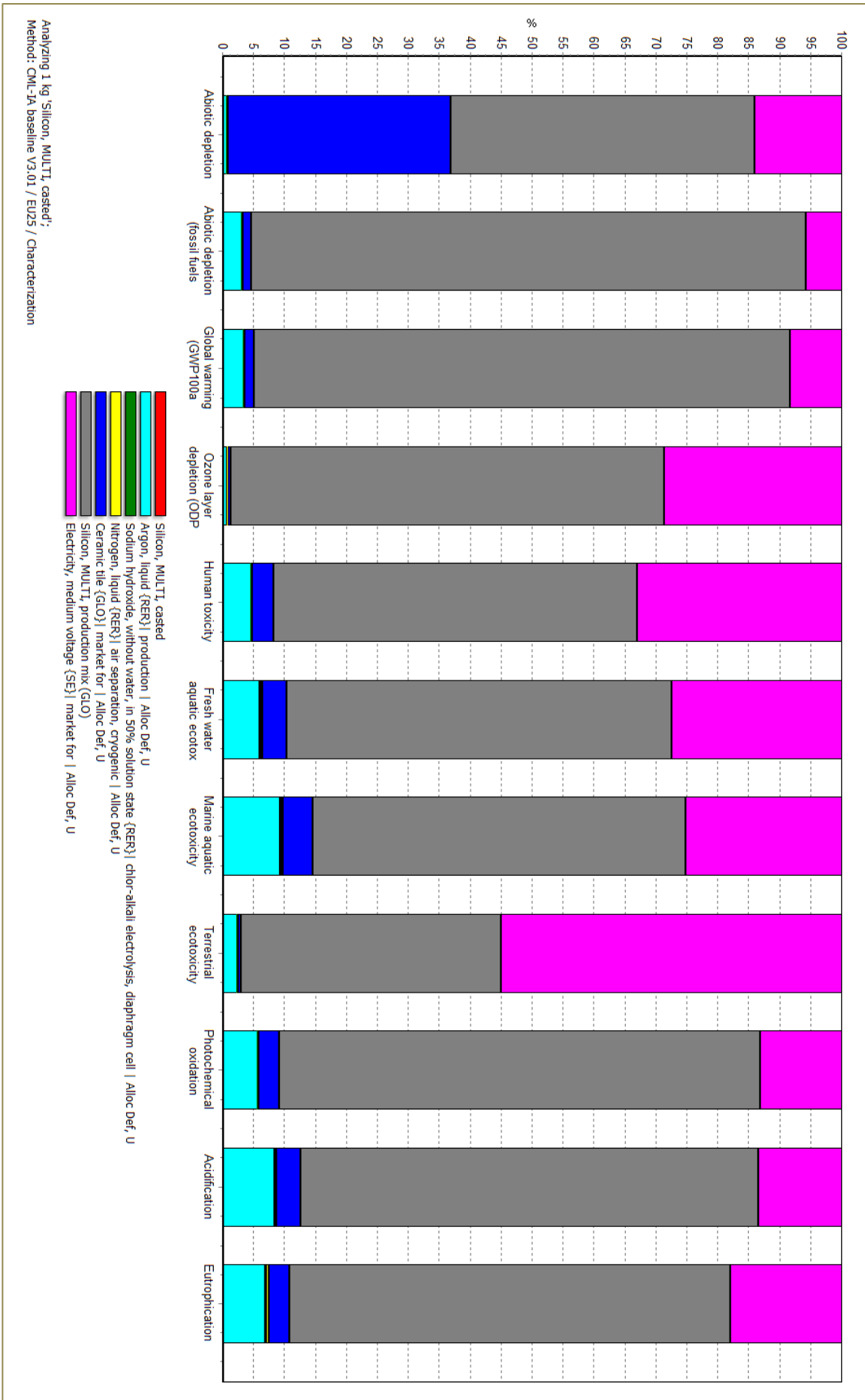
FIGUR 46 NORMALISERING



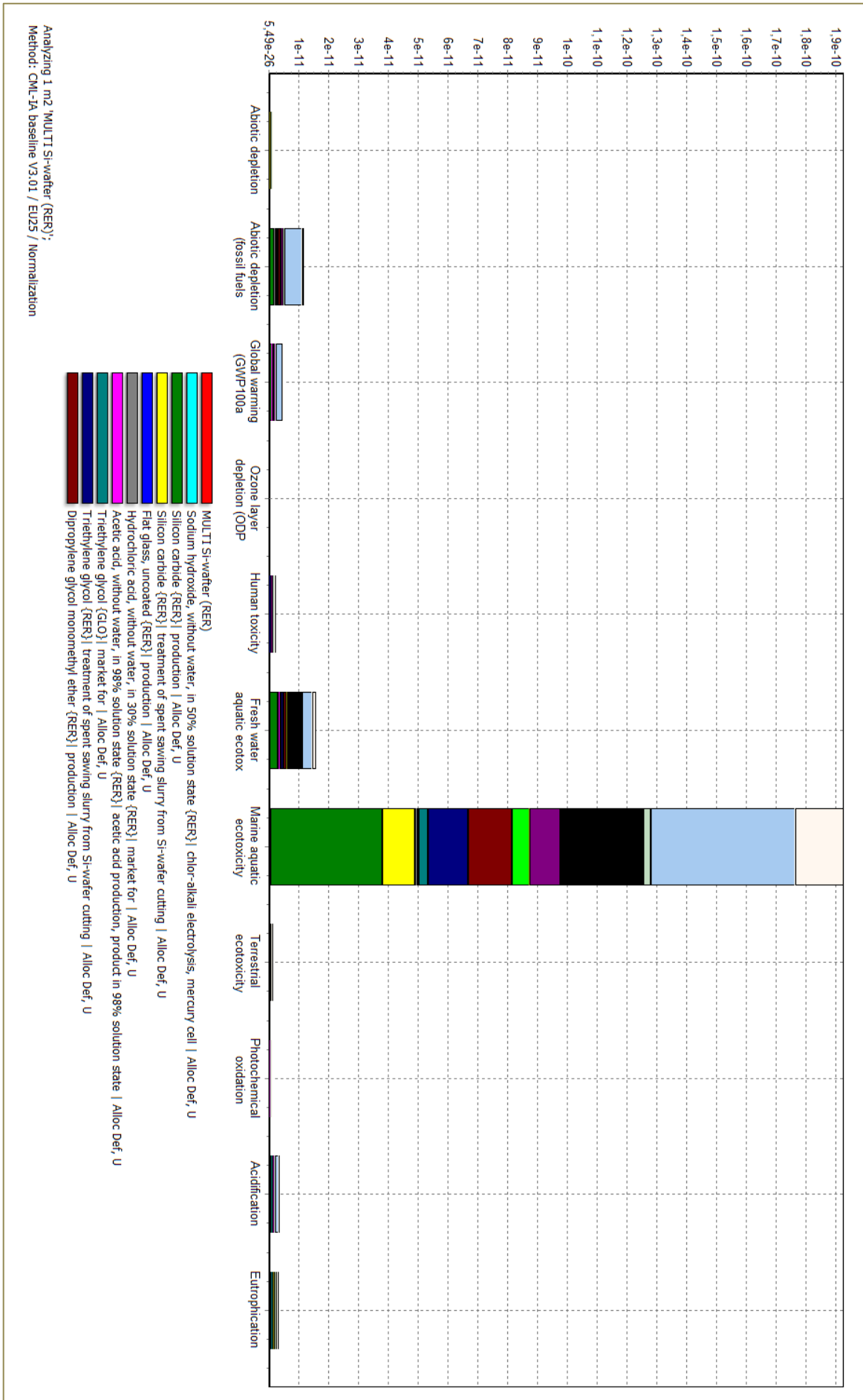
FIGUR 47 KARAKTERINGERING



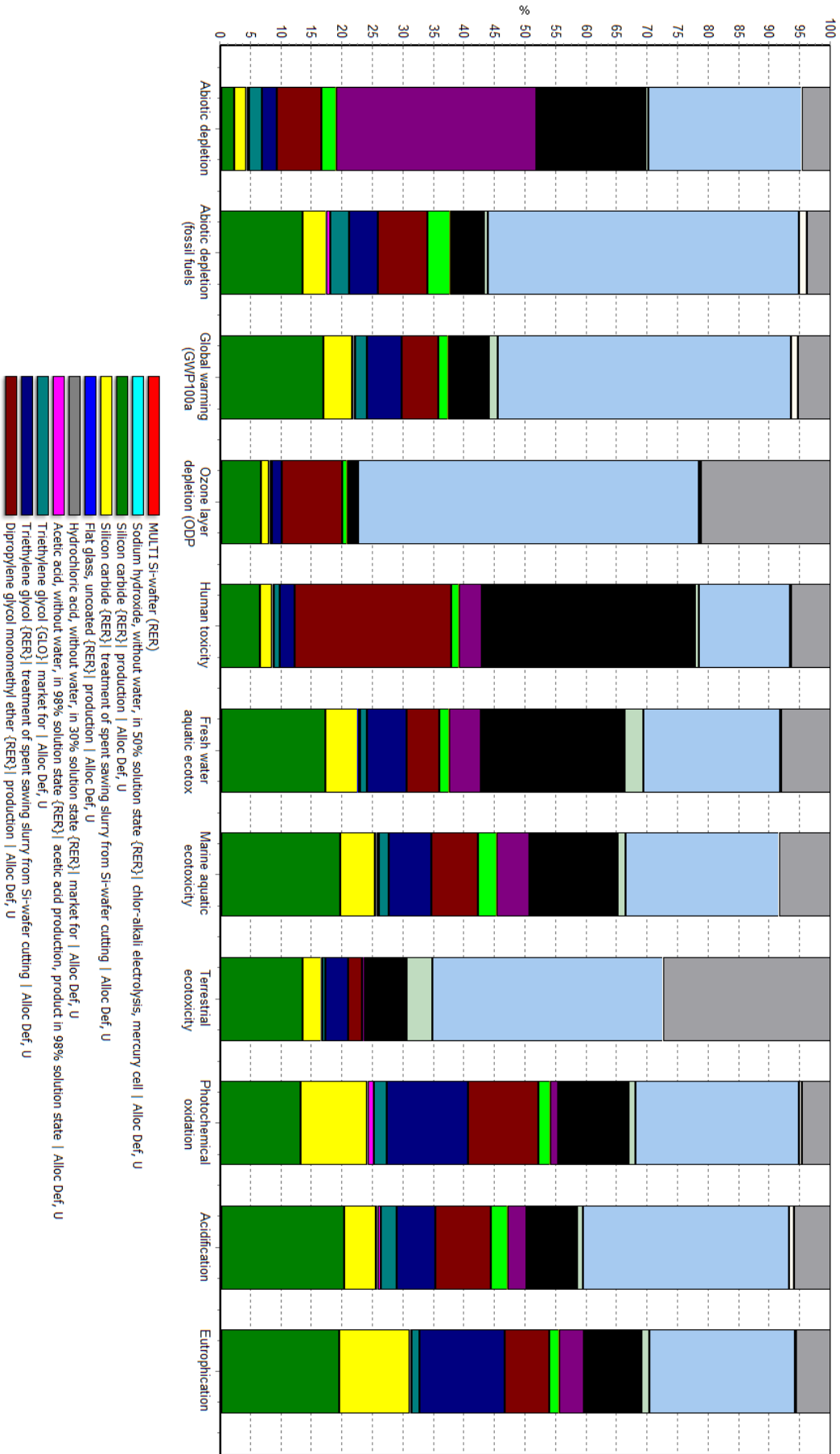
FIGUR 48 NORMALISERING



FIGUR 49 KARAKTERINGERING

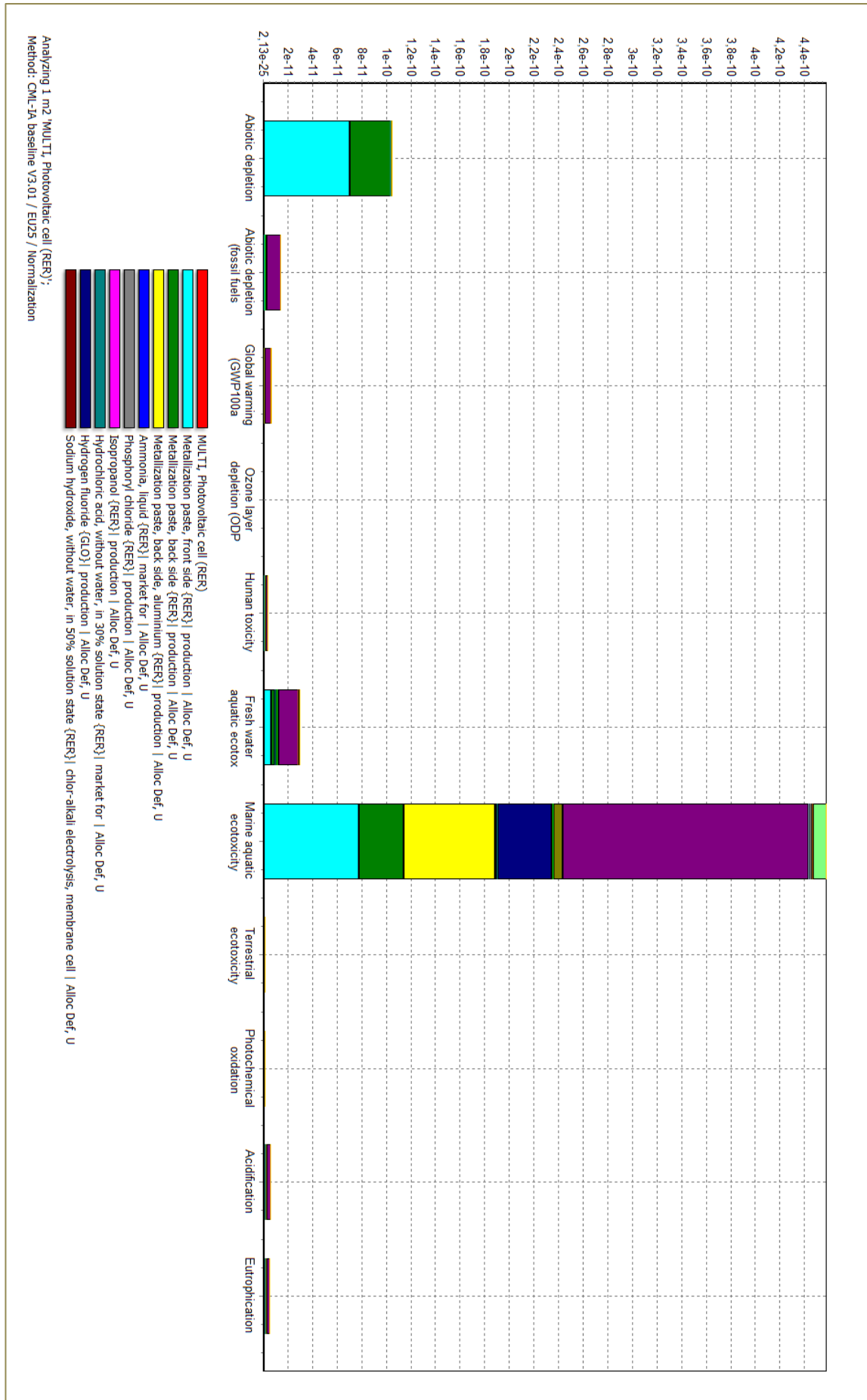


FIGUR 50 NORMALISERING

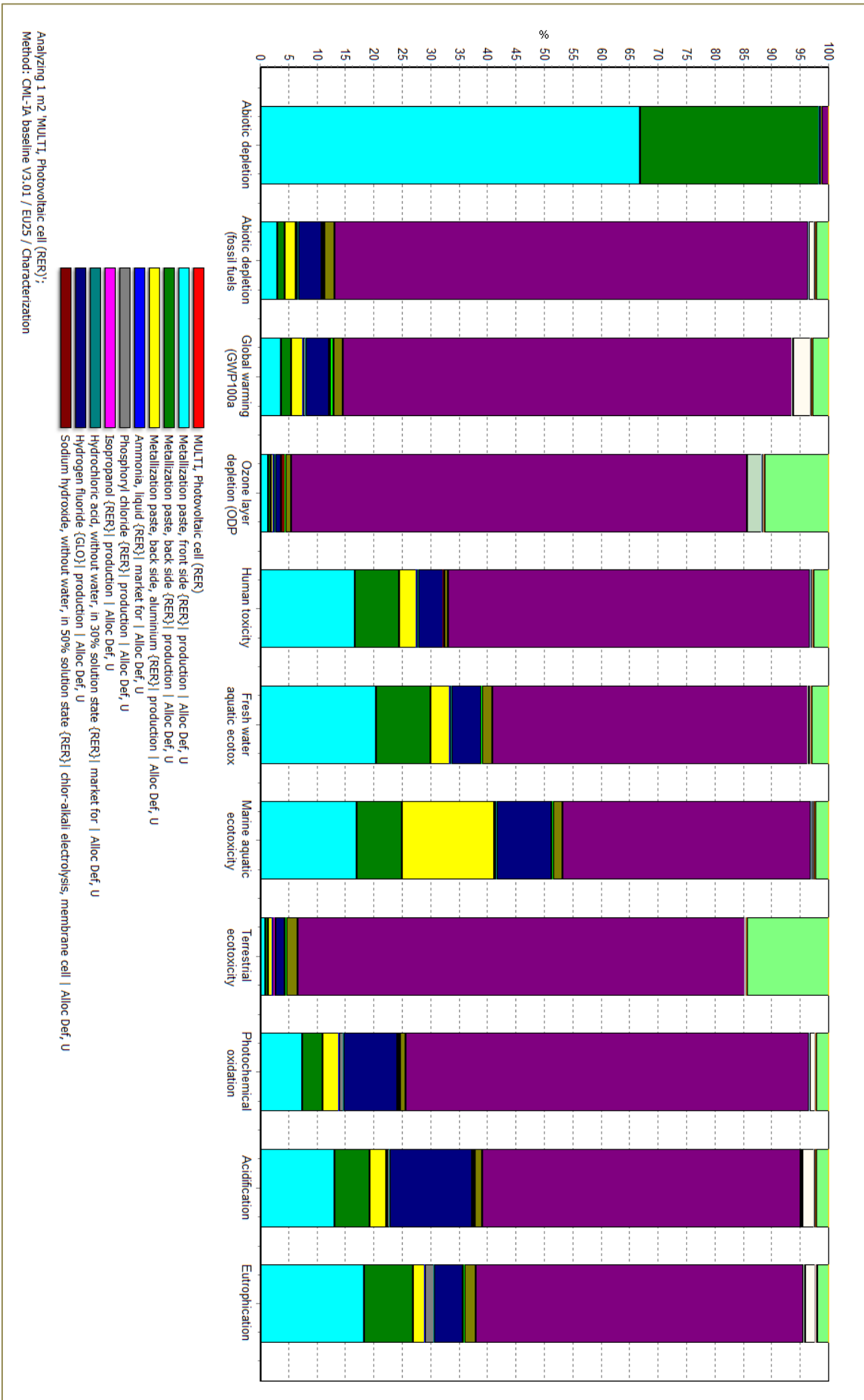


Analyzing 1 m2 MULTI-Si-wafer (RER);
 Method: CML-IA baseline V3.01 / EU25 / Characterization

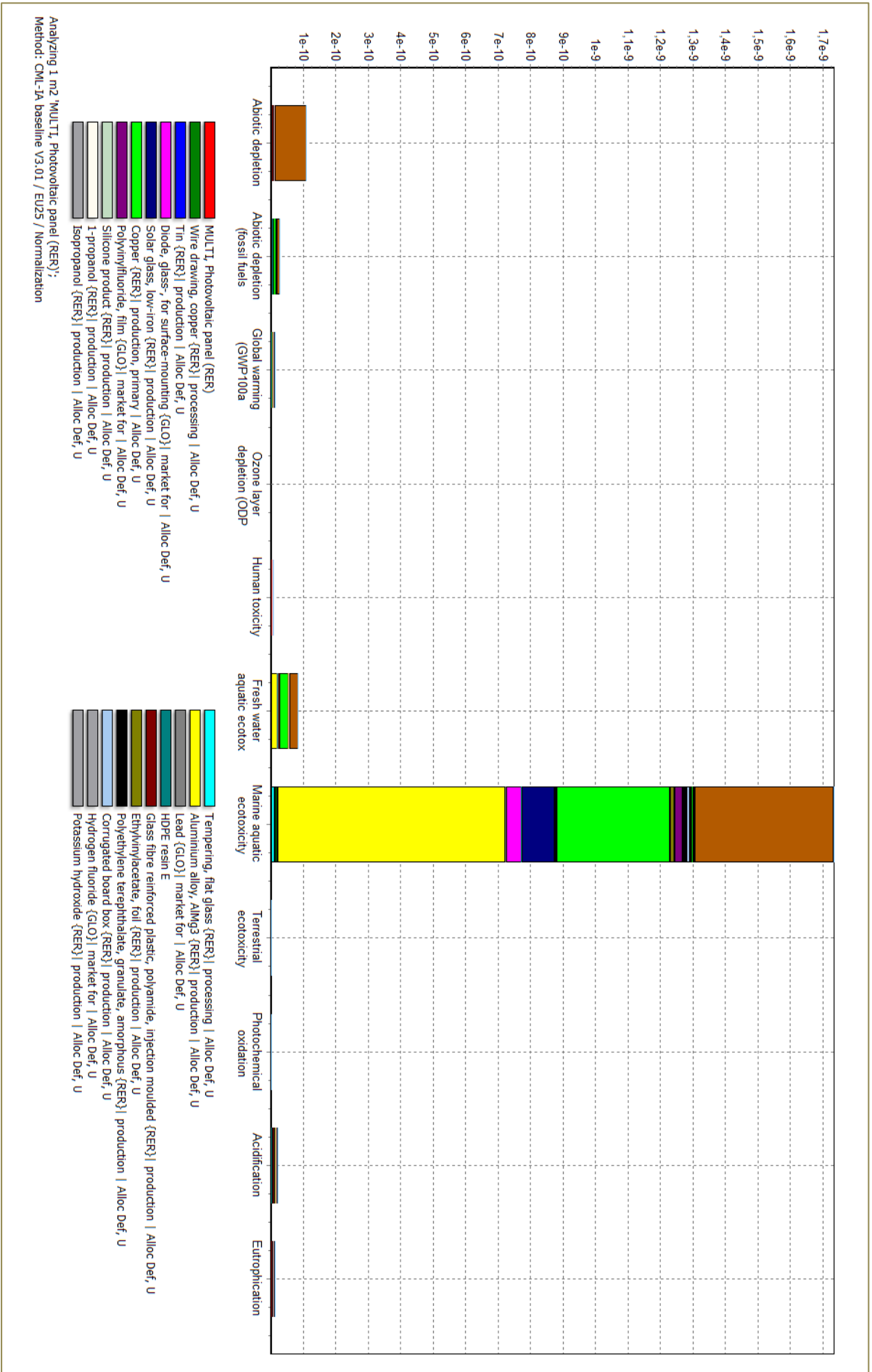
FIGUR 51 KARAKTERINGERING



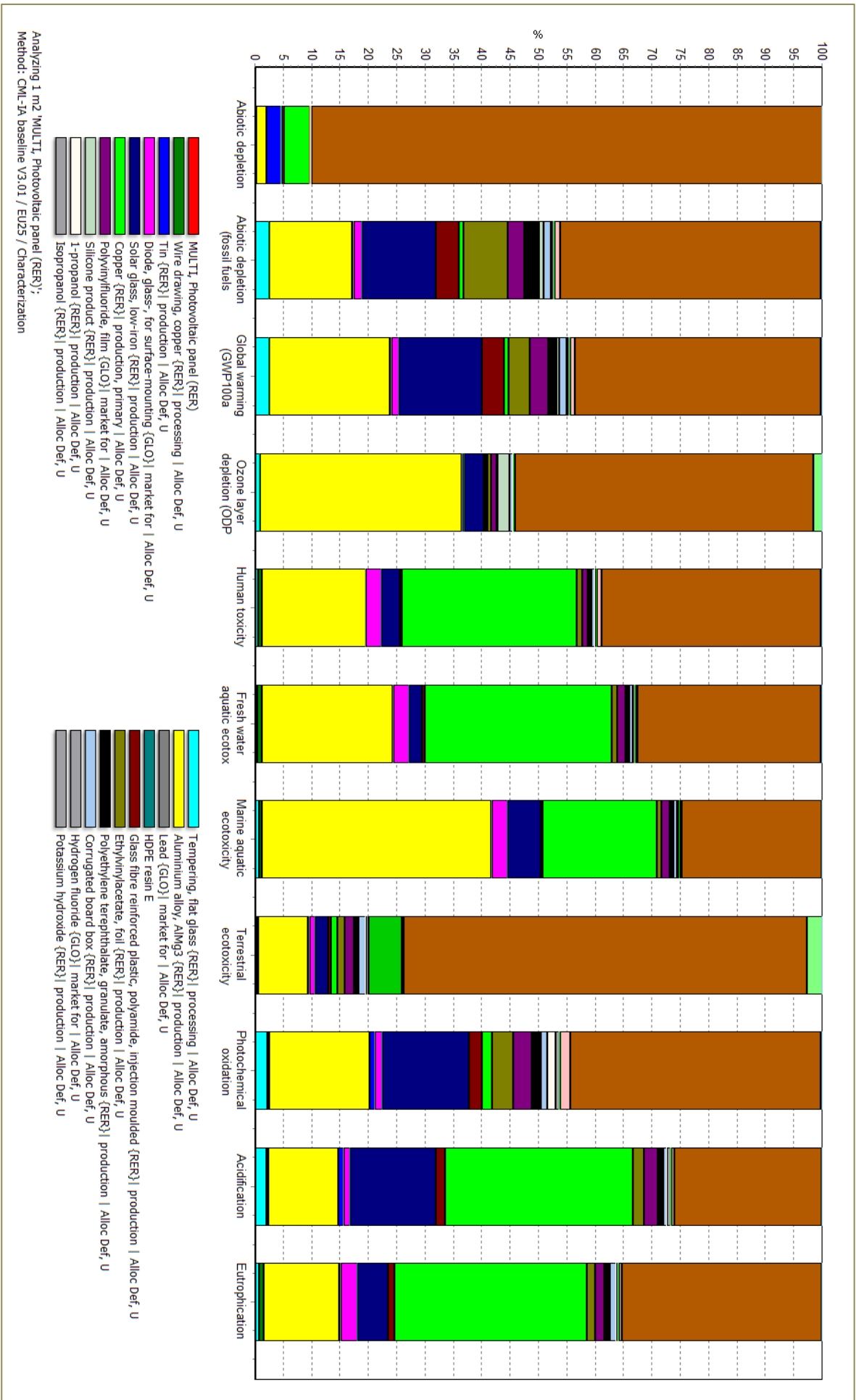
FIGUR 52 NORMALISERING



FIGUR 53 KARAKTERINGERING



FIGUR 54 NORMALISERING



FIGUR 55 KARAKTERINGERING

8.2. Elanvändningen för kiselsolcellerna

Monokristallin solcell

TABELL 17 EL FÖR DE OLIKA TILLVERKINGSSTEGEN IVA (2015)

photovoltaic panel, single-Si, at plant-RER	1m2		
electricity, medium voltage, at grid	3,73E+00	kWh	
photovoltaic cell, single-Si, at plant-RER	1m2		1,35E+01
electricity, medium voltage, at grid	1,44E+01	kWh	9,35E-01
single-Si wafer, photovoltaics, at plant - RER	1 m2		2,65E+01
electricity, medium voltage, at grid	2,57E+01	kWh	1,03E+00
CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant -RER	1 kg		1,08E+02
electricity, medium voltage, at grid	6,82E+01	kWh	1,58E+00
silicon, production mix, photovoltaics, at plant-GLO			1,07E+01
silicon, electronic grade, at plant	1,46E-01		7,81E-01
silicon, electronic grade, off-grade, at plant	5,23E-02		
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	8,02E-01		
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant - RER	1kg		9,99E+00
electricity, medium voltage, at grid	1,25E+01	kWh	8,02E-01
silicon, electronic grade, at plant- DE	1 kg		1,81E+01
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	1,24E+02	kWh	1,46E-01
silicon, electronic grade, off-grade, at plant -DE	1 kg		1,73E+00
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	3,31E+01	kWh	5,23E-02
MG-silicon, at plant - NO-CN-US-APAC	1 kg		3,56E+01
electricity, medium voltage, at grid	1,10E+01	kWh	1,13E+00
			1,05E+00
			1,05E+00
Total energydemand			227,63413

Multikristallin solcell

TABELL 18 EL FÖR DE OLIKA TILLVERKNINGSPROCESSERNA IVA (2015)

photovoltaic panel, multi-Si, at plant-CN-US-APAC-RER	1m2		
electricity, medium voltage, at grid	3,73E+00	kWh	
photovoltaic cell, multi-Si, at plant-RER	1m2		1,35E+01
electricity, medium voltage, at grid	1,44E+01	kWh	9,35E-01
multi-Si wafer, at plant-RER	1m2		2,16E+01
electricity, medium voltage, at grid	2,08E+01	kWh	1,04E+00
silicon, multi-Si, casted, at plant CN-US-APAC-RER	1 kg		6,95E+01
electricity, medium voltage, at grid	6,82E+01	kWh	1,02E+00
silicon, production mix, photovoltaics, at plant-GLO	1 kg		7,51E+00
silicon, electronic grade, at plant	1,46E-01		7,00E-01

silicon, electronic grade, off-grade, at plant	5,23E-02		
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	8,02E-01		
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant - RER	1 kg		9,99E+00
electricity, medium voltage, at grid	1,25E+01	kWh	8,02E-01
silicon, electronic grade, at plant- DE	1 kg		1,81E+01
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	1,24E+02	kWh	1,46E-01
silicon, electronic grade, off-grade, at plant -DE	1 kg		1,73E+00
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	3,31E+01	kWh	5,23E-02
MG-silicon, at plant - NO-CN-US-APAC	1 kg		3,56E+01
electricity, medium voltage, at grid	1,10E+01	kWh	1,13E+00
			1,05E+00
			1,05E+00
Total energy demand	kWh		159,57

8.3. Inventeringslistor

CdTe

TABELL 19 INVENTERINGSLISTA FÖR EN M2 CdTeMODUL MED TILLVERKNING I DANMARK IVA (2015)

photovoltaic laminate, CdTe, at plant-De	1 m2	
	m2	
electricity, medium voltage, at grid	27,92	kWh
natural gas, burned in boiler modulating >100kW	5,499813	MJ
photovoltaic panel factory	0,000004	unit
tap water, at user	114,76	kg
tempering, flat glass	8,341	kg
copper, at regional storage	0,01047	kg
silicone product, at plant	0,00307	kg
solar glass, low-iron, at regional storage	8,341	kg
flat glass, uncoated, at plant	8,1612	kg
glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	0,10776	kg
ethylvinylacetate, foil, at plant	0,47725	kg
cadmium telluride, semiconductor-grade, at plant	0,023275	kg
cadmium sulphide, semiconductor-grade, at plant	0,003516	kg
nitric acid, 50% in H2O, at plant	0,0572	kg
sulphuric acid, liquid, at plant	0,0393	kg
silica sand, at plant	0,0468	kg
sodium chloride, powder, at plant	0,0453	kg
hydrogen peroxide, 50% in H2O, at plant	0,0167	kg
isopropanol, at plant	0,00208	kg

sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,0493	kg
chemicals inorganic, at plant	0,037581	kg
chemicals organic, at plant	0,009742	kg
nitrogen, liquid, at plant	0,0732	kg
helium, at plant	0,0364	Kg

CIGS

TABELL 20 INVENTERINGSLISTA FÖR EN M2 CIGSMODUL MED TILLVERKNING I DANMARK IVA (2015)

photovoltaic laminate, CIS, at plant-DE	1 m ²	
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	<i>44,7</i>	<i>kWh</i>
photovoltaic panel factory	0,000004	unit
tap water, at user	131	kg
tempering, flat glass	7,7	kg
copper, at regional storage	0,00977	kg
aluminium, production mix, at plant	0,0444	kg
flat glass, uncoated, at plant	5,27	kg
diode, unspecified, at plant	0,00144	kg
silicone product, at plant	0,404	kg
molybdenum, at regional storage	0,00606	kg
indium, at regional storage	0,00282	kg
cadmium sulphide, semiconductor-grade, at plant	0,000269	kg
gallium, semiconductor-grade, at regional storage	0,000899	kg
selenium, at plant	0,0056	kg
tin, at regional storage	0,0123	kg
solar glass, low-iron, at regional storage	7,7	kg
ethylvinylacetate, foil, at plant	0,751	kg
flux, wave soldering, at plant	0,0123	kg
zinc oxide, at plant	0,00909	kg
wire drawing, copper	0,00977	kg
polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	0,336	kg
argon, liquid, at plant	0,019	kg
butyl acrylate, at plant	0,101	kg
diborane, at plant	0,000201	kg
sulphuric acid, liquid, at plant	0,0331	kg
hydrogen sulphide, H ₂ S, at plant	0,191	kg

sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,0334	kg
hydrogen peroxide, 50% in H ₂ O, at plant	0,0231	kg
hydrochloric acid, 30% in H ₂ O, at plant	0,0994	kg
nitrogen, liquid, at plant	15,7	kg
ammonia, liquid, at regional storehouse	0,0929	kg
urea, as N, at regional storehouse	0,00115	kg

Monokristallin solcell

TABELL 21 INVENTERINGSLISTA FÖR EN M2 MONOKRISTALLIN MODUL MED TILLVERKNING I NORDEUROPA IVA (2015)

photovoltaic panel, single-Si, at plant-RER	1m2	
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	<i>3,73125</i>	<i>kWh</i>
diesel, burned in building machine	0,00875	MJ
tap water, at user	5,03125	kg
tempering, flat glass	8,8125	kg
wire drawing, copper	0,1025	kg
<i>photovoltaic cell, single-Si, at plant</i>	<i>0,935415</i>	<i>m2</i>
aluminium alloy, AlMg ₃ , at plant	2,125	kg
tin, at regional storage	0,012875	kg
lead, at regional storage	0,000725	kg
diode, unspecified, at plant	0,002813	kg
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,02375	kg
solar glass, low-iron, at regional storage	8,8125	kg
copper, at regional storage	0,1025	kg
glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	0,295	kg
ethylvinylacetate, foil, at plant	0,875	kg
polyvinylfluoride film, at plant	0,111875	kg
polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	0,345625	kg
silicone product, at plant	0,121875	kg
corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	0,7625	kg
1-propanol, at plant	0,015875	kg
hydrogen fluoride, at plant	0,062375	kg

isopropanol, at plant	0,000147	kg
potassium hydroxide, at regional storage	0,051438	kg
soap, at plant	0,011563	kg
photovoltaic cell, single-Si, at plant-RER	1m2	
tap water, at user	170,9402	kg
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	14,38199	kWh
natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	0,060815	MJ
<i>single-Si wafer, photovoltaics, at plant</i>	<i>1,03</i>	<i>m2</i>
metallization paste, front side, at plant	0,005753	kg
metallization paste, back side, at plant	0,003842	kg
metallization paste, back side, aluminium, at plant	0,055884	kg
ammonia, liquid, at regional storehouse	0,021902	kg
phosphoryl chloride, at plant	0,013314	kg
isopropanol, at plant	0,177104	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,000629	kg
hydrogen fluoride, at plant	0,000645	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,604043	kg
lime, hydrated, packed, at plant	0,015081	kg
nitrogen, liquid, at plant	1,150559	kg
single-Si wafer, photovoltaics, at plant - RER	1 m2	
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	25,68212	kWh
natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	4	MJ
tap water, at user	0,006	kg
water, deionised, at plant	17,99803	kg
<i>CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant</i>	<i>1,582018</i>	<i>kg</i>
silicon carbide, at plant	0,62048	kg
silicon carbide, recycling, at plant	1,409435	kg
flat glass, uncoated, at plant	0,009985	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,014998	kg

hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,0027	kg
acetic acid, 98% in H2O, at plant	0,038996	kg
triethylene glycol, at plant	0,217784	kg
triethylene glycol, recycling, at plant	1,947732	kg
dipropylene glycol monomethyl ether, at plant	0,299967	kg
alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical, at plant	0,239974	kg
acrylic binder, 34% in H2O, at plant	0,002001	kg
brass, at plant	0,007438	kg
steel, low-alloyed, at plant	0,797173	kg
wire drawing, steel	0,80461	kg
CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant -RER	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	5,09	m3
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	68,2	kWh
natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	68,2243	MJ
tap water, at user	94,07338	kg
water, deionised, at plant	4,01	kg
<i>silicon, production mix, photovoltaics, at plant</i>	<i>0,781</i>	<i>kg</i>
argon, liquid, at plant	1	kg
hydrogen fluoride, at plant	0,01	kg
nitric acid, 50% in H2O, at plant	0,0668	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,0415	kg
ceramic tiles, at regional storage	0,167	kg
lime, hydrated, packed, at plant	0,0222	kg
silicon, production mix, photovoltaics, at plant-GLO		
<i>silicon, electronic grade, at plant</i>	<i>0,145538</i>	
<i>silicon, electronic grade, off-grade, at plant</i>	<i>0,052292</i>	
<i>silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant</i>	<i>0,802169</i>	

silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant - RER	1kg	
<i>MG-silicon, at plant</i>	<i>1,13</i>	<i>kg</i>
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	1,601671	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,050139	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,348189	kg
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	35,8494	MJ
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	61,69777	kWh
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	<i>12,45283</i>	<i>kWh</i>
silicon, electronic grade, at plant- DE	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	62,28316	m3
<i>MG-silicon, at plant</i>	<i>1,052632</i>	<i>kg</i>
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,000679	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	1,432513	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,089688	kg
tetrafluoroethylene, at plant	0,000639	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,463484	kg
graphite, at plant	0,00071	kg
water, completely softened, at plant	18,50806	kg
heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	174,1935	MJ
<i>electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy</i>	<i>124,1129</i>	<i>kWh</i>
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	39,19355	kWh
silicon, electronic grade, off-grade, at plant -DE	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	16,60884	m3
<i>MG-silicon, at plant</i>	<i>1,052632</i>	<i>kg</i>
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,000181	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,382003	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,023917	kg
tetrafluoroethylene, at plant	0,00017	kg

sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,123596	kg
graphite, at plant	0,000189	kg
water, completely softened, at plant	4,935484	kg
heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	46,45161	MJ
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	33,09677	kWh
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	10,45161	kWh
MG-silicon, at plant - NO-CN-US-APAC	1 kg	
<i>electricity, medium voltage, at grid</i>	<i>11</i>	<i>kWh</i>
hard coal coke, at plant	23,12	MJ
graphite, at plant	0,1	kg
charcoal, at plant	0,17	kg
petroleum coke, at refinery	0,5	kg
silica sand, at plant	2,7	kg
oxygen, liquid, at plant	0,02	kg

Multikristallin solcell

TABELL 22 INVENTERINGSLISTA FÖR EN M2 MULTIKRISTALLIN MODUL MED TILLVERKNING I NORDEUROPA IVA (2015)

photovoltaic panel, multi-Si, at plant - RER	1m2	
electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	3,73125	kWh
diesel, burned in building machine	0,00875	MJ
tap water, at user	5,03125	kg
tempering, flat glass	8,8125	kg
wire drawing, copper	0,1025	kg
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	0,935415	m2
aluminium alloy, AlMg3, at plant	2,125	kg
tin, at regional storage	0,012875	kg
lead, at regional storage	0,000725	kg
diode, unspecified, at plant	0,002813	kg
solar glass, low-iron, at regional storage	8,8125	kg
copper, at regional storage	0,1025	kg
glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	0,295	kg
ethylvinylacetate, foil, at plant	0,875	kg

polyvinylfluoride film, at plant	0,111875	kg
polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	0,345625	kg
silicone product, at plant	0,121875	kg
corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	0,7625	kg
1-propanol, at plant	0,015875	kg
hydrogen fluoride, at plant	0,062375	kg
isopropanol, at plant	0,000147	kg
potassium hydroxide, at regional storage	0,051438	kg
soap, at plant	0,011563	kg
photovoltaic cell, multi-Si, at plant -CN-US-APAC-RER	1m2	
tap water, at user	251,0684	kg
electricity, medium voltage, at grid	14,38199	kWh
natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	0,246959	MJ
light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating	0,0027	MJ
multi-Si wafer, at plant	1,04	m2
metallization paste, front side, at plant	0,009122	kg
metallization paste, back side, at plant	0,005342	kg
metallization paste, back side, aluminium, at plant	0,059583	kg
ammonia, liquid, at regional storehouse	0,008917	kg
phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant	0,008629	kg
phosphoryl chloride, at plant	0,027408	kg
isopropanol, at plant	0,00081	kg
solvents, organic, unspecified, at plant	0,0113	kg
calcium chloride, CaCl2, at regional storage	0,031476	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,008588	kg
hydrogen fluoride, at plant	0,403107	kg
nitric acid, 50% in H2O, at plant	0,293393	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,070677	kg

lime, hydrated, packed, at plant	0,217784	kg
hydrogen peroxide, 50% in H2O, at plant	0,000452	kg
sulphuric acid, liquid, at plant	0,101085	kg
potassium hydroxide, at regional storage	0,029997	kg
ammonium sulphate, as N, at regional storehouse	0,020957	kg
oxygen, liquid, at plant	0,008218	kg
nitrogen, liquid, at plant	1,347798	kg
silicon tetrahydride, at plant	0,002609	kg
multi-Si wafer, at plant-CN-US-APAC-RER	1m2	
electricity, medium voltage, at grid	20,79224	kWh
natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	4	MJ
tap water, at user	163,9546	kg
silicon, multi-Si, casted, at plant	1,019066	kg
silicon carbide, at plant	0,62048	kg
silicon carbide, recycling, at plant	1,409435	kg
flat glass, uncoated, at plant	0,040845	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,014998	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,0027	kg
acetic acid, 98% in H2O, at plant	0,038996	kg
triethylene glycol, at plant	0,217784	kg
triethylene glycol, recycling, at plant	1,947732	kg
dipropylene glycol monomethyl ether, at plant	0,299967	kg
alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical, at plant	0,239974	kg
acrylic binder, 34% in H2O, at plant	0,003854	kg
brass, at plant	0,007438	kg
steel, low-alloyed, at plant	0,797173	kg
wire drawing, steel	0,80461	kg
silicon, multi-Si, casted, at plant CN-US-APAC-RER	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	0,943	m3

electricity, medium voltage, at grid	15,5	kWh
argon, liquid, at plant	0,252	kg
sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,005	kg
nitrogen, liquid, at plant	0,0304	kg
ceramic tiles, at regional storage	0,214	kg
silicon, production mix, photovoltaics, at plant	0,7	kg
silicon, production mix, photovoltaics, at plant-GLO		
silicon, electronic grade, at plant	0,145538	
silicon, electronic grade, off-grade, at plant	0,052292	
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	0,802169	
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant - RER	1kg	
MG-silicon, at plant	1,13	kg
hydrochloric acid, 30% in H ₂ O, at plant	1,601671	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,050139	kg
sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,348189	kg
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	35,8494	MJ
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	61,69777	kWh
electricity, medium voltage, at grid	12,45283	kWh
silicon, electronic grade, at plant- DE	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	62,28316	m ³
MG-silicon, at plant	1,052632	kg
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,000679	kg
hydrochloric acid, 30% in H ₂ O, at plant	1,432513	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,089688	kg
tetrafluoroethylene, at plant	0,000639	kg
sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	0,463484	kg
graphite, at plant	0,00071	kg
water, completely softened, at plant	18,50806	kg

heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	174,1935	MJ
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	124,1129	kWh
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	39,19355	kWh
silicon, electronic grade, off-grade, at plant -DE	1 kg	
Water, cooling, unspecified natural origin	16,60884	m3
MG-silicon, at plant	1,052632	kg
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,000181	kg
hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	0,382003	kg
hydrogen, liquid, at plant	0,023917	kg
tetrafluoroethylene, at plant	0,00017	kg
sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	0,123596	kg
graphite, at plant	0,000189	kg
water, completely softened, at plant	4,935484	kg
heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	46,45161	MJ
electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	33,09677	kWh
electricity, hydropower, at run-of-river power plant	10,45161	kWh
MG-silicon, at plant - NO-CN-US-APAC	1 kg	
electricity, medium voltage, at grid	11	kWh
hard coal coke, at plant	23,12	MJ
graphite, at plant	0,1	kg
charcoal, at plant	0,17	kg
petroleum coke, at refinery	0,5	kg
silica sand, at plant	2,7	kg
oxygen, liquid, at plant	0,02	kg

9. Referenser

(Amarkoon m.fl. 2018)

Amarakoon, S., Vallet, C., Curran, M. A., Haldar, P., Metacarpa, D., Fobare, D. & Bell, B. (2018). Life cycle assessment of photovoltaic manufacturing consortium (PVMC) copper indium gallium (di)selenide (CIGS) modules. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(4), p. 851.

(Baranshai u.å.)

Baranzahi, A. (u.å). Partiell Skuggning i solpaneler. <http://solarlab.se/solpanel/datablad/partiell-skuggning.pdf>. [2019-04-10].

(Boverket 2019)

Boverket (2019). Sådär görs en LCA.

<https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/sahar-gors-en-lca/> [2019-03-18]

(Elshurafa m.fl. 2018)

Elshurafa, A. M., Albardi, S. R., Bigerna, S. & Bollino, C.A. (2018). Estimating the learning curve of solar PV balance-of-system for over 20 countries: Implications and policy recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 196, pp. 122–134. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.016.

(Energirådgivningen u.å)

Energirådgivningen (u.å). Solceller ur flera perspektiv, handbok för beslutsfattare. https://energiradgivningen.se/system/tdf/solceller_ur_flera_perspektiv_handbok_brf.pdf?file=1. [2019-03-05]

(Foad m.fl. 2018)

Gandoman, F.H., Abdel Aleem, S., Omar, N., Ahmadi, A., & Alenezi, F.Q. (2018).

Short-term solar power forecasting considering cloud coverage and ambient temperature variation effects. *Renewable Energy*, 123, pp. 793–805. doi: 10.1016/j.

(Göteborg u.å.)

Göteborg Stad (u.å.). Om hoppet. www.goteborg.se/ [2019-03-05]

(Göteborg 2014)

Göteborgs Stad (2014). Klimatstrategiskt program för Göteborg. <https://goteborg.se/wps/wcm/connect/36fb4599-a2c4-4e46-8621-0c71ceec4c5/Klimatstrategiskt+program+f%C3%B6r+G%C3%B6teborg.pdf?MOD=AJPERES>. [2019-03-05]

(Häggman 2017)

Häggman, F. (2017). ÅA utvecklar ny sorts solceller: ”I framtiden ser vi solpaneler i fönster, bilar, kanske kläder?”. <https://svenska.yle.fi/artikel/2017/10/20/aa-utvecklar-ny-sorts-solceller-i-framtiden-ser-vi-solpaneler-i-fonster-bilar>. [2019-04-12]

(IVA 2016)

Kungl. ingenjörsvetenskapsakademin. (2016). Sveriges framtida elproduktion. www.iva.se [2019-02-28]

IVA (2015)

IVA (2015). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems.

<http://iea-pvps.org/index.php?id=315> [2019-03-15].

iea-pvps (2016)

iea-pvps (2016). Trends 2016 in photovoltaic applications

http://ieapvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/Trends_2016_-_mr.pdf [2019-04-20]

(Ilias m.fl. 2018)

Ilias, A. V., Meletios, G. R., Nikolaos, B. & Yiannis, A.K. (2018). Integration & assessment of recycling into c-Si photovoltaic module's life cycle. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11(3), p. 186

- (ISO u.å.)
International Organization for Standardization (u.å.). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> [2019-03-18]
- (Jolliet 2004)
Jolliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., Itsubi, N., Peña, C., Pennington, D., Potting, J., Rebitzer, G., Stewart, M., Haes, H., Weidema, B. (2004).
The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative', *International Journal of Life Cycle Assessment*. 9(6), p. 394.
- (Jones and Gilbert 2018)
Jones, C. & Gilbert, P. (2018). Determining the consequential life cycle greenhouse gas emissions of increased rooftop photovoltaic deployment. *Journal of Cleaner Production*, 184, pp. 211–219. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.140.
- (Kato m.fl. 2001)
Kato, K., Hibino, T., Komoto, K., Ihara, S., Yamamoto, S. & Fujihara, H. (2001). A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules. *SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS*, p. 279.
- (Lunardi m.fl. 2018)
Marina M. L., Alvarez-Gaitan, J.P., Bilbao, J. I., Corkish, R. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules.
- (Naturvårdsverket 2009)
Naturvårdsverket (2009). WEEE-direktivet i Sverige, en utvärdering med framtidsstudie. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5969-9.pdf>. [2019-03-06].
- (Padoan, Altimari and Pagnanelli 2019)
Padoan, F. C. S. M., Altimari, P. & Pagnanelli, F. (2019). Review: Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. *Solar Energy*, 177, pp. 746–761. doi: 10.1016/j.solener.2018.12.003.
- (Pellby och Larsson 2015)
Pellby, O. & Larsson, A. (2015). Solceller på den svenska marknaden, driftenergi
- (Peng m.fl. 2013)
Peng, J., Lu, L. & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 255–274. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.035.
- (Reugei m.fl 2007)
Raugei, M., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2007). Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules : CdTe and CIS compared to poly-Si. *Energy (Oxford)*, (8), p. 1310.
- (Riksdagen u.å)
Riksdagen (u.å.). Miljöbalk (1998:808). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svenskforfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808. [2019-03-06]
- (Sampaio and González 2017)
Sampaio, P. G. V. and González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, pp. 590–601. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.081.
- (Shivashankar m.fl 2016)
Karimi, M., Mekhilef, S., Mokhlis, H. & Shivashankar, S. (2016). Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 1170–1184. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.059.
- (SCB 2018)

Statistikmyndigheten (2018). Elektricitet i Sverige. www.scb.se/ [2019-02-30]

(solenergibutiken u.å)

Solenergibutiken (u.å). Solpanelguiden. <https://solenergibutiken.se/solpanelguiden/>. [2019-03-05]

(Tokimatsu m.fl. 2018)

Höök, M., McLellan, B., Murakami, S., Nishio, M., Tokimatsu, K., Wachtmeister, H. & Yasuoka, R. (2018). Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: Exploring metal requirements and the well-below 2 degrees C target with 100 percent renewable energy. *Applied Energy*, p. 1158. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.047.

(Valero m.fl. 2018)

Valero, A., Valero, A., Calvo, G. & Ortego, A. (2018). Material bottlenecks in the future development of green technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, pp. 178–200. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.041

(YOO 2011)

YOO, S.-H. (2011). Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar energy*, (7), p. 1291.

(Zhang m.fl. 2018)

Wang, M., & Yang, H. & Zhang, T. (2018). A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems. *Energies*, Vol 11, Iss 11, p 3157 (2018), (11), p. 3157. doi: 10.3390/en11113157

(Zhou & Carbajales-Dale 2018)

Zhou, Z. & Carbajales-Dale, M. (2018). Assessing the photovoltaic technology landscape: efficiency and energy return on investment (EROI). *Energy & Environmental Science*, 11(3), p. 603.