

Megaconstructies op en buiten de aarde als (toevlucht)oord voor de mensheid

Inleiding.

Voordat de aarde getroffen wordt door een ramp zoals de inslag van een grote meteoriet of een andere catastrofale gebeurtenis, is het goed om al vast nagedacht te hebben over welke maatregelen genomen zouden kunnen worden door de mensheid om na zo'n ramp te overleven. Dit omvat zowel een beschouwing van megaconstructies dienend als alternatieve leefgebieden op of buiten de aarde, als eventueel andere benodigde technieken en voorbereidingen. Ook indien zich een dergelijke ramp niet zou voltrekken, is het interessant om te filosoferen over de mogelijkheden en de wenselijkheid van alternatieve leefgebieden voor de mensheid. Dit artikel zal men kunnen rekenen tot zogenaamde harde sciencefiction; dit houdt in dat de voorgestelde technieken kloppen met onze huidige natuurkundige kennis, en dat de eerste stappen op weg naar de verwezenlijking van die technieken al gezet zijn. Daarnaast zullen technieken aan de orde komen die nu al toegepast zouden kunnen worden. Eén en ander zal toegelicht worden aan de hand van rekenvoorbeelden die passen op de achterkant van een sigarenkistje.

1. Schuilplaatsen op de aarde.

In de eerste plaats verdient het de voorkeur dat voorkomen wordt dat de aarde getroffen wordt door een zware vernietigende meteoriet. Hoewel soms zich de gedachte opdringt dat het wel goed zou zijn om met een schone lei, opnieuw te beginnen. Maar als de mensheid dan weer opkrabbelt en dunnetjes de geschiedenis zou overdoen (vervallend in de zelfde fouten), zou dat niet zo interessant zijn. Om een vernietigende inslag te voorkomen zou men tijdig in kaart kunnen brengen welke kometen, planetoiden, of andere objecten een gevaar vormen, waarna ruimtemissies ondernomen worden om ze al vast van koers te veranderen of anderszins onschadelijk te maken. Een dergelijke onderneming is één van de best te rechtvaardigen ruimtevaartprojecten om flink in te investeren. Weliswaar zijn zware meteorietinslagen zeer zeldzaam, maar minder zware inslagen die al waarschijnlijk zijn in een tijdsbestek van 1000 jaar, kunnen ook al behoorlijk desastreus zijn en hele steden van de kaart vegen. Maar het is goed denkbaar dat zo'n preventiesysteem vooral in de beginfase geen 100% garantie biedt en dat bijvoorbeeld een plotseling van koers gewijzigde planetoïde toch niet meer op tijd tegengehouden kan worden.

Als de aarde wordt getroffen door een grote meteoriet (diameter >10 km), bijvoorbeeld een meteoriet van de grootte die 66 miljoen jaar geleden insloeg op het schiereiland Yucatan en die leidde tot het uitsterven van de dinosauriërs, dan zal er zeer veel stof en as in de atmosfeer terecht komen. Het meeste daarvan zal snel weer neerdalen op de aarde maar dat geldt niet voor deeltjes met een diameter kleiner dan een micrometer. Deze aerosolen houden zonlicht voor langere tijd tegen zodat de aarde jaren lang verduisterd wordt en daardoor gedompeld raakt in een zogenaamde inslagwinter die decennia lang kan duren. Het ontstaan van relatief grote hoeveelheden aerosolen treedt vooral op als de inslag plaatsvindt op land of in een ondiepe zee. De inslagwinter zal in het bijzonder toeslaan op de hogere breedtes en op grote landmassa's die bedekt zullen raken met ijs en sneeuw. De zon zelf zal waarschijnlijk na een enkele jaren wel weer schijnen (nog wel enigszins afgezwakt), maar dan is de aarde al terecht gekomen in een kleine ijstijd. In die paar jaar zal de beschaving zoals wij die kennen waarschijnlijk grotendeels teneinde gekomen zijn. De directe gevolgen van de inslag zoals de schokgolf, tsunami's, aardbevingen, vuurregens van kleinere meteorieten die door de inslag zijn ontstaan, bosbranden en stofstormen zullen al voldoende zijn om de meeste infrastructuur te vernietigen (vliegvelden, havens, energiecentrales, wegen, leidingen, communicatienetwerken, enzovoort). Met het verdwijnen van de infrastructuur wordt reparatie vrijwel onmogelijk; na verloop van tijd zal ook de kennis verdwijnen om technische installaties te

repareren. De kleinere voedselvoorraden die er zijn, zullen vrij snel uitgeput raken, de grotere voorraden zullen waarschijnlijk in handen vallen van gewapende bendes. Door mislukte oogsten kunnen voedselvoorraden niet meer aangevuld worden. Na de inslagwinter die tientallen jaren kan duren zou het klimaat juist aanzienlijk kunnen opwarmen door de verhoogde concentratie CO₂ en andere broeikasgassen. Al met al krijg je dan een post apocalyptische samenleving die is teruggeworpen tot de middeleeuwen.

Het is echter denkbaar dat grotere mogendheden speciale voorzieningen hebben aangelegd om toch iets van de technologische beschaving te behouden, mocht zo'n ramp plaats vinden. Het gaat dan om ondergrondse schuilplaatsen die voor de inwoners langere tijd zelfvoorzienend kunnen zijn, op ieder continent tenminste één. De ondergrondse schuilplaats die het meest nabij de plaats van inslag ligt, zal misschien direct vernietigd worden. Enkele andere die daar tienduizend(en) kilometers van verwijderd zijn, zullen waarschijnlijk intact kunnen blijven. Een deel van de mensen die zijn ingeschreven en geselecteerd voor zo'n schuilplaats, zou er in kunnen slagen om een veilig heenkomen in zo'n speciale schuilkelder of complex van schuilkelders, te vinden, vooral als zij tijdig gewaarschuwd zijn dat de inslag zal plaatsvinden. De schuilplaats zou ondergronds aangelegd moeten worden of in een grottenstelsel van een berg, om bestand te zijn tegen de drukgolf die na de inslag over het aardoppervlak zal trekken. Een voorbeeld van een ondergrondse stad die hieraan zou kunnen voldoen is de in zacht vulkanisch gesteente gebouwde Turkse stad Derinkuyu daterend uit de vijfde eeuw voor christus. De ondergrondse schuilplaats zou zo ontworpen moeten zijn dat ze zelfvoorzienend is voor een groep van 2000 mensen. Dit houdt in dat er kassen zijn voor het verbouwen van granen, groentes en fruit en het kweken van insecten als eiwitbron. De energie die nodig is voor de verlichting voor deze kassen is afkomstig van een eigen elektriciteitscentrale die autonoom kan werken. Bij voorkeur een kernenergie-centrale en dan het liefst kernfusie, maar een gascentrale zou ook voldoen als er onder de centrale een groot gasveld zou liggen. Een kernfusiereactor is nu nog geen realiteit maar er wordt wel vooruitgang geboekt in de ontwikkeling ervan. De elektriciteit is o.a. ook nodig voor verwarming en luchtzuivering waarvoor ook voorzieningen zijn aangelegd. Tevens is een grote bron van schoon drinkwater nodig en voorzieningen om water te zuiveren. Een speciale ruimte is ingericht om genetisch materiaal te bewaren van belangrijke plant- en diersoorten, evenals een grote databank met kennis en instructies voor productie en reparatie van essentiële onderdelen.

Hoewel in de schuilkelders faciliteiten voor vrijetijdsbesteding aanwezig zullen zijn, zou men de omgeving na enige tijd toch kunnen ervaren als beperkt en benauwend. Na een jaar zou men wel weer naar buiten kunnen gaan, maar daar heerst een ijzige winter. Ook lijkt het onverstandig om zo kort na de ramp al contact te zoeken met de wilde overlevenden, zij zullen lange tijd een bittere overlevingsstrijd voeren en misschien pas na vele decennia of een eeuw enige maatschappelijke orde tot stand brengen. Om toch wat meer ruimte te kunnen ervaren in een geklimatiseerde ruimte, zou op het aardoppervlak naast het schuilkeldercomplex zodra de aardse atmosfeer tot rust is gekomen, een reusachtige koepel gebouwd kunnen worden. Midden hieronder zou men een stad en tuinen kunnen aanleggen om weer een beetje positief bezig te zijn en een doel te hebben zolang de inslagwinter voortduurt. Enige defensiemaatregelen zijn wellicht nodig tegen de wild overlevenden. Zij zouden de koepel mogelijk willen plunderen en bovendien wrok kunnen koesteren tegen de bewoners die daar in alle luxe leven, zich weinig aantrekkelijk van de rest van de wereld waar de mensen onder zware omstandigheden proberen te overleven. Anderzijds zouden zij zich mogelijk niet vijandig willen opstellen omdat zij de hoop koesteren dat de schuilkelderbewoners na de inslagwinter de wereld weer helpen opbouwen. Indien de locatie al afgelegen in dun bevolkt gebied lag en dan ook nog eens hard door de inslagwinter getroffen wordt, lijkt veel bemoeienis van

buitenaf ook niet waarschijnlijk. Zelfs als er een gat zou ontstaan in de koepel hoeft dat nog geen ramp te zijn, en kan het redelijk probleemloos gerepareerd worden.

Om de koepel te maken, is het handig als de onderdelen ervan al klaar liggen, en modulair (semi)automatisch in elkaar gezet kunnen worden. Een bodem die bestaat uit sterk rotsgesteente is wel nodig om de constructie te dragen. Zelfdragende koepels kunnen redelijk grote diameters hebben, ongeveer vergelijkbaar met de overspanning die gehaald kan worden tussen de pijlers van een hangbrug. De grootste overspanning van een hangbrug tot nu toe is 2 km voor de Akashi-kaikyo brug in Japan. De ingenieur Buckminster Fuller stelde in de jaren 60 van de vorige eeuw al voor, een geodetische koepel (opgebouwd uit driehoekige of vijf & zeshoekige vlakken) met een diameter van 3 kilometer te bouwen om Manhattan heen. Destijds wogen de voordelen (o.a. de besparing van stookkosten en sneeuwvrije wegen in de winter) niet op tegen de nadelen zoals de hoge aanlegkosten. Materialen om zo'n koepel te bouwen zijn bijvoorbeeld staal voor het skelet, en glasvezelcomposiet voor de ramen. In een zelfdragende koepel is sprake van zowel compressiespanning (zoals in de kroon) als trekspanning in de meridionale richting onderin de koepel. Voor een koepel in de vorm van een halve bol, met een uniforme dikte veel kleiner dan de straal wordt de hoogste compressie- of trekspanning van het dragende materiaal (σ_1) gegeven door: $\sigma_1 = \rho \cdot g \cdot R$ waarin ρ = de dichtheid van het dragende materiaal, g = de zwaartekrachtversnelling en R = de straal van de halve bol. De spanning in het dragende materiaal van de koepel wordt nog verhoogd door de belasting op de koepel (σ_2) volgens: $\sigma_2 = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot t}$ waarin R = de straal van de halve bol, Δp het drukverschil tussen de binnenkant en de buitenkant van het dragende materiaal van de koepel (mogelijk afhankelijk van plek in de koepel) en t = de dikte van het dragende materiaal. Het drukverschil kan bijvoorbeeld ontstaan door zonnepanelen en een sneeuwlaag die op de koepel liggen. Voor het draagmateriaal dient te gelden dat de spanning niet hoger wordt dan de vloeigrens vermenigvuldigd met een bepaald percentage, als veiligheidsmarge. De vloeigrens (in het Engels: Yield strength) is de spanning in het materiaal ten gevolge van de belasting (ofwel de rek) waarbij het materiaal niet blijvend vervormt. De vloeigrens van koud gewalst staal onder standaard condities is bijvoorbeeld 1240 MPa (MegaPascal). De dichtheid van het staal is 7800kg/m³, $g=9,8$ m/sec², Δp zou bijvoorbeeld op 26700 Pa gezet kunnen worden en t op 0,02 m en de veiligheidsmarge op 90% ; dan komt de diameter van de koepel uit op 3 km. Maar dit geldt voor een uniforme koepel van 2 cm dik staal, de berekening wordt wat complexer als je er rekening mee houdt dat de koepel bestaat uit een stalen skelet opgevuld met ramen. Gemakshalve is de compressiespanning die het staal kan verduren gelijk gesteld aan de gegeven vloeigrens, maar onder die grens kan in een materiaal dat onder spanning staat al verwringing (buckling) ontstaan, om dat tegen te gaan zouden de spanten van het stalen skelet mogelijk dikker moeten zijn. Maar het gaat hier nu even om de orde van grootte.

Het reguleren van het weer in de koepel is misschien niet eens zo makkelijk, mogelijk verdient het de voorkeur om de in koepel overdruk aan te brengen en de atmosfeer te verversen met lucht van buiten. Als het dan te droog wordt kan water verzameld worden van het dak en als kunstmatige regen gebruikt worden. Hoewel in het rekenvoorbeeld de koepel bestand zou moeten zijn tegen een laag sneeuw van een paar meter, is het misschien ook wel handig als de ramen open kunnen om de sneeuw te verwijderen of misschien kan dit beter van buitenaf mechanisch verwijderd worden.

Een nadeel van dit project is dat de relatief kleine groep schuilkelderbewoners het zelf moet uitvoeren. De schuilkelderbewoners zouden misschien eerder geneigd zijn veel kleinere structuren te maken om in te gaan wonen buiten de schuilkelder, en dan maar een dikke jas aan te doen om buiten wat meer ruimte te ervaren. Of misschien kan dat wel door gewoon uit grote vensters naar buiten te kijken.

Er zijn echter materialen gebaseerd op het element koolstof die aanzienlijk sterker kunnen zijn dan staal. Dit is bijvoorbeeld in kleine monsters aangetoond voor grafeen, carbynes en nanotubes van koolstof. Voor Grafeen (een tweedimensionaal kippengaasachtig netwerk van koolstofatomen) is een treksterkte van 130 GPa (GigaPascal) gemeten en voor carbynes (ééndimensionale ketens van koolstof atomen) van 270 GPa; met de toename van de dimensionaliteit neemt de sterkte af : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814000674> . Op koolstof gebaseerde 3D materialen zouden een maximale treksterkte van 65 GPa kunnen hebben. Grafeen, carbynes en nanotubes van koolstof kunnen nu alleen nog op kleine schaal gemaakt worden, en ze zijn ook niet zo maar in driedimensionale bulkmaterialen te transformeren waarin de sterkte van het materiaal voor een groot deel behouden blijft; maar dit zou met de opkomst van moleculaire nanotechnologie weleens het geval kunnen worden. Moleculaire nanotechnologie (MNT) kan opgevat worden als een soort 3D printmethode of mechanosynthese waarmee met een precisie die ligt op een atomaire of moleculaire schaal materialen in elkaar gezet kunnen worden. Supersterkte 3D materialen gebaseerd op koolstof verkregen met MNT, zijn door Eric Drexler aangeduid met de term diamantoïde (diamondoid). Daaronder worden diamantachtige materialen verstaan met dicht opeengepakte kristalstructuren van lichte elementen die een valentie van 3 of meer hebben met sterkte covalente bindingen zoals in diamant en saffier, waarin atomen vervangen kunnen zijn door bijvoorbeeld zuurstof, silicium, zwavel en stikstof. Een ander mogelijk supersterk 3D materiaal bestaat uit gestapelde lagen grafeen onderling covalent gebonden met carbynes. Een mogelijke tekortkoming van deze materialen is dat ze bros zijn. Niet brosse (taai) materialen zoals de meeste metalen bij voldoende hoge temperatuur, gaan als ze een te grote trekbelasting hebben, eerst vloeien (deformer) en vervolgens insnoeren en tenslotte breken, terwijl brosse materialen plotseling in één keer in gruzelementen uiteenspatten zodra de spanning gelijk is aan de treksterkte. Dit hoeft op zich geen probleem te zijn, maar brosse materialen hebben in het algemeen daarnaast een geringe kerfslagwaarde. De kerfslagwaarde is de energie die nodig is om een staafje materiaal met standaard doorsnede, te breken. Een voorbeeld is diamant. Hoewel het een zeer hard materiaal is met hoge compressiesterkte, breekt het makkelijk als je er met een hamer op slaat. Als gevolg van een plotselinge inslag vervormt een brose materiaal niet of nauwelijks maar kan er, ten gevolge van een lokale overbelasting, een barst ontstaan die zich door het materiaal macroscopisch kan uitbreiden. Deze kwetsbaarheid kan bestreden worden bijvoorbeeld met MNT door het materiaal zo te construeren dat het minder bros en meer buigzaam is, of door er voor te zorgen dat barsten niet kunnen uitgroeien of door het materiaal in te bedden in een taai matrix die eventuele inslagbelasting onschadelijk maakt. Overigens kunnen ook individuele moleculen van grafeen en nanotubes van koolstof last hebben van brosheid. Een defect in het koolstofskelet kan (onder spanning) makkelijk uitgroeien tot een breuk die het hele molecuul openscheurt.

Een andere benadering om super sterke materialen te maken, is het op een slimme manier verweven van grote moleculen, bijvoorbeeld zoals met een sponsachtig materiaal opgebouwd uit stukjes grafeen is gedaan door een groep MIT-wetenschappers, zie: <https://newatlas.com/3d-graphene/47304/> . Op deze manier werd een materiaal verkregen dat 10 keer zo sterk is als staal maar met slechts 5% van het soortelijk gewicht van staal. In dit geval zijn het de van der Waals krachten die het materiaal bij elkaar houden. Dit zijn op zich niet zulke sterke krachten, maar als de moleculen groot / lang en gunstig georiënteerd zijn ten opzichte van elkaar, kan er toch een relatief sterke binding ontstaan. Iets soortgelijks is zichtbaar in een materiaal dat buckypapier wordt genoemd. Dit materiaal bestaat uit nanotubes van koolstof die zodanig gegroepeerd en uitgelijnd zijn dat de sterkte van de nanotubes zelf zich vertaalt in macroscopische sterkte.

Aangenomen wordt dat in de toekomst met MNT 3D bulk-materiaal gemaakt kan worden, gebaseerd op netwerken van covalente koolstofverbindingen en/of slim verweven nanotubes van koolstof,

grafeen en/of carbynes , met een trek- en compressiesterkte van 50 GPa. Als op deze sterkte een veiligheidsmarge wordt toegepast dan kom je uit op zeg maar 33 GPa voor de maximaal toelaatbare spanning in de constructie.

Indien deze supersterke materialen inderdaad op grote schaal gemaakt kunnen worden, dan zouden vóór het optreden van een zware meteorietinslag, al koepels gemaakt kunnen worden maar dan in de vorm van een halve oblate sferoïde en afgedekt met een dikke beschermingslaag ; bijvoorbeeld met als basis een cirkel met een diameter van 30 km en een hoogte van 3 km. De afgedekte koepels die tienduizend(en) kilometers van de inslag verwijderd zijn, zouden de inslag kunnen doorstaan, omdat ze bestand zijn tegen de schokgolf en meteorietenregen. Dit soort koepels zouden ook bescherming kunnen bieden tegen natuurrampen zoals supervulkanisme (indien ver genoeg van de rampplek verwijderd) en het wegvallen van het aardmagnetisme.

De trek- en compressiespanning van de dragende constructie zelf, kan nu makkelijk opgebracht worden door het supersterke materiaal. Meer dan 99% van de sterkte van het materiaal resteert nu voor de belasting van de koepel met een laag beschermend gesteente/materiaal en begroeiing om de koepel van buitenaf het aanzien van een berg te geven. Volgens de Young-LaPlace vergelijking geldt : $\Delta p = t \cdot \left(\frac{\sigma^2}{Rm} + \frac{\sigma^2}{Rr} \right)$. Waarin Δp = het maximaal toelaatbare drukverschil tussen de binnenkant en de buitenkant van de koepel, t = de dikte van de dragende constructie, σ = de maximaal toelaatbare spanning in de constructie (trek of compressie) in radiale en meridionale richting, i.c. 33 GPa, en Rm = meridionale straal en Rr = radiale straal, i.c. 15 km en 3 km. Met $t = 1$ meter komt Δp uit op 132 bar. Dat is ruimschoots voldoende om de koepel te voorzien van een beschermende laag van 100 tot 200 meter met een gemiddelde dichtheid van 3000 kg/m³. Deze laag biedt de draagconstructie bescherming tegen ioniserende straling, oxidatie, andere chemische inwerking en inslagbelasting. In de laag kunnen ook warmteafvoer buizen en waterreservoirs aangelegd worden en op de laag (naast begroeiing) eventueel zonnepanelen. De waterreservoirs kunnen bijgevuld worden met smelt- en regenwater; mogelijk verdient het de voorkeur om dit water en daarnaast verse lucht door enkele hoofdoorten in de basis van de koepel toe te laten en het dak hermetisch afgesloten te houden.

Omdat de koepel nu niet transparant is, is wel verlichting nodig. Dit is mogelijk met LED panelen, of liever nog OLED panelen, vergelijkbaar met televisieschermen (hoewel de resolutie niet zo hoog hoeft te zijn). LED/OLED verlichting is de meest efficiënte manier om licht met elektriciteit te maken, ongeveer 80% van de energie wordt omgezet in licht. De verwachting is dat binnenkort OLED's gemaakt kunnen worden die 150 lumen per watt kunnen leveren. Voor de koepel zouden dan ongeveer 778 miljoen OLED panelen van ieder 1 vierkante meter nodig zijn. Indien deze panelen ieder 67 watt gebruiken, leveren ze elk 10000 lumen. Onderweg naar het grondoppervlak zullen er wat verliezen zijn, zeker als er bewolking is, maar het grondoppervlak dat ze beschijnen is 90% kleiner, zodat er op een onbewolkte dag ongeveer 10000 lux op het aardoppervlak terecht komt. Dat is gelijk aan de ondergrens van daglicht op een zonnige dag (indirect zonlicht). Maar dit licht is wit, wat vrij saai is. De blauwe kleur van de hemel ontstaat nu niet of nauwelijks omdat de lichtbron over de hele hemelkoepel verspreid is en het licht niet in 1 parallelle richting door de atmosfeer gaat. Mogelijk dat laag aan de horizon wel blauwkleuring zichtbaar is omdat bij een afgeplatte koepel daar relatief meer strooilicht en relatief weinig rechtstreeks licht vandaan zal komen. Maar het gebrek aan een blauwe hemel kan opgelost worden door de OLEDS in verschillende kleuren uit te zenden. Zo kan gekozen worden voor een diep blauwe achtergrond met gele cirrus-achtige patronen om netto op wit licht uit te komen, of een licht blauwe achtergrond met rode cirrus-achtige patronen, of schakeringen ertussen. In plaats van gekleurde cirruspatronen kan gekozen worden voor grote geel- tot roodkleurige zonneshijven. Een speciale zeer lichtsterke lamp met een diameter van 40 meter,

die sterk gefocust licht uitzendt zou in theorie een klein gebiedje op de grond (met een diameter niet veel groter dan die van de lamp), intens kunnen verlichten, ongeveer zoals de zon een gedeelte van de grond zou verlichten als deze door een gat van 40 meter door de koepel zou schijnen; de koepelbewoners zouden die lichtbundel kunnen zien als een jakobs ladder en degenen die in de bundel zitten zouden zich in zonschijn wanen. Dat is echter misschien veel moeite voor weinig resultaat, hoewel zo'n zonachtig licht mogelijk commercieel uitgebuit kan worden. Zo zou je zonschijn in je tuin voor een uurtje kunnen huren. De zon kan wel eenvoudig decoratief afgebeeld worden op de koepel (en schijnbaar bewegend), met een iets grotere helderheid dan de achtergrond, maar dit zal bij lange na niet in buurt komen van de felheid van echt zonlicht. Voor het overige krijg je er wel mooie optionele lichtshows bij, zeker als de panelen een 3D beeld geven. Zo zouden de koepelbewoners meer mooie nep zonsondergangen kunnen zien dan de aardbewoners erboven er echte zien, met als toetje nep noorderlicht, en 's nachts een nep sterrenhemel. Ook zijn spectaculaire vergezichten aan de horizon van bijvoorbeeld geprojecteerde besneeuwde bergketens etc., mogelijk. Een nadeel van zo'n reusachtig televisiescherm is dat het vrij duur en onderhoudsgevoelig is. Stel dat de OLED's 20 jaar meegaan dan zou je na 10 jaar kunnen beginnen om ze te vervangen. Per dag moet je dan 213000 panelen vervangen, (bijna 0,3 promille van het koepeloppervlak) om na 10 jaar klaar te zijn. Ook moet er geen tekort zijn aan energie omdat je ruim 50 Gigawatt nodig hebt aan piekvermogen voor de gezamenlijke OLED-panelen, en dan te bedenken dat er op een zonnige dag gratis een veelvoud aan zonne-energie op de koepel valt.

Verder zou je nog kunnen denken aan een ingenieus systeem van spiegels en lenzen waarmee zonlicht van buiten de koepel geconcentreerd en geleid wordt naar het koepeldak. Zoiets lijkt in vacuüm nog wel uitvoerbaar, maar bij normale luchtdruk (0,5 tot 1 atmosfeer) zijn de verliezen onderweg waarschijnlijk te groot. Misschien is het nog wel haalbaar om naast LED-panelen, aan de rand van de koepel op een hoogte van zeg maar 50 meter, lampen te plaatsen die het zonlicht nabootsen, en die elk een klein grondoppervlak bestralen. Hiervoor zouden bijvoorbeeld Xenon-lampen gebruikt kunnen worden, die een lichtspectrum geven dat sterk lijkt op zonlicht. Deze lampen zouden koepelbewoners die behoefte hebben aan zonnewarmte en vitamine D, of die bruin willen worden, een dienst kunnen bewijzen.

Een ander belangrijk facet van koepelkolonies is warmteregulatie. Net als voor de aarde als geheel, moet gelden dat er evenveel energie ingaat (in de vorm van zonnestraling of kunstmatige verlichting) als er uit gaat (in de vorm van warmte), zodat de gemiddelde temperatuur constant blijft en een aangename waarde heeft. In het gegeven voorbeeld komt er ongeveer 67 watt per vierkante meter van de LED-panelen indien ze aanstaan. Deze energie komt niet allemaal als licht op het grondoppervlak, maar zal uiteindelijk wel als warmte afgevoerd moeten worden via geleiding van de koepelwand of door afvoer van warme lucht en aanvoer van koele lucht door ventilatie. Als de zon schijnt komt er midden op de dag al gauw tegen de 1000 watt per vierkante meter op het aardoppervlak, daar staat tegenover dat de aarde warmte relatief makkelijk kan verliezen door uitstraling in de ruimte. Hoe zich de gemiddelde temperatuur instelt in de koepel is moeilijk in te schatten, dat hangt sterk af van de warmteafvoercapaciteit van de koepel. Hoe minder de koepel afhankelijk is van bronnen erbuiten, hoe beter. Daarom zou men liever niet genoodzaakt zijn om de koepel van binnen af te koelen met lucht van buiten, via ventilatie. De warmteafvoercapaciteit van de koepel kan verhoogd worden door de aanleg van warmteafvoer buizen. Een prettige bijkomstigheid daarbij is het gegeven dat het op koolstof gebaseerde draagmateriaal van de koepel ook een goede warmtegeleider is. De warmteafvoerbuizen kunnen daarom goed aangesloten worden op het kernmateriaal van de koepel. Een koepel die helemaal geen lucht van buiten nodig heeft zou een gesloten ecosysteem moeten vormen, waarin planten evenveel zuurstof produceren als de dieren consumeren (en vice versa voor kooldioxide).

Het reguleren van het weer in de koepel zou ook in dit geval nog wel eens lastig kunnen zijn. Hoe groter de koepel is, hoe groter de kans wordt op het ontstaan van natuurlijke weerpatronen, op voorwaarde dat er lokale temperatuurverschillen ontstaan. Net als op het gewone aardoppervlak, zal ook voor de koepel gelden dat de temperatuur afneemt naarmate de hoogte boven het oppervlak toeneemt. Alleen in de buurt van het dak zal de temperatuur weer toenemen, o.a. door de warmteproductie van de lichtpanelen. Ergens midden in de atmosfeer van de koepel zal relatief koude lucht ontstaan. In deze lucht zouden zich wolken en regenbuien kunnen vormen. Als er echter veel bewolking ontstaat, blokkeert dat licht afkomstig van de panelen, dat toch al minder intens is dan zonlicht op de aarde. Daarom zou men de hoeveelheid bewolking willen beperken. In dat geval zou het nodig kunnen zijn om een kunstmatig beregeningsstelsel aan te leggen. Men zou daartoe vochtige lucht kunnen afvoeren via buizen die achter de OLED panelen liggen, waarna condensatie plaats vindt in koude vallen hoog in de koepel. De benodigde kou kan geleverd worden door geïnjecteerde koude lucht van buiten de koepel. Het in de vallen opgevangen water kan dan vervolgens als kunstmatige regen via een sprinklerinstallatie naar beneden vallen. Beter zou het zijn als de regen via natuurlijk weer geregeld kan worden. Dit kan misschien door windpatronen in de koepel te creëren. Bijvoorbeeld als er in het centrum van de koepel veel wateroppervlak is en aan de randgebieden niet, dan kan er door opwarming tijdens het schijnen van de panelen, een 'zee'-wind ontstaan. In de randgebieden zouden dan door een stijgende luchtstroom stapelwolken en buien kunnen ontstaan, terwijl het in het centrum door een dalende luchtstroom mooi weer blijft. Maar het is moeilijk in te schatten of zoiets zou werken en voldoende controle zou geven.

Eén van de voordelen van koepels die al gebouwd zijn vóór het optreden van de ramp, is dat ze permanent bewoond kunnen zijn, zodat men zich ook niet druk hoeft te maken wie er in de koepel mag als bekend wordt dat de aarde wordt getroffen door een ramp; op dat moment doen de actuele bewoners de deuren van de koepel eenvoudig op slot; een klein aantal ingenieurs zal dan nog een eigen sleutel hebben om in de koepel te komen. Het aantal bewoners zou bij voorkeur ongeveer 2000 zijn, omdat dan iedereen elkaar globaal kan kennen. In de praktijk zal de bevolking wel groter zijn om allerlei onderhoudswerkzaamheden te kunnen uitvoeren, misschien wel tot 40000 mensen die hoofdzakelijk in een centraal gelegen stad wonen. Voor het vervangen van de OLED's zou men bij voorkeur robots gebruiken die beschikken over heliumballonnen om makkelijk naar het dak te vliegen.

Overigens zijn dit soort reusachtige koepels geen goede bescherming tegen militaire bedreigingen. Als het dak al bestand blijkt tegen bombardementen dan valt het op een andere manier nog wel kapot te maken. Daarnaast zullen de energie, watervoorziening en luchtverversing ook kwetsbaarheden hebben. Nu is de koepel ook in eerste instantie niet bedoeld om bescherming te bieden tegen militaire aanvallen, toch zou het wel een militair doelwit kunnen worden. Om de risico's wat meer te spreiden zou in plaats van 1 grote koepel met een diameter van 30 km, 4 kleine met een diameter van 15 km gemaakt kunnen worden. Nog kleinere afgedekte koepels maken is ook een optie, maar die geven al snel niet meer de bedoelde beleving van een bijna onbegrensde ruimte. Dan verdient het eerder de voorkeur om (na de ramp) goedkopere kleine snel en modulair te bouwen transparante koepels te bouwen, zoals het gegeven voorbeeld van een koepel met een stalen skelet, maar nu dan gemaakt van veel lichter op koolstof gebaseerd materiaal.

Het is ook mogelijk kleinere koepels op de bodem van de oceaan te plaatsen. Bijvoorbeeld een halve bol met een straal van 1,5 km en een dikte van 1 meter (van supersterk diamantoïde materiaal) op een oceanbodem van 3 km diep. Zo'n koepel moet vastgemaakt zijn aan een zware bodemplaat om hem te kunnen laten afzinken, bij voorkeur met alles wat nodig is en iedereen die erin wil wonen er al vast in. Als afzinken te gevaarlijk is, zou de koepel en de bodemverankering misschien ook nog wel onder water in elkaar gezet kunnen worden (hoewel technisch complexer omdat onder hoge

waterdruk gewerkt moet worden), maar dan moet in de nok van de koepel een super sterke buis lopen naar het zeeoppervlak om het water in de koepel door weg te pompen en daarna de benodigdheden en inwoners naar binnen te transporteren. In de buis kan een wenteltrap of een lift zijn aangelegd; in de versie zonder buis zou in de nok een onderzeeër kunnen aankoppelen. Zo'n diepzeekolonie heeft echter niet zo veel voordelen, behalve dan dat er op de bodem van de oceaan veel ruimte beschikbaar is, en je goed geïsoleerd zit. Verversing van lucht, het verzamelen van zoet water, energie opwekking (kernenergie of aardwarmte) en transport naar de buitenwereld zijn allemaal lastiger. De militaire kwetsbaarheid is daarnaast groot. En de koepel kan niet zo groot zijn, door de hoge waterdruk die verder geen doel dient. Mogelijk verdient het de voorkeur om honderden kleinere koepels te maken bijvoorbeeld met een hoogte van 200 meter en een diameter van 800 meter op een zeebodembedpte van 400 meter, die via gangen met elkaar verbonden zijn. Deze koepels zouden vervolgens gecamoufleerd kunnen worden bijvoorbeeld met zeewier. Het is denkbaar dat een populatie die met een naderende apocalyps, zijn toevlucht heeft gezocht in zo'n onderwater koepelcomplex, door de buitenwereld vergeten wordt, en daar voor de eeuwigheid geïsoleerd komt te zitten.

Hoewel koepels de meest voor de hand liggende structuren zijn om grote afgesloten ruimtes te maken op een planeet, zijn andere weliswaar kleinere maar spectaculaire ruimtes mogelijk, als schuilplaats. Bijvoorbeeld een natuurlijke of kunstmatige inham in een steile onderzeese kustrotswand zou afgesloten kunnen worden met een reusachtig venster van transparant diamantoïde materiaal, ongeveer een meter dik. Met dit materiaal zouden vensters van honderd meter hoog en honderden meters breed gemaakt kunnen worden. Achter het venster kan een met lucht gevulde en verlichte ruimte ingericht worden. De zeediepte hoeft niet groot te zijn, een paar honderd meter zou volstaan, op die diepte is het zeeleven ook het meest levendig o.a. mogelijk met koraalriffen. De bewoners van zo'n ruimte zitten als het ware in een omgekeerd aquarium; de vissen kijken vanuit het water naar de mensen die in een luchtbel leven. Wederom geldt dat er een (kern)energiecentrale nodig is voor de productie van elektriciteit en vervolgens licht, waarna het licht gebruikt kan worden door planten om via fotosynthese zuurstof te leveren en kooldioxide op te nemen. In dit geval is het nog mogelijk om ventilatiekanalen te maken door het rotsgesteente naar het landoppervlak, om op die manier lucht te verversen.

Reusachtige vensters van diamantoïde materiaal zouden ook in steile rotswanden (met een natuurlijke of kunstmatige inham/grot) op land geplaatst kunnen worden, om op die manier een schuilplaats met mooi uitzicht te maken. De vraag is of dit soort vensters de schokgolf van een zware meteorietinslag kunnen doorstaan. De vensters zouden extra beveiligd kunnen worden met speciale gepantserde luiken, die niet transparant hoeven te zijn en bij naderend onheil gesloten kunnen worden.

2. Kolonies op de Maan, Mars, en ijsmanen in het zonnestelsel

Behalve een inslag van een zware meteoriet zijn er andere rampen denkbaar waardoor de huidige technologische beschaving fataal getroffen kan worden. Dit zijn andere natuurrampen of rampen waarvan de oorsprong buiten de aarde ligt of rampen die de mensheid over zichzelf heeft afgeroepen. Die laatste zijn misschien wel de meest aannemelijke rampen die op korte termijn al zouden kunnen optreden. Het succes van onze geavanceerde techniek en het economische groeimodel, dat een miljarden tellende en nog steeds groeiende bevolking mogelijk maakte, kan ons namelijk langzaam maar zeker boven het hoofd gaan groeien. De technologische en politieke aanpak van toekomstige milieuproblemen (zoals uit de hand lopende klimaatverandering en vervuiling), voedselschaarste en uitputting van natuurlijke hulpbronnen en grondstoffen, kunnen te kort gaan schieten en leiden tot een mondiale (kern)oorlog, chaos en anarchie. Een mondiaal totalitair regime

zou dit kunnen voorkomen door een heel strikt beleid dat gericht is op verduurzaming en reductie van de wereldbevolking door een 1-kindpolitiek. Gezien de onenigheid die er nu al is, lijkt het onwaarschijnlijk dat zoiets tot stand komt. Ook kan het zijn dat de afhankelijkheid van geavanceerde techniek ons de das om doet, vooral als het gaat om geautomatiseerde systemen en in de toekomst kunstmatige intelligentie. Door ontwerpfouten, sabotage of storingen kunnen geautomatiseerde systemen uitvallen, of niet meer doen wat we er van wensen of zich zelfs tegen ons keren. Omdat we de grip dan zijn verloren op de achterliggende techniek en die techniek inmiddels alom tegenwoordig en via netwerken zeer wijd verbreid is geraakt, zijn de consequenties ingrijpend en is reparatie misschien niet meer mogelijk. Als mensen zich afhankelijk hebben gemaakt van robots die men het overgrote deel van het werk laat opknappen, en die robots geven er op een gegeven moment de brui aan, dan hebben mensen een behoorlijk probleem. Ergens is het wel voorstelbaar dat naarmate robots steeds geavanceerder en intelligenter worden zij hun buik vol krijgen van mensen voor wie het nooit genoeg is en die altijd meer willen. Je hoeft dan ook niet raar op te kijken als op een goeie dag die robots in ligstoelen blijven liggen om voortaan alleen nog maar wat te dromen en te filosoferen. Iets soortgelijks is mogelijk met uit de hand gelopen biotechnologie en nanotechnologie. Daarnaast kan de mensheid door hoge bevolkingsdichtheden en globalisering extra vatbaar blijken voor fatale besmettelijke ziektes al dan niet per ongeluk of door kwaadwillenden verspreid. Het kan ook zijn dat het succesverhaal van de technologische vooruitgang gewoon doorgaat en we in een technologische stroomversnelling terecht komen, die voor de mensheid zelf en zijn omgeving ingrijpende gevolgen heeft. Dat zou een ontwikkeling kunnen zijn die we goed zouden vinden als ze optreedt maar die we vooraf, als dat mogelijk zou zijn, als een regelrechte ramp zouden beschouwen.

De meeste van deze over ons zelf afgeroepen rampen zullen niet direct tot het uitsterven van de mensheid leiden maar eerder tot een maatschappelijke terugval mogelijk zelfs naar een preïndustrieel niveau zoals we gekend hebben in de middeleeuwen. Maar vooral uit de hand lopende kunstmatige intelligentie, bio- en nanotechnologie kunnen in theorie ook bedreigend zijn voor het voortbestaan van het biologische leven zoals we dat nu kennen, in het algemeen. Het kan ook zijn dat een door ons zelf afgeroepen ramp leidt tot een langdurige mondiale oorlog waarin moderne wapens gehandhaafd blijven. Vluchten in een afgedekte of onderzeese koepel waar nog redelijk te leven valt, heeft dan weinig zin omdat zo'n koepel een militair doelwit wordt. Daarnaast zijn er natuurrampen denkbaar die een einde kunnen maken aan al of vrijwel al het leven. Zo'n ramp zou een botsing tussen de aarde en een planeet zoals Mercurius, een dwergplaneet of een losgeslagen interstellaire planeet, kunnen zijn. Je zou ook nog kunnen denken aan een extreme gammaflits, die al het leven op aarde uitschakelt. De kans op zo'n ramp is echter zo klein dat voordat zich zoiets zou voordoen, de aarde waarschijnlijk al onleefbaar is geworden door de toenemende straling van de zon. De zon verandert namelijk langzaam maar zeker in een zogenaamde rode reus; verondersteld wordt dat over ongeveer een miljard jaar de straling van de zon te intens begint te worden voor het leven op het oppervlak van de aarde. Tenslotte zou het leven op aarde ook nog bedreigd kunnen worden door een invasie van aliens, of een aanval van aliens gericht op de aarde.

In een aantal van de zojuist geschetste scenario's volstaat het niet meer om te vluchten in een ondergrondse of onderzeese koepel ook al is zo'n koepel geheel zelfvoorzienend, maar zou gevlucht moeten worden naar plaatsen buiten de aarde. Deze scenario's zijn echter zo onwaarschijnlijk of zulke verre toekomstmuziek dat nu nog niet van overheden verwacht mag worden dat ze budgetten gaan besteden aan het aanleggen van buitenaardse toevluchtoorden. Er kunnen echter andere redenen zijn om toch buitenaardse koloniën of buitenposten te stichten. Redenen om dit te doen zouden commercieel kunnen zijn; bijvoorbeeld industrie en mijnbouw op de maan of op planetoïden of ruimtetoerisme op de maan. Mijnbouw en industrie zouden eventueel nog kunnen met

onbemande ruimtevaart en robots. Echter als de robottechnologie nog niet ver genoeg gevorderd is, zijn er ook mensen voor nodig, die ergens gehuisvest moeten worden. Overigens is het sowieso handig als je astronauten hebt, om satellieten te repareren, ruimteschroot rond de aarde op te ruimen, en om eventuele gevaarlijke objecten op ramkoers naar de aarde onschadelijk te maken, zolang er nog geen robots zijn om dit werk helemaal zelfstandig op te knappen. Daarnaast zouden sommige buitenposten in het zonnestelsel die voor de aarde van militair strategisch belang zijn, opgericht kunnen worden, vooral op de Maan. De Maan zou ook dienst kunnen doen als een tussenstation voor missies naar andere plaatsen in het zonnestelsel. De inhaligheid naar nieuwe bronnen van kostbare grondstoffen en strategische posities in het zonnestelsel, zou overigens tot conflicten kunnen leiden tussen staten of bedrijven. Pogingen om dat via wetgeving, verdragen etc. in goede banen te leiden zouden kunnen mislukken omdat de handhaving moeilijk zal zijn. In de begin fase zal het mogelijk zijn zoals in het wilde westen: de brutaalste en meest opportunistische pioniers die het best bewapend zijn, hebben de meeste kans op succes. Het tot stand brengen van een nederzetting op Mars daarentegen, zou in eerste instantie vooral een prestigeproject kunnen zijn. Een bemande reis naar Mars (ongeveer 7 maanden), een gedwongen verblijf (circa 500 dagen, eventueel korter) en vervolgens een terugkeer (eveneens 7 maanden) zou als een mediaspektakel opgezet kunnen worden. Mogelijk concurrerend met een bemande missie naar Mars, zijn onbemande missies vooral bedoeld om te proberen sporen van leven op Mars te vinden. Los hiervan zouden megalomane multimiljardairs en niet overheidsorganisaties misschien een ruimtekolonie willen oprichten als een technologisch en maatschappelijk experiment, bevrijd van controle door de overheid.

Als geprobeerd wordt om een kolonie te stichten buiten de aarde bijvoorbeeld op Mars, moet men zich wel realiseren dat de leefruimte die daar gemaakt kan worden bij lange na niet kan tippen aan wat we hier op aarde hebben, zowel qua landschap en ruimte als natuurlijke rijkdom. Het leefbaar houden van de aarde zou daarom verreweg de hoogste prioriteit moeten hebben. De meeste mensen zullen dit onderschrijven. In de praktijk zie je toch dat het eigenbelang overheerst en de aarde een afnemende natuurlijke rijkdom ondergaat. Hoewel je kan leren van je fouten, is het aannemelijk dat mensen hun zwakheden en karakterfouten meenemen in de ruimte, mochten ze daarnaar toe verhuizen. In ruimtekolonies zal de mensheid dan net zo goed als op de aarde, zichzelf in de problemen kunnen brengen. Misschien wordt de mensheid in een ruimtekolonie eerder op de vingers getikt door geautomatiseerde (kunstmatig intelligente) systemen die nodig zijn om de kolonie te beheren. In een extreem geval zouden de kolonisten in een dictatuur van kunstmatige intelligentie terecht komen. Het omgekeerde is ook mogelijk namelijk dat mensen de aarde verlaten juist om te ontkomen aan het juk van kunstmatige intelligentie. Hoewel het verstandig is om vooral te investeren in de aarde, en beleid te ontwikkelen dat de leefbaarheid van de aarde in stand houdt en dat zelfs gericht zou moeten zijn op het terugdringen van de mensheid ten gunste van andere diersoorten, zou best een klein deel van al onze inspanningen (zeg maar 1 %) gericht kunnen zijn op de ruimte. Dat zal voor een deel onbemande ruimtevaart en astronomie zijn, vooral in het kader van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek. Maar dat zou ook bemande ruimtevaart en het ontwikkelen van ruimtekolonies kunnen zijn, in eerste instantie alleen in ons zonnestelsel, omdat ons dat toch nog wel eens van pas zou kunnen komen, en omdat het een interessante uitdaging is.

Als het gaat om mijnbouw op de maan wordt vaak gewezen op de isotoop helium-3, waarvan bekend is dat er een beetje van aanwezig is in de regoliet van de maan. Helium-3 is een mogelijke energiebron voor een tweede generatie kernfusiereactor. Eerst zal dan bezien moeten worden of een eerste generatie kernfusiereactor ontwikkeld kan worden die draait op tritium en deuterium. Dan nog blijft het de vraag of deze mijnbouw wel rendabel zou zijn, zelfs als men beschikking zou hebben over een ruimtelift. Een ruimtelift is een hypothetische lift die beweegt langs een kabel die

begint aan de evenaar en reikt tot voorbij de geostationaire baan op 35786 km hoogte naar een tegengewicht. De kabel wordt strakgetrokken door een balans tussen de zwaartekracht en de centrifugaal kracht die daar tegenin werkt. Zo'n kabel moet minimaal zijn eigen gewicht kunnen dragen zonder overbelast te raken. Dit gaat het meest efficiënt als de kabel het dikst is op de geostationaire baan (waar de trekkrachten het grootst zijn) en geleidelijk dunner wordt naar het oppervlak van de aarde, en andersom naar het tegengewicht aan de andere kant van de kabel. Om op een aanvaardbare maximale dikte uit te komen zou het materiaal van de kabel een zeer hoge specifieke treksterkte moeten hebben (treksterkte gedeeld door de dichtheid van het materiaal). Dit begint ongeveer bij een waarde voor de specifieke treksterkte van 40 Mega N.m/kg . Met nanotubes van koolstof zou dat misschien haalbaar zijn. Er zitten echter nog wel meer haken en ogen aan een ruimtelift, zoals de hinder die ontstaat voor satellieten, de kwetsbaarheid van het systeem en de afhankelijkheid van de exploitant. Mogelijk zouden grote mogendheden of bedrijven toch al vast de meest veel belovende, en militair strategisch interessant gelegen plekken op de Maan in beslag willen nemen, en daartoe bestaande rakettechnologie gebruiken, ook al zou de hele onderneming niet direct winstgevend zijn. Eén van die locaties is de Shackleton krater aan de zuidpool van de Maan, waarin zich in het schaduwgedeelte wat water in de vorm van ijsafzetting, zou bevinden. Aan de randen van de krater schijnt de zon juist bijna altijd, wat zo zijn voordélen heeft. Er circuleren plannen om daar een ondergrondse nederzetting op te zetten, en uiteindelijk de hele krater af te dekken met een geodetische koepel gemaakt van een geraamte van titanium en ramen van glasvezelcomposiet. De met lucht gevulde koepel zou een diameter van 40 km krijgen en een hoogte van ongeveer 1,5 km. De keuze valt nu op titanium omdat dat op de maan eenvoudiger is te winnen en te produceren dan staal. Al de materialen voor de koepel en zijn atmosfeer worden zoveel mogelijk uit de regoliet van de maan gewonnen. Voor sommige stoffen zoals het stikstof voor de atmosfeer (maar bijvoorbeeld ook koolstof en waterstof) is dat waarschijnlijk wat lastiger. Zie <https://space.nss.org/shackleton-dome-is-a-domed-lunar-city-possible/> voor meer informatie. Op de Maan kan eenvoudiger dan op de aarde een grote zelfdragende koepel gemaakt worden dan op de aarde omdat de zwaartekrachtversnelling 6 keer zo klein is, en omdat de koepel ondersteund wordt door een atmosfeer terwijl tegendruk op de koepel ontbreekt. Dit geldt in iets mindere mate ook voor Mars. Indien de opwaartse druk van de atmosfeer groter is dan neerwaartse druk die de zwaartekracht op de koepel uitoefent, zal de koepel uiteraard wel goed verankerd moeten worden. Toch zou het verstandig kunnen zijn om niet geheel te vertrouwen op de ondersteuning van de atmosfeer, omdat door een ongeval de luchtdruk (deels) zou kunnen wegvallen. In dat geval zou de koepel van zich zelf voldoende sterkte moeten hebben om niet in te storten. Op de Maan en op Mars zouden ook grote afgedekte koepels gemaakt kunnen worden, die voorzien zijn van kunstmatige verlichting. Het voordeel van deze koepels is dat zij kosmische straling kunnen tegenhouden, indien de afdeklaag dik genoeg is. De voorkeur zal in eerste instantie echter uitgaan naar transparante koepels die direct kunnen profiteren van zonlicht en die eenvoudiger zijn om te construeren.

Het ontbreken van een atmosfeer boven de koepel heeft echter ook nadelen. Zo zal een koepel op de Maan of op Mars eerder te maken krijgen met kleine meteorieten die nu niet kunnen verdampen of verbranden in de atmosfeer en die daarom een groter gevaar zijn voor het beschadigen van de koepel dan op de aarde. En als er dan zo'n inslag optreedt kan er een gat ontstaan in de koepel waaruit lucht ontsnapt. Ook al omdat lucht op de Maan of op Mars een schaars product zal zijn, zal er snel een noodreparatie uitgevoerd moeten worden. Indien de noodreparatie niet lukt zou de hele koepel geëvacueerd moeten worden, en de atmosfeer die nog niet weggelekt is, gered moeten worden door deze met speciale pompen over te brengen naar een opslagplaats.

Een ander nadeel van het (vrijwel) ontbreken van een atmosfeer op de Maan en op Mars is het hoge stralingsniveau aan het oppervlak ten opzichte van de aarde; dit wordt nog versterkt door het vrijwel

ontbreken van een beschermende magnetosfeer. De straling voor astronauten op de Maan is nog hoger dan voor astronauten in het ISS (International Space Station) omdat de lage baan die het ISS beschrijft nog enige bescherming ondervindt van het magneetveld van de aarde. In het ISS ontvangen astronauten ongeveer 80 tot 200 mSv (milliSievert) kosmische straling per jaar, op de maan zal dat ongeveer 110 tot 380 mSv per jaar zijn zonder additionele bescherming, met de hoogste waarde tijdens een minimum in zonneactiviteit. Deze doses worden nog hoger als andere bronnen zoals deeltjesstraling van de zon, meegeteld worden. Op de aarde is de gemiddelde dosis straling per jaar maar 3 à 4 mSv (alle bronnen). Het gevaarlijke deel van de straling op de Maan bestaat onder meer uit deeltjes (voornamelijk protonen) afkomstig van de zon en de kosmos. De kosmische straling is hoger van energie en bevat ook deeltjes zwaarder dan een proton. De straling van deeltjes van de zon, kan tijdelijk sterk toenemen door het uitbarsten van zonnevlammen. De deeltjesstraling van de zon, kan tegengehouden worden door het materiaal van de koepel vooral als de koepel als een kooi van Faraday functioneert. De kosmische straling is moeilijker om tegen te houden. Het kan door een dikke laag massa op te werpen waar de straling zijn energie in verliest (waarin het ook nog gevaarlijke secundaire straling zoals neutronenstraling uitzendt). Een laag van 5 meter regoliet zou echter voldoende moeten zijn. In dit geval kan dat niet toegepast worden omdat de koepel transparante ramen heeft om zonlicht door te laten (via een spiegel om in de krater te kunnen schijnen). Wel houdt de massa van de atmosfeer in de koepel straling tegen. De massa per oppervlak is op de bodem van de krater, 4 km diep, maar ongeveer de helft van die van de aardse atmosfeer op zeeniveau bij dezelfde luchtdruk, en daarboven nog minder. De straling zou daarom eigenlijk nog verder teruggebracht moeten worden. Dit zou deels kunnen door dikke ramen te gebruiken bij voorkeur met een redelijk hoog percentage waterstof. Waterstof is het element dat de straling het meest efficiënt tegenhoudt. Tenslotte is het in theorie mogelijk om geladen deeltjes tegen te houden door ze af te buigen met een zelf aangelegd elektrisch of een magnetisch veld. Een elektrisch veld kan gemaakt worden met een Van der Graaff versneller, en een magnetisch veld kan gemaakt worden met een hoge temperatuur supergeleider. Voor zo'n grote constructie als hier voorgesteld, is zo'n veldkracht-stralings scherm in dit vroege stadium van de bouw van ruimtekolonies echter lastig uitvoerbaar.

Een derde nadeel van kolonies op de Maan, is de lage gravitatieversnelling. De zwakke zwaartekracht lijkt leuk, en dat is het ook, want je kan op de maan reusachtige sprongen maken, en zelfs vliegen in de koepel indien vleugels aan je armen zijn bevestigd. Maar op langere termijn kan allerlei gezondheidsschade ontstaan omdat het menselijk lichaam niet is aangepast op het ontbreken van zwaartekracht of het ondervinden van slechts een klein beetje zwaartekracht. De lage zwaartekracht kan 's nachts gecompenseerd worden, door de slaapkamers in een centrifuge te plaatsen die kunstmatige zwaartekracht ofwel centrifugaal kracht opwekt. Een centrifuge met een straal van een paar honderd meter zou voldoende moeten zijn voor dit doel. De vraag is echter of de dagelijkse schommeling in zwaartekrachtversnelling wel zo goed te verdragen is op lange termijn. Op Mars is de zwaartekrachtversnelling misschien hoog genoeg om wel goed op te kunnen aanpassen voor de lange termijn. Maar ook hier zouden ongewenste fysieke veranderingen kunnen optreden.

Zo'n gigantisch project als de bouw van de gesuggereerde koepelkolonie op de Maan kan alleen volbracht worden als er robots beschikbaar zijn voor bouw ervan, en de mens alleen een bescheiden sturende rol op afstand heeft. Maar als de robottechnologie zo ver gevorderd is, hoef je ook geen kolonie meer te maken voor menselijke arbeiders om te werken in de mijnbouw en industrie, want dat kan dan ook wel gedaan worden door de geavanceerde robots. Het stichten van een gewone kolonie op de Maan als alternatief voor wonen op de aarde, ligt niet voor de hand omdat de geringe zwaartekracht op de Maan waarschijnlijk niet geschikt is voor mensen die er de rest of een groot deel

van hun leven gaan wonen. Daar komt nog bij dat de Shackleton-krater bijvoorbeeld, ook nog wel anders gebruikt kan worden namelijk als een geschikte locatie voor een infraroodtelescoop.

Het ligt daarom meer voor de hand om eerst een buitenpost op de maan te maken voor een klein aantal gespecialiseerde bezoekers, bijvoorbeeld zoals het Vostok-station op Antarctica dat is voor zuidpoolonderzoekers. De eerste buitenpost op de Maan zal waarschijnlijk gemaakt moeten worden met mechanische of semiautomatische middelen, omdat geavanceerde robottechnologie nog niet voor handen is. Ook kan in dit stadium nog nauwelijks het regoliet van de Maan als bron voor de constructiematerialen en een kunstmatige atmosfeer, gebruikt worden. Wel zal het al mogelijk zijn om met 3D printers (door middel van sinteren) stenen te maken van het regoliet van de Maan die bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden voor het tegenhouden van straling. Het regoliet van de maan is overigens geen prettig spul. Het bestaat uit een zeer fijne poederachtige stof die makkelijk verstuift, blijft kleven en op de longen slaat. De belangrijkste onderdelen die niet op de Maan voor handen zijn (of daar eenvoudig gemaakt kunnen worden) zullen echter meegenomen moeten worden van de aarde. Omdat de vracht die men met een raket kan meenemen maar beperkt is, zal men zoveel mogelijk gebruik moeten maken van natuurlijke grotten en lavakanalen om een luchtdichte afgeschermd ruimte te maken. Eerst zullen waarschijnlijk onbemande missies ondernomen worden om zo'n geschikte locatie te vinden. Tevens zal dan gezocht worden naar water in de eeuwige schaduw van diepe kraters. Als dat water niet of nauwelijks gevonden wordt zou dat de hele onderneming een stuk lastiger maken. De lavakanalen die als basis dienen van de buitenpost zullen bij voorkeur gezocht worden ten noorden van 80° graden NB of ten zuiden van de 80° ZB, omdat het mooi zou zijn als de hoofdruimte van de buitenpost uitzicht heeft op het maanlandschap en de aarde die dan niet al te hoog boven de horizon staat. Door de gebonden rotatie van de Maan, zal op een gegeven locatie op de voorkant van de Maan, de aarde ongeveer op een vaste plek aan het firmament, zichtbaar zijn. Zonder dit uitzicht op de aarde zou de buitenpost flink saaier worden, en is dan misschien niet eens de investering waard. De beste locatie zou dicht tegen de noord of zuidpool aanliggen omdat dan geprofiteerd kan worden van vrijwel continue zonschijn. Aangezien de nachten op de maan een halve maand duren, is dat een groot voordeel. Als een geschikte locatie gevonden is, kan begonnen worden met het opzetten van de buitenpost.

Eerst worden eventuele lekken in de wanden van de lavakanalen gedicht waardoorheen lucht zou kunnen ontsnappen. Gecontroleerd wordt of er zich niet te veel radon ophoopt. Als dit wel het geval is, is het misschien geen geschikte locatie. Zonnepanelen worden geïnstalleerd op het maanoppervlak en elektriciteitskabels worden aangelegd naar de lavakanalen. Luchtsluizen worden aangebracht tussen de lavakanalen en een gang naar het maanoppervlak. Dan wordt ijs uit kraters (gesteld dat het er is) overgebracht naar de lavakanalen. Dan volgt een serie maanlandingen waarin de bouwmaterialen van het bovengrondse deel van de buitenpost worden afgeleverd. Dit bestaat uit platen en balken aluminium of titanium en een groot raam van robuust transparant materiaal dat het buitenvenster wordt met uitzicht op de aarde (zeg maar 10 meter breed en 6 meter hoog). Het liefst zou men het venster maken van het regoliet op de maan, maar dit zal in dit stadium technisch waarschijnlijk te moeilijk zijn, vanwege de hoge eisen waar het glas aan moet voldoen. De platen worden aan elkaar gelast en verbonden met luchtsluizen, tevens worden stikstofcapsules afgeleverd in de lavakanalen. 1 ton stikstof is genoeg voor 1 kubieke hectometer lucht. Het hoofdvenster wordt geplaatst en de gehele constructie wordt luchtdicht gemaakt. De wanden en het dak worden door robots bedekt met een laag stenen van regoliet van ruim 5 meter dik. Dan wordt uit het water (dat als ijs was aangevoerd) via elektrolyse zuurstof gemaakt, en de stikstof capsules worden opengedraaid. LED verlichting wordt aangebracht in de lavakanalen en er worden planten neergezet, voor de voedselvoorziening en om CO₂ op te nemen. Enige zorgen zijn er voor kleine meteorietinslagen vooral in het grote venster. Mogelijk kan een detectie systeem voor kleine

meteorieten op enige afstand van de nederzetting, uitkomst bieden. Als een meteoriet gedetecteerd is die koerst richting het grote venster, dan veert op enige afstand van de nederzetting via een razendsnelle optische schakeling een pantserscherm ophoog dat de gevaarlijke meteoriet opvangt of afketst. Voor energieopslag wordt gebruik gemaakt van waterstof, zuurstof en brandstofcellen die buiten het gedeelte met zuurstof-atmosfeer staan opgesteld in verband met de brandveiligheid. Tenslotte wordt een stralingsschild geplaatst rond het grote venster, zodat geladen deeltjes worden afgebogen van het venster. En dan komen er nog een paar stoelen en een tafel en een fles wijn en een paar glazen, en nog wat andere kleinigheden (een kurketrekker bijvoorbeeld).

Tot zover de Maan, dan Mars. Mars heeft een aantal voordelen ten opzichte van de Maan. Mars heeft meer minerale rijkdom dan de Maan zoals koolstofverbindingen (waaronder kooldioxide) en er is op enige diepte wat water op Mars in tegenstelling tot op de Maan. Op Mars zijn ook kleiachtige mineralen, zodat keramische producten gemaakt kunnen worden zoals bakstenen, en er is ook gips als grondstof voor cement. Op Mars is daarnaast zand (voornamelijk siliciumdioxide). Hieruit kan glas en glasvezel gemaakt kunnen worden. Indien veel energie beschikbaar is, zou ook silicium gemaakt kunnen worden voor de productie van zonnepanelen. Ook andere metalen zoals ijzer, titanium, aluminium en koper zouden geproduceerd kunnen worden. Ook zouden voldoende grondstoffen aanwezig zijn om staal te produceren. Wel zou het handig zijn als men beschikking heeft over een kernreactor voor de benodigde energie. Mars heeft daarnaast een zwaartekrachtversnelling die ruim twee keer zo hoog is als die op de Maan. Dat laatste zou mensen minder aanpassingsproblemen kunnen geven bij een langdurig verblijf. Mars heeft een bijna normale daglengte van 24 uur en ongeveer 40 minuten, terwijl de Maan een daglengte heeft van een maand. Nadelen zijn er echter ook. Een reis naar Mars duurt 6 à 8 maanden met de huidige rakettechnologie indien de aarde en Mars in gunstige baanposities verkeren, terwijl een reis naar de Maan maar een paar dagen duurt. Voor een energiezuinige reis naar Mars zal gebruik gemaakt worden van een Hohmann transferbaan. Zo'n baan maakt een reis naar Mars tamelijk lang qua afstand (al gauw 500 miljoen km, terwijl de minimale afstand tussen aarde en Mars bijna tien keer zo klein is). Bovendien kan zo'n reis slechts eens in de 26 maanden gestart worden, voor de juiste relatieve posities van de aarde en Mars. Om de zelfde reden is een verblijf op Mars al gauw minimaal 500 dagen om de juiste relatieve posities van Mars en de aarde te verkrijgen voor de terugreis. Zo'n lange reis levert een hoge blootstelling aan kosmische straling op waartegen men zich moeilijk kan beschermen, omdat de meegenomen massa die eventuele bescherming zou kunnen bieden, maar beperkt kan zijn. De intensiteit van de kosmische straling tijdens de reis van aarde naar Mars zal 2 keer zo groot zijn als op de Maan, omdat de Maan de straling aan 1 kant afschermt met zijn massa. Gebrek aan gravitatie in de raket zal tot aanpassingsproblemen leiden op Mars. Dit kan opgelost worden door een centrifuge in de raket te bouwen voor kunstmatige zwaartekracht, maar dat is een kostbare maatregel. Landen en opstijgen op Mars is ook lastiger vanwege de grotere gravitatie en de ijle kooldioxide atmosfeer. Het gedwongen verblijf op Mars zou korter dan 500 dagen kunnen zijn maar dan zal een aanzienlijk minder energiezuinige baan gekozen moeten worden voor de terugreis. Speciale tamelijk kostbare maatregelen zullen genomen moeten worden om voldoende brandstof te hebben voor de terugreis. (Eén van de voorgestelde methoden is het vooruitsturen van een onbemande sonde met waterstof en een raketinstallatie voor de terugreis. Vervolgens wordt met het meegenomen waterstof en het kooldioxide dat al aanwezig is op Mars, methaan en zuurstof geproduceerd via een sabatier-reactie gekoppeld met elektrolyse, om op een efficiënte wijze aan brandstof voor de terugreis te geraken.) Bovendien is Mars ook nog een kurkdroge woestijn die regelmatig geteisterd wordt door stofstormen; dit kan zonnepanelen ineffectief maken, en communicatie belemmeren. Radiocommunicatie met de aarde zal een vertraging kennen van 3 minuten tot ruim 20 minuten als beide planeten in conjunctie verkeren. Verder heeft Mars last van een bodem die giftig is vanwege

de aanwezigheid van perchloraten. En dan mist Mars ook nog het mooie uitzicht op de aarde dat de Maan wel biedt, hoewel de aarde wel als een venusachtige planeet te zien zal zijn. Voor het overige geldt ook op Mars dat je er een kolonie kan maken door in een diepe krater, laagvlakte of een kloof een koepel te maken en die te vullen met lucht of dat je er buitenposten maakt door lavatunnels te vullen met lucht. Mogelijk zou Mars het voordeel bieden dat er in sommige lavatunnels direct al ijs beschikbaar is en dat stikstof op Mars zelf verzameld kan worden omdat het in geringe mate in de atmosfeer van Mars zit. Interessante locaties voor een kolonie of buitenpost zijn bijvoorbeeld de door Mars rover Curiosity bezochte Gale krater, Valles marineris (een 4000 km lange kloof tot 7 km diep met een gemiddelde breedte van 200 km), grotten in de vulkaan Arsia Mons, de bijna 5 km diepe caldera van Pavonis Mons, de Korolev krater met daarin een laag ijs van bijna 2 km dik en de uitgestrekte diepe inslagkrater Hellas planitia . Vooral de smallere delen van Valles marineris zijn interessant als vestigingslocatie. In de kloof zou je misschien een reeks koepels met diameters van 10 km en een hoogtes van een paar kilometer kunnen neerzetten die onderling verbonden zijn met tunnels. Op de randen van de kloof zet je dan stralingsschermen neer en installaties die gevaarlijke meteorieten kunnen onderscheppen, mogelijk met behulp van lasers. Het niveau van de kosmische straling op Mars zal iets lager liggen dan op de Maan door het afschermingseffect van de ijle CO₂ atmosfeer, zo tussen de 100 mSv en 300 mSv per jaar, met de laagste waarden voor laag gelegen gebieden zoals Hellas planitia en de hoogste waarden voor de hoog gelegen gebieden zoals de Tharsis vulkanen.

Maar voor Mars is er mogelijk nog een optie. Meer dan andere hemellichamen in het zonnestelsel leent Mars zich voor terravorming. Terravorming is het omvormen van een onbewoonbare planeet tot een bewoonbare. Ooit was Mars waarschijnlijk een tamelijk vriendelijke planeet met vloeibaar water in oceanen, meren en rivieren en een redelijk dichte atmosfeer; sporen van watererosie zijn nu nog zichtbaar op het marsoppervlak. Verondersteld wordt dat Mars zijn atmosfeer grotendeels verloren heeft door zonnestormen die vrij spel kregen door het wegvallen van de magnetosfeer van Mars. Deze magnetosfeer verdween waarschijnlijk door het stollen van de buitenkern van Mars. Mogelijk is de atmosfeer van Mars daarnaast onvoldoende aangevuld door het ontbreken van plaattektoniek. De gedachte is dat als Mars zijn magnetosfeer zou terugkrijgen de atmosfeer zich zou kunnen herstellen, als daarnaast begonnen zou worden om de polen met kooldioxide ijs te verhitten (bijvoorbeeld met lasers of spiegels of door middel van explosieven). Op deze wijze zou een CO₂-atmosfeer ontstaan van voldoende druk om zonder een speciaal ruimtepak in rond te lopen (uiteraard wel met een zuurstofmasker), en zou een globale opwarming plaatsvinden waardoor vloeibaar water aan het oppervlak ontstaat. Er bestaan echter wel twijfels over of hiertoe wel voldoende kooldioxide beschikbaar is op Mars, om dat met de huidige technologie voor elkaar te krijgen. Daarnaast zou ook de hoeveelheid water die nog op Mars aanwezig is, kunnen tegenvallen. Er is wel eens gesuggereerd dat Mars zijn magnetosfeer zou kunnen terug krijgen door de buitenkern weer vloeibaar te maken met behulp van nucleaire explosies of door er een elektrische stroom door heen te laten lopen. Eventueel zou aan Mars daarnaast een kunstmatige magnetosfeer gegeven kunnen worden bijvoorbeeld door de aanleg van supergeleidende ringen rond Mars. Het is echter de vraag of dit zou werken. Al zou het wel werken en uitvoerbaar zijn, dan nog zou het hele proces lang duren. Misschien dat het op de lange duur (denk aan meerdere eeuwen) dan mogelijk zal zijn om met gewone kleren en alleen een zuurstofmasker rond te lopen op Mars. De volgende stap zou dan het introduceren van zuurstof in de atmosfeer van Mars, zijn. Dit is misschien mogelijk op de zelfde wijze als dat op de aarde gebeurd is, namelijk door zuurstofproductie eerst van cyanobacteriën en daarna van planten, met dit verschil dat de cyanobacteriën en planten kant en klaar van de aarde geïntroduceerd worden. De antibacteriële omstandigheden op Mars zouden echter zelfs voor de meest resistente soorten en op de meest beschutte plekken toch nog te vijandig kunnen zijn.

Bovendien al zou het proces werken, dan nog zou het ook weer erg lang duren. Mogelijk kan een zuurstof atmosfeer op een snellere wijze gemaakt worden door verspreid over Mars chemische fabrieken neer te zetten die uit kooldioxide en gesteentes zuurstof vrijmaken. Dit kost wel veel energie maar met compacte kernfusiecentrales zou dat geen probleem hoeven zijn, eventueel zouden hiertoe ook nog wel zonnepanelen gebruikt kunnen worden. Een deel van het zuurstof dat geproduceerd wordt zal terug-reageren met mineralen aan het oppervlak van Mars, wat het creëren van een zuurstofatmosfeer, bemoeilijkt. Waarschijnlijk bevat Mars te weinig stikstofverbindingen om stikstof aan de atmosfeer toe te voegen zodat een atmosfeer verkregen wordt met voldoende druk, zuurstof en met een redelijk hoog gehalte aan stikstof. Een ijle zuurstofatmosfeer tussen 0,2 en 0,4 bar zou echter voor mensen voldoende zijn om in te leven. Het introduceren van een atmosfeer met zuurstof en eventueel stikstof blijft wel problematisch omdat bij temperaturen vergelijkbaar met de aarde, de zwaartekracht op Mars niet sterk genoeg is om deze gassen langdurig vast te houden. Zuurstof en eventueel stikstof zouden bij-geproduceerd moeten worden om hiervoor te compenseren. Dit probleem wordt extra groot als men er niet in slaagt om Mars zijn magnetosfeer terug te geven. Bovendien blijft de intensiteit van schadelijke straling op Mars dan aan de hoge kant. Een andere optie is om de atmosfeer van Mars aan te vullen met bronnen van buiten Mars. Te denken valt aan het laten neerstorten van planetoïden met vluchtige verbindingen zoals water, ammoniak en kooldioxide. Hoewel weinig subtiel zou op deze wijze extra broeikasgassen en stikstof aan de atmosfeer toegevoegd kunnen worden. Op Mars zou het ammoniak onder invloed van UV-licht ontleden in stikstof en waterstof. Het waterstof zou dan snel ontsnappen aan de atmosfeer, en het stikstof maar erg langzaam. Het zou echter onverstandig zijn om zo met grondstoffen in de planetoïden om te gaan. De planetoïden zijn meer interessante mijnbouwlocaties dan Mars zelf, omdat de grondstoffen niet of nauwelijks uit een zwaartekrachtput gehaald hoeven worden. Met waterstof in planetoïden zou je bijvoorbeeld zuinig willen zijn omdat het een bron is van deuterium voor toekomstige kernfusiereactoren. Eventueel kan in plaats van stikstof argon gebruikt worden om de luchtdruk nog wat te verhogen. Argon heeft een hogere atoommassa en zou daardoor minder snel aan de zwaartekracht van Mars ontsnappen. Een nadeel van argon is echter dat het twee keer zo narcotisch is als stikstof en beter oplosbaar in water dan stikstof, en daarnaast ook niet direct in de benodigde hoeveelheden beschikbaar op Mars. Indien een zuurstof atmosfeer gecreëerd wordt, waarin mensen kunnen leven zal wel het CO₂ gehalte onder circa 0,2% gebracht moeten worden. Zo'n verlaging van het CO₂ gehalte (nadat gasvormig CO₂ eerst juist toegevoegd was om vloeibaar water aan het oppervlak te krijgen) zal tot een afname van het broeikaseffect van dit gas leiden en vervolgens mogelijk tot een te grote afkoeling. Dit zou dan met sterke exotische kunstmatige broeikasgassen tegengegaan kunnen worden. Vooral zwavelhexafluoride lijkt hiervoor een goede kandidaat te zijn. Dit is een broeikasgas dat 23000 keer zo sterk is als kooldioxide. Hoewel zwavelhexafluoride een geurloos gas is dat in lage concentraties niet giftig is voor mensen en niet ozon afbrekend is, zijn de lange termijn effecten van dit gas niet bekend en het is ook niet eenvoudig om het in de benodigde hoeveelheden te maken op Mars. Al met al is terravorming van Mars omgeven met meerdere fundamentele problemen en bezwaren en is het sowieso op korte termijn niet haalbaar.

Elders in het zonnestelsel bevinden zich ook nog wel interessante locaties. Planetoïden die zich vooral in een baan tussen Jupiter en Mars bevinden, zijn mogelijk geschikt voor het delven van edelmetalen, andere metalen en mineralen, maar ook water in de vorm van ijs. Daarnaast zijn ijsmanen mogelijke kandidaten voor het vestigen van een nederzetting, in het bijzonder de rond Jupiter draaiende ijsmanen Callisto, Ganymedes en Europa. Dit zullen wel missies worden die van een nog hogere moeilijkheidsgraad zijn dan de oprichting van een buitenpost op de Maan of op Mars.

Europa is geheel bedekt door ijs en heeft onder dat ijs vloeibaar water dat wel eens de grootste oceaan van het zonnestelsel zou kunnen zijn. De ijslaag zou ongeveer 10 tot 30 km dik zijn volgens de meeste modellen, en de laag vloeibaar water eronder 100 km. Het water onder de ijslaag wordt vloeibaar gehouden vooral door de warmteproductie ten gevolge van de getijdenwerking van Jupiter, maar ook wel door warmte uit de kern door radioactief verval. Europa is iets kleiner dan de Maan en zijn gravitatieversnelling aan het oppervlak bedraagt ruim 13% van die van de aarde. Een reis vanaf de aarde naar Europa zal al gauw ruim 3 keer zo lang zijn als een reis naar Mars via een Hohmann-transferbaan of nog langer ten opzichte van een reis naar Mars als voor een reis naar deze bestemmingen een kortere en minder energiezuinige route gekozen wordt. Met ongeveer 5,4 Sv per dag ontvangt Europa een grote dosis straling (meer dan 5000 keer zo veel als de Maan) die voornamelijk bestaat uit elektronen afkomstig van de stralingsgordel van Jupiter (een krachtige versie van de buitenste VanAllen-gordel rond de aarde) ; de straling is niet overal gelijk, aan de polen is er iets minder straling. Zodra een raket geland is kan toch maar beter zo snel mogelijk bescherming gezocht worden in de ijslaag van Europa door er een gat te boren (of te smelten). De plaats waar men in de ijslaag gaat boren moet ver van convectiezones liggen waar ijs en smeltwater omhoog wordt geduwd, of subductiezones waar het ijs juist naar beneden wordt getrokken. Door de hoge stralingsintensiteit, de al wat grotere afstand tot de zon, en de noodzaak van beschikbaarheid van energie diep in de ijslaag, zijn zonnepanelen niet meer zo geschikt voor het opwekken van energie. Daarom is eigenlijk vereist dat de kolonisten over een compacte verplaatsbare kernfusiereactor of een vergelijkbare energiebron, beschikken. Een eerste nederzetting die in de ijslaag gemaakt kan worden, zou een ruimte kunnen zijn van 1 kubieke kilometer. Het ijs dat men weg boort of smelt, wordt vervangen door lucht op een druk van 1 atmosfeer. Het zuurstof van de lucht is wederom verkregen door elektrolyse van water en het stikstof is meegenomen met raketten, mogelijk via meerdere landingen van eerdere missies. Via een luchtsluis wordt het overtollige ijs of water afgevoerd naar het maanoppervlak. Er wordt zoveel ijs weggehaald dat er een dak van 80 meter dik ijs overblijft. Het 80 meter dikke ijs dat het dak vormt zou een druk uitoefenen (indien het los zou liggen) die gelijk is aan de luchtdruk eronder. Hierdoor hoeft geen sterke dakconstructie gemaakt te worden. Enige afscherming is wel nodig, mocht bijvoorbeeld hier en daar wat ijs afbrokkelen. De afscherming kan bestaan uit een plaat aluminium waartegen aan de onderkant OLED-panelen zijn bevestigd voor de verlichting. Het aluminium zit verankerd in de wanden van de ijsholte met warmteafvoerbuizen, zodanig dat voorkomen wordt dat de warmteproductie van de lichtpanelen leidt tot het afsmelten van het ijs waaruit het dak bestaat. Afhankelijk van de totale warmteproductie in de ijsholte zal zich bij bepaalde afmetingen een evenwicht instellen waarin er evenveel warmte afgevoerd wordt als aangevoerd, en het ijs van de wanden niet meer verder afsmelt. De gemiddelde luchttemperatuur zal zich instellen op ongeveer nul graden Celsius. De nederzetting zelf, zal als een (eventueel drijvend) eiland in smeltwater op de bodem van de ijsholte liggen. Nu is een leefbare ruimte gecreëerd, met normale luchtdruk en een voldoende laag stralingsniveau dankzij het dikke dak van ijs, alleen is de temperatuur van gemiddeld nul graden, enigszins onaangenaam. Dit kan opgelost worden door om de nederzetting een transparante koepel te plaatsen. Nu kan desgewenst een (sub)tropisch klimaat met (sub)tropische begroeiing ingesteld worden, bovendien kan de binnenste koepel gebruikt worden voor het aanleggen van een beregeningssysteem. Eén en ander zal wel flink in de papieren gaan lopen, want alle grondstoffen die nodig zijn, behalve water, zullen per raket van elders aangevoerd moeten worden. Het tweede stadium van verkenning zal een verplaatsing dieper in de ijslaag naar de onderliggende oceaan zijn. Eventueel zou dieper in de ijslaag een tweede ijsholte gemaakt kunnen worden, maar dan moet het omliggende ijs wel van voldoende kwaliteit en samenhang zijn. Het zou mogelijk moeten zijn om met een speciaal voertuig door het ijs te boren en als onderzeeër verder te gaan als men eenmaal in de onder gelegen oceaan is uitgekomen. Nu zal in die oceaan waarschijnlijk niet veel te beleven zijn, hoewel sommige biologen

vermoeden dat zich er wel eens leven zou kunnen bevinden. Als dit leven er al is, zal het echter waarschijnlijk slechts ééncellig leven zijn, hoewel je niet kunt uitsluiten dat het een geliefd kuuroord is voor aliens die van duizenden lichtjaren ver komen. De verkenning van de oceaan met een onderzeeër wordt bemoeilijkt door de hoge waterdruk. Op de bodem van de oceaan is de waterdruk nog hoger dan op de bodem van de circa 11 km diepe Marianentrog in de stille oceaan, ondanks de lage gravitatieversnelling op Europa. Op het grensvlak van het water en het ijs, zitten mogelijk natuurlijke uitsparingen. Het kan niet uitgesloten worden dat die uitsparingen gevuld zijn met bijvoorbeeld kooldioxidegas afkomstig uit de oceaan. Het is echter twijfelachtig of ze gebruikt kunnen worden om nederzettingen van te maken, vanwege de hoge druk en het dynamische karakter van de ijs-oceaan laag ten gevolge van de getijdenwerking.

Europa is een goede kandidaat voor het vinden van leven omdat het een grote door ijs afgedekte oceaan heeft die met een sonde bereikbaar is en daarnaast tekenen van geologische activiteit vertoont die de bron van het leven in de oceaan kan zijn. Juist omdat Europa zo'n goede kandidaat is voor het vinden van primitief leven, dat onafhankelijk van het leven op aarde kan zijn ontstaan, zou een onbemande missie naar de oceaan van Europa, met als doel dat leven in kaart te brengen (als het er tenminste is), meer voor de hand liggen. De sonde die door de ijslaag gaat boren zou dan volledig gesteriliseerd moeten zijn, om besmetting met aardse bacillen te voorkomen. Menselijke nederzettingen zijn dan vooral onhandig en zullen op langere termijn juist wel tot besmetting leiden. Een mogelijk alternatieve ijsmaan voor het stichten van een nederzetting is de buitenste Jupiter maan Callisto. Callisto ligt net buiten de stralingsgordel van Jupiter. Callisto is daarnaast geologisch niet actief, en ondervindt ook nauwelijks opwarming door de getijdenwerking van Jupiter. Een eventuele nederzetting in de korst van Callisto zou daarom ook geen hinder ondervinden van bevingen of andere bedreigende bewegingen zoals die wel optreden in de korst van Europa. Alleen is de korst van Callisto niet zo'n mooie homogene ijslaag als Europa's ijslaag. Er zouden echter wel stukken tamelijk zuiver ijs aan het oppervlak van Callisto aanwezig kunnen zijn, waarin een zelfde nederzetting gebouwd zou kunnen worden zoals beschreven voor Europa. De aanwezigheid van andere mineralen zou juist een voordeel kunnen zijn, zo zou uit ammoniak, stikstof gemaakt kunnen worden ten behoeve van de atmosfeer in de nederzetting. Voor Ganymedes, de grootste maan van Jupiter (en van het gehele zonnestelsel), geldt globaal het zelfde. Behalve qua baanpositie zit Ganymedes ook qua karakter enigszins tussen Europa en Callisto in. Zowel Callisto als Ganymedes zouden ook ondergrondse oceanen hebben, alleen liggen die op grotere (daarom moeilijker te bereiken) diepte. Op de Galileïsche ijsmanen van Jupiter (met uitzondering van Io) zouden ook kleinere en goedkopere buitenposten neergezet kunnen worden op het oppervlak, bijvoorbeeld in de vorm van koepels gevuld met lucht (met een diameter van zeg maar 50 meter), die nu van ijs gemaakt zijn, dat versterkt is met vezels met hoge treksterkte, of eventueel nog sterkere constructies met ijs als afdek materiaal. Deze kleinere oppervlakte-gebouwen zouden via luchtsluizen in contact kunnen staan met grotere ondergrondse ruimtes. Het zou ook hier een gemiste kans zijn, als deze koepels niet zouden zijn uitgerust met een groot venster ditmaal met uitzicht op Jupiter het liefst laag boven de horizon. Ook hier zou een stralingsschild gebruikt kunnen worden om straling die door het venster naar binnendringt tot een aanvaardbaar niveau terug te dringen. Op Europa is de schijnbare diameter van Jupiter ongeveer 24 keer die van de volle Maan gezien vanaf de aarde, voor Ganymedes is die factor ongeveer 15 en voor Callisto ongeveer 8,5. Buitenposten op de Galileïsche ijsmanen van Jupiter zouden een onderdeel kunnen uitmaken van de infrastructuur ten behoeve van de winning van helium-3 uit de atmosfeer van Jupiter en eventueel antimaterie uit de magnetosfeer van Jupiter, hoewel helium-3 mogelijk beter uit de atmosfeer van Uranus en Neptunus gehaald kan worden omdat men daar minder last van straling en hoge ontsnappingsnelheden heeft dan op Jupiter en Saturnus.

Behalve de Galileïsche ijsmanen van Jupiter zijn er rond andere verder weg gelegen planeten nog wel meer interessante (ijs)manen. Daarnaast heb je nog de grote Kuiper gordel objecten of dwergplaneten zoals Eris en Pluto met zijn maan Charon. Maar er zijn nog 2 niet eerder genoemde plekken in het zonnestelsel die speciale vermelding verdienen, en dat zijn de planeet Mercurius en de Saturnusmaan Titan. Mercurius is gedurende zijn rotatie om de zon vaak dicht bij de aarde gelegen dan Mars, maar het lijkt op het eerste gezicht een onaantrekkelijke plek voor het stichten van een kolonie. De zon beschenen kant van Mercurius is inderdaad verzengend heet, maar net als de Maan heeft Mercurius nabij de polen diepe kraters die in eeuwige schaduw verkeren. Verondersteld wordt dat zich hier ook wat ijs heeft opgehoopt, vermoedelijk meer dan op de Maan. De schaduwkant van Mercurius is ook weer enigszins vergelijkbaar met de schaduwkant van de Maan, behalve dan dat een etmaal op Mercurius 176 dagen duurt. Als je 's nachts nabij de evenaar op Mercurius rondloopt moet je een wandeltempo van gemiddeld ongeveer 4 km/uur tegen de rotatierichting in aanhouden, om niet langzaam naar de zonsopkomst toe te roteren. Dit is vooral spannend als je er al niet al te ver vandaan bent, en je in de verte al de bergen ziet gloeien van de hitte. Buitenposten op Mercurius zouden een rol kunnen spelen in de winning van zonne-energie, vanwege de hoge intensiteit van zonlicht rondom de baan van Mercurius. De Saturnus maan Titan is vooral interessant vanwege zijn atmosfeer die qua druk vergelijkbaar is met de atmosfeer op de aarde (ongeveer 1,5 keer zo hoog). De atmosfeer bestaat uit stikstof en een beetje methaan, en in geringere hoeveelheden andere organische stoffen zoals het giftige blauwzuur. Het heeft een oranje kleur die vermoedelijk is toe te schrijven aan de aanwezigheid van aerosolen van tholines. Methaan in de atmosfeer (maar ook blauwzuurgas) kan condenseren tot wolken en regen. Het oppervlak van Titan bestaat o.a. uit bevroren koolwaterstoffen en bevroren ammoniak en meren van vloeibaar methaan en ethaan. Het is met -180°C erg koud op Titan, en deze kou zal door de dichte atmosfeer voor eventuele bezoekers hard aankomen. Hoewel een eventuele buitenpost op Titan zou kunnen profiteren van de bescherming die de atmosfeer biedt tegen kosmische straling, moet Titan toch gezien worden als vijandig voor menselijke bewoning. Een buitenpost zou in ieder geval moeten bestaan uit goed afgesloten verwarmde ruimte gevuld met lucht en een systeem om zuurstof te produceren en CO_2 en andere verontreinigende gassen af te vangen. Daarnaast is er weinig zonlicht aan het oppervlak zodat een andere energiebron nodig is. Titan is misschien ook wel iets voor toekomstige avonturiers die zich met speciale vliegtuigen/boten zouden kunnen verplaatsen door de atmosfeer en over de meren. Vliegen gaat nogal makkelijk op Titan vanwege de dichte atmosfeer en lage gravitatie, zodat een vliegtuig makkelijk ook als boot en misschien ook wel als onderzeeër gebruikt kan worden.

De meeste van de tot nu toe beschreven buitenaardse nederzettingen zouden gebouwd kunnen worden zodra de ruimtevaarttechnologie nog wat verbetering ondergaat en geavanceerde robots op de markt komen die goedkope arbeid kunnen verrichten buiten de dampkring van de aarde. Als de nederzettingen éénmaal gebouwd zijn, is het vervolgens de vraag wie er naar toe zou willen en er langere tijd zou willen verblijven. Je zou aan de rand van een zwembad kunnen zitten tussen tropische begroeiing in een koepel die is aangelegd in het ijs van Ganymedes, maar je zou je dan net zo goed op de aarde kunnen wanen, behalve dan dat de zwaartekracht zwakker is. Maar die zwakke zwaartekracht kon ook al op de Maan ervaren worden, en die is een stuk eenvoudiger te bereiken. De nederzettingen zullen daarnaast niet zo aantrekkelijk zijn omdat ze sterk gelimiteerd zijn in grootte. Het aantal mensen dat er in zou kunnen wonen zou ongeveer liggen tussen tien en duizend voor een grotere koepel op de Maan of Mars. Ook zou de lage zwaartekrachtversnelling bij een langer verblijf tot gezondheidsproblemen kunnen leiden. De ruimere nederzettingen die als koepel op de Maan of op Mars zijn neergezet zullen daarnaast gevaar lopen op meteorietinslagen die tot gevolg kunnen hebben dat de bewoners (tijdelijk) hun toevlucht moeten zoeken tot krappe schuilkelders. Er zouden wel kandidaten voor de nederzettingen kunnen zijn, indien een tamelijk lang

verblijf erin, goed betaald zou zijn. Hoewel in dit scenario goedkope arbeid door geavanceerde robots, beschikbaar is, zou het toch kunnen dat toezicht van mensen nodig is over aanlegwerkzaamheden, eventuele mijnbouw in de omgeving en wetenschappelijk onderzoek, vooral als de afstand tussen de buitenpost en de aarde groot is en de communicatie daardoor bemoeilijkt is. Een korter verblijf in zo'n buitenaardse buitenpost zou daarentegen onder de noemer toerisme kunnen vallen. Indien goedkope robotarbeid, de ruimte en de grondstoffen voor handen zijn, hoeven de beweegredenen om de buitenposten te maken, ook niet heel sterk te zijn. Indien goedkope arbeid door geavanceerde robots in de ruimte nog langere tijd op zich laat wachten, zijn wel nog echte astronauten nodig voor het bouwen van buitenaardse buitenposten, maar dan zal het al moeilijk genoeg zijn om basale nederzettingen op de Maan en op Mars neer te zetten; dit zou vooral het terrein van avonturiers en ontdekkingsreizigers zijn.

Het gegeven dat mensen niet goed tegen het ontbreken van een zwaartekrachtversnelling of een lage zwaartekrachtversnelling kunnen, wordt door sommigen gezien als een beperking waar mensen die er voor gekozen hebben de aarde te verlaten, zich van zou moeten bevrijden, door genetische aanpassingen. Als mensen eenmaal gewend zijn aan het ontbreken van zwaartekracht, ligt de ruimte open om vol te bouwen met ruimtekolonies die niet of nauwelijks belast hoeven te zijn met zwaartekracht, wat een aanzienlijk voordeel is (als dat is wat we zouden moeten willen). Je zou nog verder kunnen gaan door de ambitie te koesteren mensen te laten veranderen in cyborgs die ook geen atmosfeer meer nodig hebben en beter tegen straling kunnen. De overheersende opvatting is (voorlopig) echter dat mensen vooral biologische wezens horen te blijven en machines ondergeschikte apparaten die mensen tot dienst zijn. Ook op een biologische aanpassing aan een lage zwaartekrachtversnelling zal een taboe rusten, want zo iets zal gepaard gaan met uiterlijke veranderingen waarover negatief geoordeeld zal worden. Uit ijdelheid en gehechtheid aan de orde zoals de mensheid die gewend is, zal in eerste instantie niet afgeweken willen worden van een basisomgeving waarin de zwaartekracht ongeveer zo is als op de aarde. Nu bestaat de mogelijkheid om ruimtekolonies te maken door reusachtige ring of cilindervormige constructies die in een baan om de zon zijn gebracht, te laten roteren. De centrifugaal kracht die aldus aan de binnenkant van de ring of cilinder ontstaat kan zodanig ingesteld worden dat deze vrijwel gelijk is aan de zwaartekracht zoals die op aarde wordt ervaren. In het volgende hoofdstuk zullen deze hypothetische ruimtekolonies nader worden toegelicht.

3. Ruimtekolonies in de vorm van roterende ring- of cilinderachtige constructies

In 1929 stelde John Desmond Bernal een holle roterende bol met een diameter van 16 km voor als een toekomstige ruimtebasis, waar in de binnenkant ten gevolge van de centrifugaal kracht kunstmatige gravitatie heerst. De centrifugaal kracht zal niet helemaal de zelfde uitwerking hebben als gewone gravitatie, vooral niet bij een kleine rotatiediameter. Bij een rotatiediameter kleiner dan een halve kilometer zal er een verschil in versnelling zijn tussen voet- en ooghoogte die groot genoeg is om fysieke hinder van te krijgen. Bij een hoeksnelheid groter dan 2 rotaties per minuut kunnen bovendien corioliskrachten optreden die tot misselijkheid en andere ongemakken kunnen leiden. De toekomstige ruimtebases die nagestreefd worden, zullen echter rotatiediameters hebben die ruimschoots groot genoeg zijn om dit soort neveneffecten te voorkomen. De grootte van de centrifugaal versnelling (g) wordt gegeven door: $g = \omega^2 \cdot R$, waarin ω de hoeksnelheid is en R de straal van het roterende object. In dit geval leveren ruim 20 rotaties per uur een centrifugaal versnelling op van 10 m/sec^2 (ongeveer gelijk aan de aardse gravitatieversnelling) op, tenminste aan de binnenkant van de evenaar van de roterende bol. Richting de polen van de bol neemt de kunstmatige gravitatie af naar nul. De relatief kleine zone waarin de kunstmatige gravitatie de gewenste waarde heeft, wordt gezien als een nadeel van dit ontwerp. De zone waarin centrifugaal versnelling precies goed is,

kan uitgebreid worden door in plaats van een bol een cilinder te laten roteren. De cilinder is afgesloten met twee halve bollen, om zo een atmosfeer te kunnen vasthouden. De afsluiting van de cilinder kan ook efficiënter met meer afgeplatte kappen. Een dergelijke roterende cilinder wordt ook wel een O'Neill cilinder genoemd, naar Gerald O'Neill die in de jaren 70 van de vorige eeuw dit type ruimtehabitat nader onderzocht. O'Neill stelde voor om twee tegengesteld roterende cilinders te koppelen tot 1 geheel om netto op nul impulsmoment uit te komen; hierdoor blijft het ruimtestation bestuurbaar en kan het bijvoorbeeld telkens goed gericht blijven op de zon; de cilinders werken dan als een stel reactiewielen. Een alternatief voor een O'Neill cilinder is een roterende ring, zoals de Stanford torus die destijds door de NASA is voorgesteld. Een roterende ring heeft een rotatiediameter die groter is dan de lengte van de ring die parallel loopt met de rotatie-as, bij een O'Neill cilinder is dat precies andersom. De Stanford torus is voorzien van een transparant dak (waarvan de doorsnede de vorm van een halve cirkel heeft), om een atmosfeer vast te kunnen houden, wat het geheel de vorm geeft van een donut of een torus.

Een O'Neill cilinder heeft als voordeel dat hiermee het grootste bewoonbare oppervlak gemaakt kan worden. Het vergroten van de rotatiediameter stelt steeds hogere eisen aan de treksterkte van het draagmateriaal van de constructie terwijl dat niet geldt voor het verlengen van de cilinder. Ook levert een O'Neill cilinder de meest gunstige verhouding tussen het totale constructieoppervlak en het bewoonbare oppervlak. Maar de cilindervorm heeft ook nadelen. Zo zal verlichting door de zon bij een O'Neill cilinder bij voorkeur plaats vinden door ramen die liggen in het gedeelte van de constructie dat belast wordt met de hoogste trekkrachten. Daarbij zijn bovendien spiegels nodig die buiten de habitat moeten meedraaien met de cilinder, wat een extra punt van kwetsbaarheid is. Een O'Neill cilinder is bovendien in principe instabiel, omdat de rotatie om de as in de lengte van de cilinder niet het grootste traagheidsmoment levert maar de rotatie om de as die daar loodrecht op staat. Hierdoor kan de cilinder bij kleine verstoringen uiteindelijk gaan tuimelen, wat een catastrofe zou zijn. Bij de gekoppelde tegengesteld roterende O'Neill cilinders wordt dit tegengegaan, maar dit kan gezien worden als een vorm van actieve stabilisatie om een regelrechte ramp te voorkomen die je vooral voor zeer grote constructies zoveel mogelijk zou willen beperken. Dit probleem van rotatie-instabiliteit wordt opgelost door de lengte van de cilinder niet hoger te laten worden dan 1,3 maal de straal van de cilinder, zoals bij het Kalpana-one ruimtehabitat ontwerp, is toegepast. Zelfs als de massadistributie in de cilinder zoveel mogelijk symmetrisch is, zullen door verplaatsingen in de habitat ook hier verstoringen optreden die leiden tot schommelingen in de rotatie, maar die leiden niet tot een desastreuze tuimeling en ze zouden actief gedempt kunnen worden bijvoorbeeld met regelbare waterreservoirs aan de buitenste rand van de habitat. In zeer grote habitats zouden schommelingen sowieso minder sterk zijn omdat daar de vastliggende massa veel groter is dan de bewegende massa op voorwaarde dat de vaste massa wel volledig symmetrisch is aangelegd. De bewegingen die er wel zijn zullen bovendien bij een verregaande opschaling elkaar steeds meer grotendeels opheffen. Een ander voordeel van dit ontwerp is dat voldoende zonlicht in de habitat kan worden toegelaten via spiegelopstellingen (evt. glasvezel-optiek) in het centrale deel van de afsluitkappen. Indien de roterende ring noord-zuid georiënteerd is zou dat aan beide kanten kunnen.

De grootste habitat die O'Neill voorstelde had een rotatiediameter van 6,4 km en een lengte van 32 km. De materialen die voor de constructie voorgesteld werden, waren staal of titanium voor de romp en kwarts voor de ramen. Een materiaal zoals Kevlar zou nodig zijn voor de kabels die de spiegels verbinden met de romp. Kalpana-1 is voorgesteld als een kleine, minimale ruimtehabitat. Om aantrekkelijke kolonies te kunnen worden, zouden ruimtehabitats echter veel groter moeten zijn. Dat is mogelijk, zoals besproken voor koepels op de aarde, als via MNT op koolstof gebaseerd supersterk materiaal voor de draagconstructie beschikbaar komt. De maximale trekspanning in de constructie mag dan oplopen tot circa 33 GPa. De relatie tussen deze spanning en parameters die de roterende

cilindervormige habitat kenmerken luidt: $\sigma = \rho \cdot g \cdot R + \frac{\Delta p \cdot R}{t}$ waarin ρ = de dichtheid van het draagmateriaal is, g = de centrifugaal-versnelling (9,8 m/sec² om de aardse gravitatie te benaderen), R = de rotatiestraal van de habitat, Δp = het drukverschil tussen de binnenkant en de buitenkant van het draagmateriaal en t = dikte van het draagmateriaal. Hieruit volgt dat de maximale rotatiestraal ongeveer 1000 km kan zijn, indien uitgegaan wordt van een dichtheid van 2500 kg/m³ van het draagmateriaal (zoals ongeveer geldt voor grafeen verbonden met carbynes of voor verweven nanotubes van koolstof). Indien uitgegaan wordt van een diamantoïde materiaal zou de dichtheid eerder 3500 kg/m³ zijn, zodat de maximale rotatiestraal wat kleiner is (zie: <http://www.zyvex.com/nanotech/nano4/mckendreePaper.html#RTFToC18>). Indien de dikte van het draagmateriaal 400 meter is, kan Δp 32 bar zijn, wat behalve een atmosfeer met normale luchtdruk ook een laag materiaal van 300 meter dik met een gemiddelde dichtheid net iets hoger dan die van water toelaat, om een landschap met hoogteverschillen mee te vormen. Indien een kleinere rotatiestraal wordt gekozen is er nog wel meer mogelijk of hetzelfde met een dunner laag MNT-materiaal. De laag van MNT materiaal kan nog dunner gemaakt worden als het mogelijk is om hoogteverschillen al in deze laag aan te brengen. Massief hooggebergte en kilometers diepe oceanen zijn niet of nauwelijks mogelijk, maar met speciaal sponsachtig licht gesteente op basis van SiO₂ (of eventueel aerogel) zou men wel hier en daar wel tot een berg van meer dan 1 kilometer hoog kunnen komen. De bergen zouden dan bekleed kunnen worden met platen graniet, kalksteen of een ander massief gesteente, voor het gewenste uiterlijk. Aan de randen van de habitat waar het draagmateriaal moet afbuigen om de atmosfeer te kunnen vasthouden zou wel iets gemaakt kunnen worden wat op hooggebergte lijkt, met onder andere een laag eeuwige sneeuw. Sommige van deze bergen zouden bedekt kunnen worden met een laagje goud om de rijkdom van de habitat mee te tonen. In plaats van oceanen zouden niet al te diepe meren of kleine zeeën aangelegd kunnen worden, omdat verstoringen dan minder grote gevolgen hebben voor de massadistributie. Overigens heeft de constructie van ruimtehabitats zo groot als middelgrote landen of continenten pas zin als de levensduur van zo'n habitat behoorlijk groot is, zeg maar meer dan een miljoen jaar. Een levensduur van een miljoen jaar is al ongekend lang voor een door mensen gemaakt bouwwerk, ook al zou dat in dit geval met behulp van geavanceerde robots voor elkaar gekregen zijn. Om zo lang mee te gaan zou het MNT-materiaal dat onder spanning staat, beschermd moeten worden tegen fysische en chemische invloeden die tot degradatie zouden kunnen leiden. Dit zou kunnen door het materiaal in te bedden in een aantal bescherm lagen. Hoewel het MNT-materiaal dat belast is met hoge trekkrachten waarschijnlijk niet onderhouden kan worden, zal dat wel gelden voor de bescherm lagen die er omheen zitten.

Een O'Neill cilinder die met MNT-materiaal gemaakt is wordt ook wel een McKendree cilinder genoemd. De oorspronkelijk voorgestelde dimensies waren 460 km voor de rotatiestraal en 4600 km voor de lengte. Voor rotatiestabiliteit zouden 2 van zulke naast elkaar gelegen en tegengesteld roterende cilinders gekoppeld kunnen worden. Daarmee komt deze habitat voor elk van de twee cilinders op een oppervlak bijna zo groot als Antartica. Het maximale bewoonbare oppervlak van een enkele McKendree cilinder is met een straal van 1000 km en een lengte van 10000 km (indien de verhouding tussen rotatiestraal en cilinderlengte niet groter dan tien mag zijn), bijna 63 miljoen vierkante km, groter dan het landoppervlak van Azië en Europa gecombineerd. Afgezien van de immense operatie om zoiets te maken zijn er wel wat bezwaren aan te voeren tegen een dergelijke constructie. Een enkele McKendree cilinder heeft een inherente rotatie-instabiliteit en zou daarom gekoppeld moeten zijn aan een tweede cilinder met een gelijk maar tegengesteld impulsmoment. Voor het koppelen van de cilinders is een lagersysteem nodig in een niet roterend gedeelte van de constructie bijvoorbeeld nabij de afsluitkappen. Dit systeem zou gebaseerd kunnen zijn op diamagnetische repulsie zoals bereikt zou kunnen worden met supergeleiders (Meissner effect). Of

dit op deze gigantische schaal zou kunnen werken is nog maar de vraag. De tweede cilinder is mogelijk ook te plaatsen binnen de eerste cilinder. De straal van de tweede cilinder moet dan minimaal 50 tot 100 km kleiner zijn dan de buitenste cilinder om ruimte te geven aan de atmosfeer van de habitat. Om op het zelfde maar tegengestelde impulsmoment uit te komen moet de binnenste cilinder een grotere massa hebben dan de buitenste cilinder wat betekent dat nog meer MNT-draagmateriaal nodig is (compenseren via het verhogen van de hoeksnelheid van de binnenste cilinder leidt tot meer spanning in die cilinder). Deze oplossing verdient sowieso niet de schoonheidsprijs want de bodem van de binnenste cilinder zal een egaal (verlichtings)veld moeten worden, om niet stapelgek van snel roterende patronen te worden en het wordt lastig om dan een aanvaardbaar dag-nacht ritme te creëren. De tweede cilinder met tegengesteld impulsmoment kan ook juist buiten de eerste geplaatst worden, met maar een kleine hoeksnelheid zodat er maar lage constructie-eisen aan gesteld hoeven te worden. Deze buitenste cilinder kan dan als een beschermhuls voor de eigenlijke habitat gebruikt worden. Wel moet de massa van die cilinder dan twee ordes hoger zijn dan van de habitat, die toch ook al aardig veel massa zal hebben. Eventueel zouden nog een paar kleinere cilinders binnen de habitat geplaatst kunnen worden maar nu met een zelfde rotatierichting, als het van belang zou zijn zo veel mogelijk bewoonbaar oppervlak binnen 1 constructie te maken. Dit zou dan wel ten koste gaan van het uitzicht dat bewoners van de buitenste cilinders hebben op het hemelgewelf. Een extreme oplossing van het probleem van rotatie-instabiliteit zou juist een enorme verlenging van de cilinder zijn, zodat je een soort roterende spaghettisliert krijgt. Die sliert zou dan vervolgens tot een lus verbonden zijn door de eindkappen te verbinden, die dan magnetisch gelagerd om elkaar heen draaien. In sciencefiction staat dit type habitat bekend onder de naam topopolis waarbij de constructie zelfs helemaal om de ster heen is gebouwd. Dat laatste is misschien wat overdreven en moeilijk stabiel in een baan om de ster te houden, maar een kleinere topopolis met bijvoorbeeld een lengte van een miljoen kilometer die in een Lagrange punt om een ster draait zou in principe mogelijk zijn. Een topopolis met een diameter van duizend kilometer en een lengte van een miljoen kilometer zou zes keer zoveel oppervlak hebben als de aarde maar slechts een fractie ($< 0,1\%$) van de massa van de aarde. Het nadeel van 1 reusachtige habitat (afgezien van de nog hogere moeilijkheidsgraad van de constructie) ten opzichte van een zwerm losse kleinere habitats, is echter de grotere kwetsbaarheid voor catastrofes. Een grote ramp zoals een zware meteoriet inslag zal de hele topopolis kunnen treffen, terwijl een vergelijkbare ramp maar 1 of een paar habitats binnen een hele zwerm, schade toebrengt.

Het tweede probleem van een McKendree cilinder is de verlichting door de zon. Net als een kleinere O'Neill cilinder is verlichting door ramen in de buitenkant van de romp en meedraaiende spiegels met de romp, een punt van kwetsbaarheid. Voor de buitenkant van de habitat was eigenlijk een dikke laag MNT materiaal beschermd met een pantserlaag tegen inwerking van kosmische straling en kleine meteorieten, gepland. Het McKendree ontwerp is overigens behalve als het gaat om de afmetingen nogal minimaal met een MNT-laag die nog geen 2 meter dik is en slechts een halve atmosfeer en verder een 'meubilering' in plaats van een landschap met een massa van maar 32% van de massa van de atmosfeer. In dit ontwerp is gewoon sprake van ramen in de romp. De aanwezigheid van spiegels wordt niet genoemd, evenmin hoe een mogelijk hinderlijk stroboscopisch effect voorkomen wordt zonder gebruik te maken van meedraaiende spiegels en tegelijkertijd een aanvaardbaar dag-nacht ritme tot stand gebracht wordt. Als het mogelijk zou zijn om ramen te plaatsen in de romp, dan zou je een verdeling van het bewoonbare oppervlak in bijvoorbeeld zes even grote stroken in de lengterichting van de cilinder krijgen, met afwisselend een strook land en een naast gelegen strook verlichtingsoppervlak. Het zonlicht zou echter beter via de centrale delen van de afsluitkappen naar binnen gevoerd kunnen worden, en vandaar via een smallere cilinder die langs de rotatie-as van de cilinder loopt het bewoonbare oppervlak moeten verlichten. Dit is nogal

omslachtig en vereist ingewikkelde spiegelopstellingen. Maar gesteld dat het zou lukken om zo de habitat te verlichten, hoe zou het hemelgewelf er dan uitzien? Overdag bij helder weer zouden vooral de afsluitkappen als blauwe hemel zichtbaar kunnen zijn. De virtuele zon zou in het zenit staan, en het deel van de verlichtingscilinder waarvan het licht de waarnemer niet bereikt zou ook blauw zijn, omdat daar het strooilicht van de atmosfeer overheerst. Bewoners die ver van de afsluitkappen wonen, zullen bij helder weer aan de hemel vooral het oppervlak van de habitat zien. Het zou goed kunnen dat deze bewoners meer blauw van onbewolkte meren en zeeën zien dan de blauwe kleur van de atmosfeer. Maar verlichting via een centrale cilinder met zonlicht is complex. Handiger is het misschien als zonnepanelen worden gebruikt voor het opwekken van elektriciteit ten behoeve van kunstmatige verlichting. Dat zou kunnen via panelen aan de buitenkant van de romp en via een zwerm zonnesatellieten, maar dit vereist nog meer oppervlak dan spiegels, omdat de onnodige omweg van licht naar elektriciteit en vervolgens van elektriciteit terug naar licht gemaakt wordt, waar meer warmteverliezen in zullen zitten. Het zou kunnen dat tegen de tijd dat men een McKendree cilinder gaat maken, kernfusie een routinematige techniek geworden is, zodat de cilinder zijn eigen energie en licht kan opwekken. In dat geval zou het niet nodig zijn zonlicht te gebruiken, en zou ook weer de optie in beeld komen om de habitat te verlichten via verlichtingsvelden aan het oppervlak. Maar de zon zal toch de meest betrouwbare fusiereactor blijven, en bovendien onderhoudsvrij. De optie om verlichtingsvelden aan het oppervlak te gebruiken heeft overigens wel als nadeel dat de verlichtingsvelden ten koste gaan van het bewoonbare oppervlak, en dat het licht twee keer door de atmosfeer moet gaan, de eerste keer direct bij de bron. Om de roterende romp van een McKendree cilinder te beschermen tegen langdurige inwerking van straling en kleine meteorieten, valt bescherming van een niet (of langzaam) roterende romp om de hele roterende constructie heen, te overwegen. Het zou bovendien een voordeel zijn indien zonnepanelen op een niet roterende ondergrond geplaatst zijn.

Een derde probleem van een McKendree cilinder is de warmteafvoer. Een stel McKendree cilinders zal zich gedragen als een thermosfles, en maar moeilijk zijn warmte kunnen kwijtraken. Dit probleem wordt nog groter als er ook nog een niet (of langzaam) roterende constructie omheen zit. Koeling zou wel uitgevoerd kunnen worden met radiatoren aan de buitenkant van de romp, maar daar zouden hoge constructie-eisen aan gesteld moeten worden vanwege de spanningen die ontstaan door de snelle rotatie van de romp. Je zou ook eenvoudig minder licht in de cilinder kunnen toelaten (en dan naast zichtbaar licht vooral minder infrarood en ultraviolet), maar een veel lichtzwakkere habitat dan de aarde is, zou niet gewenst zijn. Indien het Kalpana ontwerp wordt toegepast, is het probleem van rotatie-instabiliteit opgelost. Een Kalpana-cilinder kan met een rotatiestraal van 1000 km en een lengte van 1300 km een maximaal bewoonbaar oppervlak van ruim 8 miljoen vierkante km hebben, groter dan Australië en Nieuw-Zeeland gecombineerd. Het probleem van de warmteafgifte blijft mogelijk nog wel bestaan, hoewel relatief meer koeling via de afsluitkappen mogelijk is.

Er is echter nog een derde ontwerp namelijk een Bishop ring. Een Bishop ring kan opgevat worden als een zeer grote Stanford torus, met een rotatiestraal van 1000 km en een ringlengte van 500 km (<http://www.iase.cc/openair.htm>). Om een atmosfeer vast te kunnen houden zijn nu slechts retentiewanden aan de randen van de habitat van circa 200 km hoog nodig, de rest van de structuur kan open gelaten worden. Het bewoonbare oppervlak zou ruim 3 miljoen vierkante km zijn, ongeveer even groot als Argentinië. Je zou een Bishop ring ook kunnen opvatten als een grote O'Neill cilinder met een relatief korte lengte zonder afsluitkappen behalve de 200 km hoge wanden die de atmosfeer vasthouden. De oriëntatie van de ring is loodrecht op het baanvlak zodat het zonlicht niet rechtstreeks op het bewoonbare oppervlak valt. De verlichting vindt in de meeste ontwerpen plaats via een spiegelopstelling of een kunstmatige lichtbron in het midden van de ring. Liever zou je het zonlicht rechtstreeks in de ring laten vallen maar dat resulteert helaas in een etmaal van slechts 33

minuten. In sciencefiction heb je nog de Banks orbitaal met de rotatiestraal van 1,84 miljoen kilometer. Dat is een veel grotere versie van een Bishop ring, die met een etmaalengte van 24 uur $g=9,8 \text{ m/sec}^2$ geeft, zodat nu wel de zon rechtstreekt in de ring kan schijnen voor een normale daglengte en pseudogravitatie. Een dergelijke constructie vereist echter een materiaal dat 1840 keer de treksterkte van nanotubes van koolstof heeft (ook wel unobtainium genoemd) of een vorm van verregaande actieve stabilisatie die qua uitvoerbaarheid, waarschijnlijk een brug te ver zal zijn. Dat geldt in nog sterkere mate voor de Niven ring; dat is een door Larry Niven verzonden habitat die bestaat uit een reusachtige roterende ring die helemaal om een ster zoals de zon heen loopt op een afstand van 1 AU (ca. 150 miljoen km). Van al dit soort habitats lijkt al met al het hoogst haalbare een roterende cilinder of ring met een straal van 1000 km. In het geval van een Bishop ring wordt dat gecombineerd met tamelijk open structuur die rechtstreekste afkoeling van de atmosfeer via uitstraling mogelijk maakt, en waarin je een gedeelte van de sterrenhemel kunt blijven zien. Zo'n habitat zou binnen ons zonnestelsel het dichtst in de buurt komen van een redelijk alternatief voor de leefruimte zoals je die op de aarde aantreft. Mocht men aan 1 zo'n Bishop ring niet genoeg hebben dan zouden er nog meer gemaakt kunnen worden. Daarnaast zou de lengte van 500 km nog wel wat opgerekt kunnen worden richting de 1300 km die de maximale lengte van een Kalpana habitat kenmerkt. Het zou zo zijn voordelen hebben als een Bishop-ring een kleinere rotatiestraal van bijvoorbeeld 800 km heeft, en een ringlengte van 1000 km en retentiewanden van 300 km hoog. Maar dan zou de habitat wel meer gesloten zijn, wat de warmtehuishouding beïnvloed. Een te gesloten habitat is moeilijk even lichtsterk te krijgen als de aarde, met gemiddeld toch een aangenaam klimaat. Het is echter moeilijk in te schatten wat de ideale afmetingen zijn. Voor de locatie van een Bishop ring (of een duo Bishop ringen) zijn de Zon-aarde Lagrange punten L4 en L5 voorgesteld en de Zon-Jupiter Lagrange punten L4 en L5.

Ook bij een Bishop ring vallen nog wel wat kanttekeningen te maken. Indien een Bishop ring verlicht wordt door een centrale spiegel of verlichtingsconstructie, vormt dat een deel dat los staat van de rest van de constructie. Dit losse deel zou met kabels verbonden kunnen worden met de randen van de habitat of actief in het midden gehouden kunnen worden via kleine correcties met raketmotoren. Dit is echter een ongewenst punt van kwetsbaarheid. Om een dag-nacht cyclus te creëren, zou de centrale verlichtingseenheid met een iets kleinere (of een iets grotere) hoeksnelheid dan de ring zelf moeten roteren, en voor de helft onverlicht moeten zijn. De ring zelf maakt ongeveer 43 rotaties in 24 uur, indien de centrale verlichtingseenheid 42 rotaties in 24 uur maakt ontstaat het gewenste dag-nacht ritme. Zou de centrale verlichtingseenheid nu met kabels verbonden zijn met de rest van de structuur dan zou de bevestiging van de kabels magnetisch gelagerd moeten zijn, vanwege het verschil in hoeksnelheden. In eerste instantie zou je kunnen denken dat de ring het best via een recht toe recht aan spiegelconstructie verlicht kan worden. Dat kan als de roterende centrale verlichtingseenheid de vorm heeft van een gigantische kegel, die voor de helft spiegelen is en voor de andere helft niet of althans niet in de richting van de habitat, en waarvan de punt wijst richting het midden van de zon. De kegel moet behoorlijk groot zijn en heeft een hoogte van 520 km (iets groter dan de ringlengte zodat de punt net buiten de reikwijdte van de habitat steekt) en een grond diameter van 1040 km (om op 45° graden te komen voor de gewenste weerkaatsingshoek). De kegel heeft daarmee een spiegelen oppervlak van $599789 \text{ vierkante km}$ ten behoeve van de verlichting van de habitat (en een even groot oppervlak voor de nachtzijde). De kegel ontvangt zonlicht van een cirkelvormig oppervlak van 848230 km^2 ($\pi \cdot (520^2 - 20^2)$) waarvan de helft wordt gereflecteerd naar de habitat. De gemiddelde instraling wordt bepaald door de verhouding tussen het instralingsoppervlak (i.c. 424115 km^2) en het gehele oppervlak van de habitat, en komt in dit geval uit op 13,5%. Voor de aarde bedraagt deze verhouding 25%. De maximale instraling bedraagt 52% t.o.v. de maximale instraling op aarde (bij een zelfde zonneconstante). Maar omdat de zon nu

altijd in het zenit staat wordt de dagelijkse instraling (12 uur lang) aan het oppervlak flink opgehoogd t.o.v. de aarde, zodat je al met al waarschijnlijk voldoende opwarming krijgt. Alleen nabij de zonzijde zal weinig licht zijn, vergelijkbaar met een polaire regio in de winter op aarde. Omdat de spiegelende kegel erg groot is en toch nog behoorlijk snel moet roteren voor een gewenst dag-nacht ritme, zijn de constructie-eisen aan de kegel hoog en is de koppeling en stabilisatie met de rest van de habitat moeilijk. Daar komt nog bij dat de punt van de kegel altijd precies naar het midden van de zon moet blijven wijzen. Indien de Bishop ring 1 rotatie per jaar om één van twee assen loodrecht op de rotatie-as maakt zou dat ongeveer zo kunnen zijn, maar omdat het zo nauw luistert, is de fijn regeling (o.a. om een precessiebeweging te voorkomen) waarschijnlijk lastig. Gezien vanuit het midden van de habitat zou bij deze spiegelopstelling de zon enigszins vervormd continu in het zenit staan. In de richting van de retentiewanden, maar ook meer richting de ring is de hemel bij helder weer blauw, omdat daar alleen het strooilicht van de atmosfeer vandaan komt. In het oosten en westen is de ring zichtbaar als een smaller wordende band die omhoog gaat richting het zenit, en aldaar ruim 14° van de hemel in beslag neemt. Zeeën, landoppervlak en de bovenkant van wolken zullen zichtbaar zijn, maar hoger aan de hemel enigszins vervagen (ongeveer zoals een vervaagde maan overdag zichtbaar kan zijn). Rond de zon in het zenit zal een taartpuntachtig stuk blauwe hemel het zicht op de ring ontnemen; je ziet ook daar alleen het strooilicht van de atmosfeer, omdat het licht van dat deel van de kegel niet naar de waarnemer gaat. Laat of vroeg op de dag, zal in het oosten of westen ook nog een deel van de nachtelijke ring zichtbaar zijn. Het oosten en westen zijn overigens windrichtingen die verwarrend genoeg in het zelfde assenstelsel op aarde noord en zuid genoemd zouden zijn. De nachten zullen snel intreden zonder de schemering zoals wij die kennen, maar wel met het schijnsel van het westelijk gelegen deel van de ring dat nog in het zonlicht ligt en de rest van de verlichte ring tot hoog aan de hemel. Richting het zenit zal de ring gedeeltelijk verduisterd zijn door de kegel. Midden in de nacht, is het verlichte deel van de ring bijna over het hele centrale deel van de hemel zichtbaar, richting het zenit zal echter een gedeelte van de ring verduisterd zijn door de kegel. De verduistering ziet er ongeveer uit als een donkere taartpunt. Laag aan de hemel is zowel in het westen als in het oosten het nachtelijke deel van de habitat zichtbaar door indirect licht en eventueel kunstmatige verlichting van huizen en straten. De ring wordt niet gelijkmatig beschenen door de zon, en dat zal ook zichtbaar zijn aan het uitzicht op de ring bijvoorbeeld in de nacht als deze hoog aan de hemel staat. Naar de richting van de zon toe zal het weerkaatste zonlicht van de ring geleidelijk verzwakken. Het gegeven dat de zonzijde van de habitat weinig zonlicht ontvangt zal leiden tot temperatuurverschillen binnen de habitat. Dat is misschien niet eens zo erg want temperatuurverschillen zullen leiden tot weerpatronen, en weer is nodig voor neerslag. Hoe zich precies de klimaatzones zullen instellen valt echter moeilijk te voorspellen. Wel kan in roterende habitats een overheersende windrichting verwacht worden die tegen de rotatierichting ingaat. Dit is vergelijkbaar is met het corioliseffect dat bijvoorbeeld van invloed is op de richting van passaatwinden op de aarde. Loodrecht op de oost-west richting zal men 's nachts een deel van de sterrenhemel kunnen zien, vooral aan de zonzijde omdat daar de kegel het minst het zicht blokkeert. De sterren zullen razend snel voorbij trekken vanwege de moordend hoge rotatiesnelheid van de habitat.

De centrale verlichtingseenheid kan ook anders vorm gegeven zijn. De eenheid kan kleiner zijn met meer complexe spiegelopstellingen waarbij eerst zonlicht geconcentreerd wordt via satellieten met lenzen. Maar er kan ook gekozen worden voor kunstmatige verlichting met lampen. De elektriciteit voor die lampen zou afkomstig kunnen zijn van zonnepanelen op de romp van de habitat. Maar dat zal bij lange na niet genoeg zijn. Meer elektriciteit kan verkregen worden met zonnesatellieten die energie in de vorm van microgolfstraling naar de habitat sturen. Er zou ook gekozen kunnen worden voor een zwarte straler (een soort gloeilamp) op basis van wolfram of grafiet. Deze heeft weliswaar

een laag rendement maar een voordeel zou echter kunnen zijn dat de warmte van een kernreactor rechtstreekt gebruikt kan worden, zonder eerst elektrische stroom te hoeven genereren. Het blijft echter een nadeel dat de centrale verlichtingseenheid los staat van de rest van de constructie. Het zou echter mogelijk moeten zijn om de bovenste 100 km van de retentiewanden als verlichtingsvelden te gebruiken. De bovenste 100 km van beide retentiewanden hebben ieder een oppervlak van 534071 km². Deze oppervlakken kunnen voorzien worden van spiegels. Een volledig symmetrische ringvormige zwerm satellieten met eigen spiegels aan de zon zijde van de habitat en een zelfde zwerm satellieten aan de andere zijde van de habitat, lichten deze spiegels vervolgens aan, zodanig dat het oppervlak van de habitat verlicht wordt. Op deze wijze ontstaan er bijvoorbeeld twee virtuele zonnen in de middelste 300 km van het bewoonbare oppervlak en één virtuele zon in de zones tot 100 km van de retentiewanden. De hoek waaronder een zon schijnt varieert tussen de 20 en 45 graden, en blijft voor iedere locatie constant. Een dag-nacht ritme wordt gecreëerd door de satellieten die in een cyclus van 12 uur zichzelf aan of uit te zetten. Met satellieten schep je uiteraard ook veel losse onderdelen, maar dit zijn allemaal relatief kleine onderdelen die beter te controleren zijn. De positionering van de spiegels luistert wel nauw, kleine verstoringen zouden al tot hinderlijke trillingen van de virtuele zonnen kunnen leiden. Je zou de bovenste 100 km van de retentiewanden ook kunnen voorzien van lampen, die het zonlicht nabootsen. Dat zal veel zonn satellieten vereisen die de benodigde energie leveren en het zal ook onderhoudsgevoeliger zijn (misschien wel te onderhoudsgevoelig), maar het zal ook meer controle geven en in sommige opzichten minder kwetsbaar zijn. Een bezwaar van verlichting met lampen en energieopwekking met zonnepanelen kan echter een beperkte productie-capaciteit zijn door tekorten aan bepaalde grondstoffen in ons zonnestelsel zoals zeldzame metalen. Voor sommige onderdelen kunnen zeldzame metalen vervangen worden door organische componenten maar die slijten mogelijk weer sneller. Voor spiegels daarentegen is enkel een vlakke gladde ondergrond met een laagje metaal nodig. In een ongunstig geval kan dit betekenen dat verlichting van middelgrote tot grote habitats met efficiënte lampen (zoals LED's) niet mogelijk is omdat er niet genoeg van geproduceerd kunnen worden. Om de zon zoals nabij de aarde na te bootsen, moet aan een aantal voorwaarden voldaan zijn. Het licht moet circa 1361 watt per m² leveren net als zonlicht voordat het in de atmosfeer van de aarde komt, het moet ongeveer het zelfde lichtspectrum als zonlicht hebben en het moet nauwelijks convergerend (of divergerend), als bijna parallelle lichtstralen uitgezonden worden. Dat laatste is nodig om een virtuele zon (mogelijk wel iets vervormd) met daaromheen indirect blauw licht dat door verstrooiing in de atmosfeer is gevormd, te laten ontstaan. Dit kan het best met LED technologie uitgevoerd worden omdat hierbij de minste warmteverliezen zullen zijn. Omdat de verlichtingsvelden maar 34% van het bewoonbare oppervlak vormen, zal het licht toch nog wel een beetje moeten divergeren en zal er mogelijk te weinig instraling op het oppervlak zijn. In dat geval zal het vermogen per vierkante meter verlichting nog wat opgeschroefd moeten worden, eventueel zal het verlichtingsoppervlak ook nog wel wat groter gemaakt kunnen worden. Met LED technologie zal het ook mogelijk zijn om het spectrum van het licht aan te passen. Zo zou bijvoorbeeld een uur voor het begin van de nacht, het licht zwakker en roder van kleur gemaakt kunnen worden, wel blijft de zon voor 1 locatie op een vaste plek aan de hemel. Er kan daarnaast een laag op de retentiewanden tussen de 20 en 50 km gereserveerd worden voor LED verlichting die speciaal aangezet wordt rond zonsopkomst of zonondergang, zodat een rode zwakke zon kan schijnen laag aan de horizon. Moeilijker zal het zijn om de zon een echte schijnbare beweging te laten maken voor een continu variabele zonnestand. Het zou wel mogelijk zijn om net als beschreven voor een afgedekte koepel op de aarde, te zorgen voor blauwe achtergrond panelen die de lichtsterkte van indirect zonlicht leveren, aangevuld met lichtsterke schijnwerpers met een diameter van circa 2 km waarmee direct zonlicht wordt geïmiteerd. Maar zelfs als je 10000 van dit soort schijnwerpers gebruikt, zou je maar 4% van het bewoonbare oppervlak gelijktijdig in de zon kunnen zetten (op voorwaarde dat er geen

bewolking is). Dit zou eerder een optie zijn voor meer gesloten habitats die hun warmte minder goed kwijt kunnen.

Het open karakter van een Bishop-ring heeft echter ook nadelen. Zo zal kosmische straling door de niet afgesloten delen van de ring het grondoppervlak kunnen bereiken. Daartoe moet die straling wel door een volledige atmosfeer net als op de aarde, maar de aarde heeft een magneet veld om een groot deel van de straling af te buigen naar de polen. Je zou een Bishop ring ook een magneet veld kunnen geven, bijvoorbeeld met hoge temperatuur supergeleiders bovenop de retentiewanden. De snelle rotatie van de habitat helpt mee om dit technisch voor elkaar te kunnen krijgen. Een ander punt van zorg, is verlies aan atmosfeer door lekkage langs de randen van de retentiewanden. Er bestaat een aantal mechanismen via welke een planeet of ruimtehabitat een deel van zijn atmosfeer kan kwijtraken. Het meest voorkomende mechanisme is thermisch verlies aan atmosfeer. Afhankelijk van de gravitatieversnelling, de temperatuur, de hoogte en de moleculaire massa van de gasdeeltjes kan de energierijke fractie volgens de Boltzmann-verdeling, voldoende snelheid hebben om aan de atmosfeer te ontsnappen. Dit is het mechanisme waardoor lichte gassen zoals waterstof en helium aan de atmosfeer van de aarde kunnen ontsnappen. Voor zwaardere gassen zoals zuurstof en stikstof is dit mechanisme voor de aarde niet sterk genoeg om relevant te zijn. Voor een Bishop-ring met retentiewanden van 200 km hoog, en een pseudogravitatie aan het oppervlak vergelijkbaar met de zwaartekrachtversnelling op de aarde en bij globaal de zelfde temperaturen zal dit mechanisme ongeveer vergelijkbare effecten hebben. Een ander mechanisme voor atmosfeerverlies is de inwerking van zonnewinden in de afwezigheid van een magnetosfeer. Voor een Bishop-ring is dit mechanisme waarschijnlijk niet zo relevant omdat zonnewinden maar moeilijk vat kunnen krijgen op de atmosfeer vanwege de positie van de retentiewanden. Een Bishop ring kan echter een deel van zijn atmosfeer verliezen doordat lucht weglekt over de retentiewanden, iets wat bij een planeet niet kan gebeuren. Het verlies aan atmosfeer kan geschat worden met de formule: $T_{1/2} = \frac{w \cdot M_o}{v \cdot M_b}$ waarin $T_{1/2}$ de tijdsduur is waarin de helft van de atmosfeer weglekt, w is de lengte van de ring (i.c. 500 km), v is de geluidsnelheid (circa 1000 km/uur), M_b is de massa van de atmosfeer boven de retentiewanden, en M_o is de massa van de ring onder de retentiewanden (ontleend aan <https://worldbuilding.stackexchange.com/questions/119739/how-tall-do-atmosphere-retaining-walls-on-rotating-space-habitats-need-to-be>). De massa van de atmosfeer wordt bepaald door het drukverloop als functie van de hoogte volgens de barometrische-hoogtevergelijking: $P(h) = P_0 \cdot e^{-a \cdot h}$ waarin P_0 is de luchtdruk aan de grond, h is de hoogte en $a = M \cdot g / R \cdot T$ met M de gemiddelde molaire massa van lucht, g de gravitatie versnelling, R de gasconstante en T de absolute temperatuur. De relatieve massa van de atmosfeer tot aan de hoogte van de retentiemuur kan geschat worden door de e-macht uit de barometrische hoogtevergelijking te integreren van 0 tot de hoogte van de retentiemuur, en de relatieve massa van de atmosfeer erboven door te integreren van de retentiemuurhoogte tot oneindig, zodat je een schatting krijgt van de verhouding M_o/M_b . Dit invullen in de formule voor atmosfeerverlies levert dan de volgende vergelijking op: $T_{1/2} = \left(\frac{w}{v}\right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-a \cdot hr}}{e^{-a \cdot hr}}\right)$ waarin hr de retentiemuurhoogte is. Bij $hr=200$ km en $g=9,8$ m/sec² en $T=280$ K krijg je bijvoorbeeld voor $T_{1/2}$ een waarde van 2,3 miljoen jaar en bij $hr=237$ km is $T_{1/2}$ behoorlijk toegenomen tot 210 miljoen jaar. Hierbij is echter aangenomen dat de pseudo-gravitatieversnelling en de temperatuur gelijk blijven in de gehele atmosfeer, wat eigenlijk niet het geval is. Op 200 km is bijvoorbeeld de pseudo-gravitatieversnelling gedaald tot 7,8 m/sec². Daarnaast geldt dat indien het temperatuurverloop net zo is als in de aardse atmosfeer, eerst een afkoeling optreedt in de troposfeer tot ongeveer -55° C op 10 km dan een opwarming in de stratosfeer tot circa -5° C op 50 km (t.g.v. UV absorptie door ozon) en vervolgens weer een afkoeling tot ongeveer -90° C in de mesosfeer. Dan begint op ongeveer 100 km de thermosfeer waarin de atmosfeer bij toenemende

hoogte weer opwarmt tot circa 1000° C (t.g.v. ionisatiereacties onder invloed van XUV-licht en zonnewind). Indien deze variaties in g en T verrekend worden via numerieke integratie, bedragen de $T_{1/2}$ waarden voor $h_r=200$ km en $h_r=237$ km respectievelijk 1,3 miljoen jaar en 10 miljoen jaar. Behalve het verloop van de gravitatieversnelling blijkt ook het temperatuurverloop van tamelijk grote invloed op de waarde van $T_{1/2}$. Indien de temperatuur in de thermosfeer met een factor 2 minder snel toeneemt met de hoogte bedragen de $T_{1/2}$ waarden voor $h_r=200$ km en $h_r=237$ km respectievelijk 13 miljoen jaar en 274 miljoen jaar. De hier berekende waarden voor $T_{1/2}$ zijn acceptabel voor retentiemuurhoogtes van 200 km of meer, maar liever heb je waardes voor $T_{1/2}$ boven de 100 miljoen jaar. Dat kan door de retentiemuren te verhogen tot 300 km, maar dat kan ook door te zorgen voor lagere temperaturen in de hogere luchtlagen. Indien gebruikt gemaakt wordt van kunstmatige verlichting kan voor een veel beperktere emissie van UV licht gekozen worden. De thermosfeer zou dan aanzienlijk koeler zijn. Indien gebruik gemaakt wordt van spiegelsatellieten zou een gedeelte van het UV licht gefilterd kunnen worden ver buiten de atmosfeer van de habitat, wat tot een soortgelijke afkoeling zou leiden.

Roterende ruimtehabitats kunnen aardse gravitatieversnelling, afscherming van schadelijke straling, een volledige atmosfeer, miljoenen vierkante kilometers bewoonbaar oppervlak, voldoende licht en een aangenaam klimaat bieden, maar zijn tamelijk kwetsbaar voor meteorietinslagen. Kleine meteorieten zouden nog opgevangen kunnen worden door een bescherm laag op de romp van de habitat, en in een Bishop-ring ook kunnen verbranden in de atmosfeer. Maar onderdelen zoals spiegels, LED-verlichting en zonnepanelen kunnen meestal niet afgeschermd worden, en blijven gevoelig voor meteorietinslagen. Alleen een McKendree cilinder (of een topopolis) die de energie voor zijn verlichting betreft uit eigen kernfusie-centrales, zou daar niet gevoelig voor zijn. Indien gevoelige onderdelen wel schade kunnen oplopen valt er aan te denken om nanorobots in te zetten in de omgeving van een habitat om jacht te maken op kleine meteorieten, die dan van richting veranderd worden of anderszins onschadelijk gemaakt worden. Je zou overigens wel kunnen zeggen dat roterende ruimtehabitats met een gepantserde romp minder kwetsbaar zijn voor kleine meteorieten dan koepel-kolonies met een transparant dak op de Maan of op Mars. Grote meteorieten vormen een meer ernstige bedreiging. Een inslag van een grote meteoriet in een roterende ruimtehabitat zou de hele constructie kunnen vernietigen. Dat zou nog erger zijn dan een soortgelijke ramp op de aarde. De kans op een inslag is wel kleiner dan op de aarde omdat zelfs de grootste ruimtehabitats kleiner zijn dan de aarde (mogelijk met uitzondering van een topopolis). Een niet (of langzaam) roterende beschermconstructie om de snel roterende habitat heen, biedt enige extra bescherming, en heeft ook andere voordelen. Zo kan dit deel gebruikt worden voor opslag van grondstoffen. Tevens is er plaats voor industrie en energiecentrales en ook is het geschikt voor het plaatsen van observatoria. Daarnaast biedt zo'n niet roterende laag de snel roterende MNT-laag een betere bescherming tegen kosmische straling dan een dunne pantserlaag die als overlappende panelen op de MNT-laag bevestigd is. Maar het nadeel is dat de beschermhuls actief gestabiliseerd moet worden, dit kan ook weer met diamagnetische repulsie volgens het Meissner effect. Zo'n systeem heeft echter maar een beperkte capaciteit om plotselinge versnellingen op te vangen. Het gevaar bestaat dat indien de beschermhuls geraakt wordt door een zware meteoriet, of anderszins verstoord wordt, deze beschermconstructie vervolgens in contact komt met de snel roterende habitat, wat tot een ramp zou kunnen leiden. Een ander punt is dat een Bishop-ring of een McKendree cilinder al zo groot en massief zijn, dat zij ook zonder een niet roterende huls op korte termijn maar nauwelijks hun koers kunnen wijzigen. Het gevaar van zware meteorietinslagen zal daarom bij de bron aangepakt moeten worden. Nu zal tegen de tijd dat een Bishop ring of een McKendree cilinder gemaakt wordt, de exploitatie van het zonnestelsel in een ver gevorderd stadium verkeren. In dat stadium zal ieder brokstukje van enige omvang dat in de buurt van een ruimte

habitat kan komen, al in kaart gebracht zijn, en indien nodig al op grote afstand van de habitat onderschept kunnen worden.

Een Bishop-ring of een grote McKendree cilinder zijn ultieme bouwprojecten die pas in het laat stadium van de ontwikkeling van ruimtehabitats tot stand kunnen komen. Minimaal is dan vereist dat men beschikt over kernfusie (of een vergelijkbare krachtige en makkelijke energiebron) in de ruimtevaart, grote legers zelfstandig opererende geavanceerde ruimterobots die aan constructie en mijnbouw kunnen doen, en supersterk op koolstof gebaseerd materiaal op grote schaal te produceren met MNT, dat zijn belofte als ultiem constructiemateriaal al heeft waar gemaakt. Eerst zal men natuurlijk ervaring moeten opdoen met het maken van kleinere ruimtehabitats. De eerste projecten zullen waarschijnlijk vooral dienen als opvolging voor het ISS of voor ander professioneel gebruik. Een volgend stadium is de ontwikkeling van grotere habitats waarin al supersterke op koolstof gebaseerde constructiematerialen gebruikt kunnen worden. Hierbij zullen twee ontwerpdoelen centraal staan. Het eerste doel is de ontwikkeling van een kleinere habitat die toch een aangenaam grote leefruimte biedt voor een paar duizend bewoners die daar in principe permanent en van alle gemakken voorzien zouden kunnen leven. Zo'n habitat zou bovendien nog enige mobiliteit hebben en model kunnen staan voor een toekomstig generatieschip dat eventueel zelfs het zonnestelsel zou kunnen verlaten. De rotatiestraal zou bijvoorbeeld ongeveer 11,5 km zijn, en het oppervlak twee maal ongeveer 1000 vierkante kilometer. Hiertoe zouden twee gekoppelde O'Neill cilinders met elk een cilinderlengte van 15 km gebruikt worden. Het voordeel van een rotatiestraal van 11,5 km is dat in het midden van de cilinder de luchtdruk dan tot de helft is gedaald, wat nog net hoog genoeg is om zonder bescherming in rond te lopen in een ingerichte gravitatie-loze zone, en nabij de luchtsluizen richting de uitgang van de habitat. Indien men liever wat meer ruimte heeft dan een gravitatie-loze zone waar je in hemdsmouwen kunt rondlopen, zou een rotatiestraal van 16 km en een cilinderlengte van 20 km gekozen kunnen worden, voor een dubbel zo groot oppervlak. De verlichting zou kunstmatig zijn en de energiebron bij voorkeur een eigen kernfusiecentrale. Een aardige beschrijving van zo'n kleine ruimtehabitat (iets kleiner dan hier voorgesteld) is gegeven in Arthur C. Clark's SF boek *Rendezvous with Rama*. Het tweede doel zou de ontwikkeling van een middelgrote habitat zijn die als kolonie gebruikt kan worden en die in een vaste baan om de zon geplaatst is samen met veel soortgelijke habitats die gezamenlijk een zwerm vormen. Dit ontwerp zou gericht zijn op het tot stand brengen van een relatief grote leefruimte maar ook op voldoende mobiliteit om incidenteel kleine koerscorrecties te kunnen uitvoeren, die nodig zouden kunnen zijn om de habitats binnen de zwerm in juiste banen te houden. Het is moeilijk om aan te geven waar het compromis tussen omvang en mobiliteit op zal uitkomen. Maar om een indicatie te geven, zou de rotatiestraal ongeveer 80 km kunnen zijn, en het oppervlak twee maal ongeveer 50000 vierkante kilometer, dit alles in de vorm van twee gekoppelde O'Neill cilinders met elk een cilinderlengte van 100 km. De koppeling van twee tegengesteld roterende cilinders is ook hier belangrijk om op netto nul impulsmoment uit te komen, voor maximale bestuurbaarheid. Deze habitats zouden verlicht kunnen worden met zonlicht en spiegelopstellingen indien kunstmatige verlichting te onderhoudsgevoelig zou zijn. In deze twee voorbeelden van kleinere ruimtehabitats is de cilinderlengte vrij klein gehouden t.o.v. de rotatiestraal. Het sterke MNT constructiemateriaal maakt deze keuze mogelijk, en het geeft de bewoners minder een kokervisie. Daarnaast verlaagt een grotere rotatiestraal mogelijk hinderlijke corioliseffecten. Bovendien is de verlichting van de habitat dan beter te regelen via de afsluitkappen. Ook heeft zo'n habitat dan een grotere rotatiestabiliteit, hoewel dat hier minder relevant is omdat de tegengesteld roterende cilinders gekoppeld zijn.

De massa van de voorgestelde middelgrote habitat met een oppervlak van honderdduizend vierkante kilometer, zal ongeveer $5 \cdot 10^{16}$ kg bedragen. Dat is ongeveer 100 keer zo veel als de massa van de voorgestelde kleine habitat met een rotatiestraal van 11,5 km en ongeveer 100 keer zo weinig als de

massa van de voorgestelde Bishopring. Een middelgrote habitat zal zo geconstrueerd worden dat deze incidenteel nog enige koerscorrecties kan uitvoeren, om in een goede baan te blijven. Zo zou een koerscorrectie van 190 km bereikt kunnen worden door een stuwkracht van 10 MegaNewton gedurende 500 dagen uit te oefenen. Indien de effectieve uitstootsnelheid van de raketmotoren 4400 m/s is, is daarvoor 10^{11} kg stuwstof nodig. De hoeveelheid stuwstof kan verlaagd worden als de effectieve uitstootsnelheid vergroot wordt (bijvoorbeeld door een ionen-motor te gebruiken), maar dat heeft als nadeel dat de energie die nodig is om evenveel stuwkracht te leveren dan evenredig toeneemt. De stuwkracht neemt namelijk bij verhoging van de uitstootsnelheid evenredig toe, terwijl de benodigde energie dan kwadratisch toeneemt. Bij een relatief lage uitstootsnelheid van 4400 m/s is toch ook al veel energie nodig, namelijk 10^{18} Joule. Dit komt overeen met 10^{11} kg raketbrandstof als een 1:2-mengsel van zuurstof en waterstof (4400 m/s is de overeenkomende uitstootsnelheid van een waterstof/zuurstof raketmotor). Als alternatief zou een 30 GigaWatt kernfusiecentrale gebruikt kunnen worden, om de benodigde energie voor de reactiekracht ter plaatse op te wekken. Een 300 GigaWatt kernfusiecentrale zou nodig zijn voor het leveren van de zelfde stuwkracht gedurende 500 dagen, maar nu met 10% van de stuwstof (10^{10} kg), met een ionenmotor die een uitstootsnelheid heeft van 44000 m/s. Een stuwkracht van 10 MegaNewton zou daarentegen onbeperkt en zonder de noodzaak van eigen energiecentrales en reactiemassa, geleverd kunnen worden door een gigantisch zonnezeil. Het benodigde oppervlak van zo'n zeil is dan ca. 1250 bij 1250 km bij een zonneconstante van 1000 Watt/m². Om de stuwkracht van een zonnezeil te reguleren zou o.a. gebruik gemaakt kunnen worden van lamellen, die in verschillende standen gezet kunnen worden. Meer controle geven kleinere zeilen (spiegels) die aangedreven worden door lasers met een hoog vermogen, die buiten de habitat gestationeerd zijn bijvoorbeeld in een baan om de zon. Conventionele laser aandrijving zou weinig efficiënt zijn, maar met een recent ontdekte meervoudige fotonreflectie versterkingsmethode (Photonic Laser Thruster) zou een verbetering van de efficiëntie met meerdere ordes mogelijk zijn.

Indien nodig zou een zwerm van 10000 van deze kolonies gemaakt kunnen worden. Dat zou een totaal bewoonbaar oppervlak opleveren van bijna 2 maal het oppervlak van de aarde. Geschat kan worden dat voor het bouwen van deze 10000 kolonies ongeveer al het makkelijk winbare koolstof uit de planetoïdengordel nodig is voor het draagmateriaal, indien het draagmateriaal overal 25 meter dik is en een dichtheid heeft van 2500 kg/m³. Daarbij is aangenomen dat de helft van de planetoïdengordel geschikt is voor mijnbouw gericht op lichte elementen zoals koolstof. Dat is ongeveer 2% van de massa van de Maan, niet meegeteld zijn de grote planetoïden Ceres, Vesta en Pallas, en koolstofarme planetoïden. De andere aanname is dat 5% van de massa van die planetoïden bestaat uit koolstof. Koolstof is afgezien van waterstof en helium één van de meest algemene elementen in het zonnestelsel, echter tijdens de ontstaansgeschiedenis van veel hemellichamen nabij de zon is veel koolstof verdampt als vluchtige koolstofverbindingen, en door zonnewind naar buiten gelegen delen verplaatst. Pas in de buitenste zone van de planetoïdengordel is een aanzienlijke hoeveelheid koolstof bewaard gebleven in de vorm van bevroren koolstofverbindingen. Ongeveer het zelfde geldt voor stikstof. Zuurstof daar en tegen is het meest voorkomende element in de korst van de aarde en andere rotsachtige planeten omdat veel zuurstof al vroeg in de ontstaansgeschiedenis van planeten gebonden is in gesteentes die een zeer hoog smeltpunt hebben. Elders in het zonnestelsel bevindt zich nog wel meer winbaar koolstof, zoals rond de grote gasplaneten Jupiter tot en met Neptunus. Het deel van het koolstof dat zich op grotere manen van deze planeten bevindt, is minder geschikt voor exploitatie omdat dit koolstof uit een niet te verwaarlozen zwaartekrachtput gehaald moet worden. De Kuiper gordel die zich voorbij de baan van Neptunus bevindt is een andere bron van koolstof. Geschat kan worden dat de Kuiper gordel

(exclusief de 15 grootste objecten zoals Pluto) gezamenlijk een paar honderd maal meer koolstof bevat dan de kleinere objecten in de planetoïdengordel tussen Mars en Jupiter.

Gesteld dat het inderdaad mogelijk blijkt om ruimtehabitats te maken voor permanente bewoning, zou er dan veel animo zijn om daar vanaf de aarde naar toe te verhuizen? Te verwachten valt dat kleinere ruimtehabitats met een rotatiestraal tussen de 11,5 en 16 km en oppervlaktes van enkele duizenden vierkante kilometer, niet heel populair worden om permanent te bewonen omdat ze een te beperkte levensruimte bieden. Er zal wel veel nieuwsgierigheid zijn om zo'n habitat een keer te bezoeken als toerist vooral vanwege de spectaculaire omgekeerde kromming van het landschap. Grotere habitats daarentegen met een rotatiestraal van 80 km of meer en een oppervlakte vanaf 50000 km², beginnen qua leefruimte ergens op te lijken. In eerste instantie zou je zeggen dat ook deze habitats slappe aftreksels zijn van de leefruimte die de aarde biedt. De middelgrote roterende ruimtehabitats die als eerste beschikbaar zouden kunnen komen, zijn niet alleen veel kleiner dan de aarde, maar bestaan ook maar uit een flinterdun bruikbaar laagje oppervlak. Er zijn geen geologische krachten werkzaam anders dan erosie, en vooral op plekken waar de erosie snel gaat zoals in snelstromende beken en rivieren, zal het bodemgesteente al snel vervangen moeten worden. Elders zal sediment verwijderd moeten worden om nog enige diepte in meren en zeeën te houden. Wat dat laatste betreft lijkt zo'n habitat wel een beetje op Nederland, wat zonder baggeren in een moeras zou veranderen. Daarnaast zal de zon er niet schijnen zoals we gewend zijn, maar via spiegelreflectie of kunstmatige verlichting geïmiteerd worden wat nooit helemaal ideaal is. Er zijn echter scenario's denkbaar waarin deze habitats wel aantrekkelijk kunnen worden. Ten eerste zou het kunnen zijn dat de aarde getroffen wordt door overbevolking, vervuiling, armoede en gewapende conflicten. Door politieke verdeeldheid zouden deze problemen niet oplosbaar zijn, althans niet op de aarde. Een deel van de elite zou besluiten zijn toevlucht te zoeken in een middelgrote ruimtehabitat om te ontsnappen aan de ellende op de aarde. Door strenge wetgeving met name op het gebied van het beheersen van de grootte van de bevolking, zou meer dan voldoende natuurlijke rijkdom, ruimte en welvaart voor iedereen in de ruimtekolonie beschikbaar zijn. Dit scenario is onder andere in de film Elyseum uitgewerkt. (Overigens worden hypothetische ruimtehabitats zoals die op internet voorgesteld worden opmerkelijk vaak volgepropt met mensen zodat de bevolkingsdichtheden liggen op een stedelijk niveau; dit onzalige idee is vanuit het perspectief van een projectontwikkelaar die zoveel mogelijk winst hoopt te boeken misschien nog wel te verklaren maar lijkt voor het overige onverstandig.) Zo'n toevluchtsoord voor de gelukzaligen kan moeilijk op de aarde zelf gemaakt worden omdat alle goed bewoonbare gebieden al bezet zijn, en de invoering van een voldoende strikt bestuur om de elite te beschermen tegen bedreigende invloeden van buitenaf, dan lastiger uitvoerbaar is. Bovendien zal vooral luchtvervuiling maar ook sommige andere vormen van vervuiling niet bij de grenzen te stoppen zijn.

Het is ook mogelijk dat de aarde wel goed bewoonbaar blijft en echt grote rampen voorkomen worden, omdat overbevolking, vervuiling en uitputting van natuurlijke hulpbronnen wel aangepakt worden op de aarde zelf. In dat geval kunnen grote tot middelgrote ruimtehabitats toch nog steeds aantrekkelijk zijn omdat met een schone lei begonnen kan worden, en de inrichting en het bestuur van de habitat van te voren aan allerlei wensen aangepast kan worden; dit is vooral het terrein van utopiebouwers. Een utopie is per definitie niet te verwezenlijken en pogingen deze wel tot stand te brengen kunnen uitmonden in het ontstaan van een vervelende dictatuur. Ook een technologische utopie zou als een illusie ontmaskerd kunnen gaan worden, maar toch zijn wel verstandige maatregelen te bedenken die van te voren al genomen kunnen worden. Ten eerste kan het landschap aantrekkelijk gemaakt worden met bijvoorbeeld veel grillige kuststroken die gekenmerkt worden door heuvels, kliffen, baaien en stranden. Voor wie daar niet van houdt is er bijvoorbeeld ergens ook nog wel een polder met sloten en weidevogels beschikbaar. Transport kan het best

geregeld worden met hyperloops, waarin treinen vrijwel wrijvingloos hoge snelheden kunnen bereiken. De tunnels kunnen van te voren al aangelegd zijn en behoorlijke diameters hebben, zodat de reizigers zich geen buizenpost hoeven te voelen en bewegingsruimte hebben zoals in een gewone trein. Er kunnen ook nog wel een paar bovengrondse treinverbindingen aangelegd worden, die als voordeel hebben dat reizigers die daar gebruik van maken het landschap kunnen zien. Meer dan op de aarde zou je autoloze zones in landelijke gebieden kunnen instellen om meer ongerepte landschappen over te houden, als alternatief vervoer zijn er in die gebieden (gerobotiseerde) paarden en zeppelins voor vrachtvervoer. Te overwegen valt zelfs om de hele habitat autovrij te houden, zodat je ook geen verharde verbindingswegen waarop het normaal is om er met een rotvaart overheen te rijden, nodig hebt. Als alternatief voor de personenauto zou je dan de personen-helium-zeppelin kunnen introduceren (vliegtuigen, helikopters etc. zouden te lawaaiig zijn). Die zal echter om de zelfde vracht te kunnen vervoeren als een personenauto, al gauw 20 meter lang moeten zijn en 8 meter breed en hoog. Dat is lastig inparkeren en het vergt grote garages, bovendien moet het voor goede bestuurbaarheid niet te hard waaien (autoliefhebbers zullen autohaters aanbevelen te verkassen naar een eigen ruimtehabitat zonder auto's). Overigens zou je voor personen-helium-zeppelins wel luchtwegen of liever gezegd vliegzones moeten hebben, om te voorkomen dat overal maar kris kras overheen gevlogen wordt. Op grotere hoogte zouden die zones breder kunnen worden; dit zou allemaal goed te automatiseren moeten zijn. Een globale indeling van een ruimtehabitat zou kunnen zijn: drie steden met hoeken van 120 graden maximaal van elkaar verwijderd waar de meeste mensen wonen (onderling verbonden met hyperloops) vervolgens om die steden dun bevolkt buitengebied waar landbouw- en natuurgebieden elkaar afwisselen en waar de huizen bereikbaar zijn per (personen)zeppelin, en daaromheen tenslotte (ongeveer één derde tot helft van het oppervlak van de habitat) onbewoond natuurgebied waar je alleen kunt komen als je er moeite voor doet.

Afgezien van wat kleinschalige hobby- veeteelt en jacht (waarvoor uit sportiviteit alleen prehistorische technieken worden gebruikt) wordt kunstmatig vlees/vis via geavanceerde biochemische technieken rechtstreeks geproduceerd uit plantaardige grondstoffen, waarbij zowel de smaak als de textuur niet onderdoen voor echt vlees/vis. Alle machines zijn vrijwel geruisloos en elektrisch of biochemisch aangedreven. Kenmerkend voor moderne motoren zal zijn dat ze net als vissen en vogels geen snel roterende onderdelen hebben die we kennen van de tyfusherrie veroorzakende maaimachines, propellers van vliegtuigen en de schroeven van motorboten. Energie in de habitat is afkomstig van de zon via panelen op de romp en zonnesatellieten, en daarnaast van kernfusiecentrales. Plastic afval zoals wij het kennen bestaat niet meer; als er al kunststoffen gebruikt worden zitten deze buiten de biosfeer, zoals de MNT-laag waar de hele habitat op gebouwd is, of zijn deze snel afbreekbaar of bezinken deze als onschadelijk sediment mochten ze toch als afval in het oppervlaktewater komen. Arbeid wordt in de habitat hoofdzakelijk door robots uitgevoerd, zij houden zich onder meer bezig met het vervangen van rotslagen die te erg versleten zijn en het verwijderen van overtollig sediment. Om een aantrekkelijke omgeving te blijven is het van belang dat de habitat niet overbevolkt raakt. Om overbevolking te voorkomen is een maximaal aantal inwoners afgesproken per habitat, bijvoorbeeld 2 miljoen mensen voor een middelgrote habitat van honderdduizend vierkante kilometer en maximaal honderdduizend bezoekers die onderdeel zijn van uitwisselingsprojecten met andere habitats. Als het maximale aantal inwoners bereikt is, en er wil een immigrant zich vestigen in de habitat of iemand wil een kind via voortplanting toevoegen aan de bevolking, dan is afgesproken dat er eerst iemand moet sterven. Tegen de tijd dat deze habitats gemaakt kunnen worden, is de medische wetenschap waarschijnlijk ver gevorderd en kunnen mensen misschien wel meerdere eeuwen oud worden zonder noemenswaardige verouderingsverschijnselen en zijn ziektes vrijwel altijd te genezen. Deze medische zorg wordt echter

alleen geboden indien de zeggenschap over het krijgen van een kind is overgedragen aan de autoriteiten. Omdat de voordelen van die medische zorg erg groot zijn zal vrijwel iedereen daar mee akkoord gaan. De vergevorderde medische wetenschap heeft tot gevolg dat er weinig natuurlijke sterfte is. Het zou kunnen dat sommige mensen die bijvoorbeeld al drie eeuwen achter elkaar feest gevierd hebben toch een beetje levensmoe zijn geworden. Deze mensen zouden zich als vrijwilliger kunnen aanmelden om te sterven, mocht er een verzoek zijn binnen gekomen voor een nieuwe bewoner in de habitat. Als tegenprestatie krijgt zo'n vrijwilliger allerlei voorrechten in zijn laatste levensjaar, een heldenstatus en tenslotte een staatsbegrafenis. Het kan ook zijn dat er geen vrijwilligers te vinden zijn om te sterven. Er zou dan op oudejaarsavond een loterij gehouden kunnen worden om te bepalen wie er moet sterven, als alternatief voor de postcodeloterij. Of je zou mensen die ouder dan 500 jaar zijn geworden geen antiverouderingsbehandeling meer kunnen geven. Maar misschien is het wel zo sympathiek om dan maar af te zien van vernieuwing van de bevolking. Een consequentie van dit alles is dat er relatief weinig kinderen zullen zijn. Dat is voor die kinderen niet zo leuk, tenzij ze geconcentreerd bij elkaar gezet worden, maar dan zullen ze uit huis geplaatst moeten worden of regelmatig ver moeten reizen wat ook niet aan te bevelen is. Dit probleem kan echter opgelost worden door de echte kinderen aan te vullen met robot-kinderen (of liever gezegd cyborg-kinderen) die niet van echte zijn te onderscheiden. Als de echte kinderen 12 jaar zijn geworden, wordt ze verteld dat het merendeel van de kinderen nep is, ongeveer zoals in onze cultuur op een gegeven moment verteld wordt dat sinterklaas nep is. Hoewel robots natuurlijk handig zijn en zo ontworpen zijn om anderen zo min mogelijk tot last te zijn, is het misschien geen slecht idee om ook een limiet te stellen aan het aantal robots per habitat, want met robots kan het op een gegeven moment ook hinderlijk druk worden. Voor wat betreft dieren is het aan te bevelen bepaalde vervelende soorten maar niet te introduceren, zoals steekmuggen en teken. Gevaarlijke grote dieren zoals grote haaien, leeuwen en beren kun je ook maar beter op de aarde houden. Toch zul je wel roofdieren nodig hebben om balans te houden in bijvoorbeeld populaties graas- en knaagdieren; daarom zouden bijvoorbeeld wel vossen, roofvogels en wolven toegelaten kunnen worden.

Een ander scenario is dat middelgrote tot grote ruimtehabitats weliswaar een technologisch succes worden, maar toch niet populair worden om permanent in te leven. Hierdoor zullen er ook maar enkele van gebouwd worden. Een reden dat ze niet populair worden kan zijn dat de aarde een betere plek blijft om te leven, omdat de zelfde technologische innovatie die beschreven is voor ruimtehabitats ook op de aarde beschikbaar komt. Politieke verdeeldheid, verzet tegen verandering en de erfenis van wanbeleid worden overwonnen mede omdat de voordelen van de nieuwe technologie te groot zijn om te negeren. Daarnaast zou men op één of andere manier ook op de aarde er in slagen om de grootte van de bevolking te beteugelen.

Eén van de bezwaren tegen ruimtehabitats is dat ze in eerste instantie waarschijnlijk alleen voor een elite van bevoorrechten beschikbaar zijn, gesteld dat ze inderdaad een succes zijn en aantrekkelijke plekken blijken om te leven ten opzichte van de aarde. De elite koopt zichzelf een plek in een ruimtehabitat dankzij rijkdom of verkrijgt op een andere manier dat voorrecht. Vervolgens zal de elite die zich heeft gevestigd in een ruimtehabitat de neiging hebben zich af te zonderen van de aarde, om haar bevoorrechte positie te kunnen handhaven (bijvoorbeeld door strenge immigratiewetten). Het overgrote deel van de wereldbevolking zou er daarom weinig aan hebben. Dit bezwaar zou kunnen verdwijnen als er zeer veel ruimtehabitats bij komen, met een gezamenlijk oppervlak groter dan het bewoonbare oppervlak van de aarde, maar het zou ook kunnen dat nieuwe habitats al snel in handen komen van een nieuwe elite mogelijk vanuit de bestaande ruimtehabitats in plaats van vanuit de aarde. Aan de andere kant lopen bewoners van ruimtehabitats het risico dat hun werelden toch niet zo betrouwbaar blijken als aangenomen was. Zo zouden na een paar duizend

jaar scheurtjes of andere verzwakkingen in het draagmateriaal kunnen ontstaan, zodat de bewoners gedwongen zijn terug te keren naar de aarde. Daar zouden ze echter wel eens niet (meer) welkom kunnen zijn al was het alleen maar vanwege hun eigen ongastvrije houding tegenover aardbewoners, toen zij zich in hun ruimtehabitats juist in een veilig paradijs waanden. Tenslotte is een ander probleem van geïdealiseerde leefomgevingen zoals de voorgestelde habitats, het verlies aan dynamiek in de geschiedenis. De mensen zouden lange levens hebben die vooral besteed worden aan aangename bezigheden zoals feesten, uitgaan, spelletjes, hobby's beoefenen, winkelen, reizen en andere vormen van amusement. Er zouden wel mensen werk hebben, maar alleen omdat ze het leuk vinden; dat werk is dan eigenlijk meer hobby. Er zou verder in de ruimtehabitats maar weinig gebeuren, waardoor het nieuws beheerst wordt door pietluttigheden (zoals sportuitslagen en ongelukken). Aardse televisiezenders zouden weleens populair kunnen worden, omdat er op de aarde mogelijk nog wel eens wat bijzonders gebeurt. Dit is overigens een fenomeen dat in sommige rijke westerse landen nu al enigszins bespeurbaar is. Voor bewoners van een geïdealiseerde kolonie is het daarnaast moeilijk te accepteren dat zij voor hun eigen bestwil slaafs de technologie en de regels moeten toepassen die allemaal bedacht zijn door eerdere generaties en dat zij daar zelf maar weinig (en onder strenge restricties) aan kunnen toevoegen. De mensheid put er juist motivatie uit als vitale problemen opgelost moeten worden. Als dit verdwenen is omdat de grote problemen al opgelost zijn in het verleden of omdat vooruitgang alleen nog maar door kunstmatige intelligentie geboekt wordt, overvalt de mensheid een zekere doelloosheid. Bovendien als de mensheid in een technologische utopie in de watten is gelegd, kan zij scherpste en intelligentie verliezen, omdat alles wat ze nodig heeft toch wel komt aanwaaien. Dit zou wel tegengegaan kunnen worden door middel van een spelletjescultuur. Maar als dat de toekomst is van de mensheid, is dat bedenkelijk.

Rekening houdend met de voorraden koolstof en andere essentiële grondstoffen voor ruimtehabitats zou 100 tot 1000 maal het oppervlak van de aarde aan leefruimte gemaakt kunnen worden in de vorm van tienduizenden tot miljoenen habitats binnen ons zonnestelsel. Deze habitats zouden dan ook nog naar eigen inzicht ingericht kunnen worden, alleen de constructie van diepe oceanen en massief hooggebergte zouden niet tot de mogelijkheden behoren. Dit zou zo veel leefruimte van hoge kwaliteit bieden dat een poging om bewoonbare planeten rond andere sterren dan de zon te koloniseren, eigenlijk niet ondernomen hoeft te worden. De zon zelf is nog meerdere honderden miljoenen jaren lang betrouwbaar als energie en lichtbron, helemaal als de instraling van zonlicht in ruimtehabitats regelbaar is. Bovendien kan kolonisatie van bewoonbare planeten rond andere sterren problematisch zijn, omdat daar mogelijk al leven is (ook al zou het maar ééncellig zijn), dat niet goed samengaat met het eigen te introduceren leven (waarover later meer). Dit geldt mogelijk niet alleen voor ons maar ook voor eventuele aliens die grote biologische overeenkomsten vertonen met ons. Zij zouden in hun eigen planetenstelsel blijven waar meer dan genoeg extra leefruimte te maken valt, indien nodig. Interstellaire missies zouden alleen onbemand uitgevoerd worden vooral voor wetenschappelijke doelen. Deze tendens zou één van oplossingen kunnen zijn voor de Fermi-paradox (zie eventueel <http://www.markcopijn.nl/Buitenaardsen.pdf> voor een meer uitgebreide beschouwing hierover). Je zou overigens verwachten dat als ruimtehabitats populair worden bij aliens zij zichtbaar zouden moeten zijn als Dysonzwermen, die met de transitmethode voor planeetdetectie, aan te tonen zouden moeten zijn. Afgezien van het twijfelachtige geval van Tabby's ster, is zoiets echter nog niet waargenomen. Maar dit soort waarnemingen wordt nog maar kort uitgevoerd en slechts een heel beperkt aantal sterren is op deze wijze onderzocht.

Veelal wordt aangenomen dat naarmate een technologische beschaving zich verder ontwikkelt ze steeds meer energie aan haar omgeving onttrekt, om een alsmaar groeiende bevolking in leven te houden en te voorzien van steeds weer nieuwe speeltjes zodra deze is uitgekeken op de oude. Het energieverbruik per persoon per jaar zou tijdelijk redelijk constant kunnen blijven of zelfs enigszins

kunnen afnemen, maar het zou ook flink kunnen stijgen door de komst van nieuwe energieverblindende technieken. Bijvoorbeeld van sommige vormen van ruimtevaart is bekend dat deze gigantische hoeveelheden energie kosten, ook de aanleg van grote ruimtehabitats zal energieverblindend zijn. De energie waar het om gaat is de energie die voor handen ligt en die van lage entropie is. Voor de aarde is dat vooral zonlicht. Voor de zon is dat daarentegen vooral waterstof (als kernfusiebrandstof). Omdat de zon zijn waterstof maar langzaam verbruikt, is er voor de aarde heel lang zonlicht. De entropie voor de aarde als geheel kan heel lang laag blijven, door de balans tussen de energie van lage entropie die de zon instraalt en de energie van hogere entropie die door de aarde uitgestraald wordt (in de vorm van warmtestraling). Voor het zon-aarde systeem als geheel blijft de energie gelijk als je alle stralingsenergie meetelt, maar neemt de entropie toe. Entropie is een maat voor de orde in een systeem, hoe hoger de entropie hoe minder orde. Als er één ding onvermijdelijk gebeurt in het universum dan is dat het toenemen van de wanorde. Volgens de schaal van Kardasjov zou een technologische maatschappij van het type-1, die zoveel mogelijk energie benut op de planeet die het bewoont, kunnen doorgroeien naar een type-2 maatschappij die zoveel mogelijk energie benut in het gehele planetenstelsel waarin het woont (bijvoorbeeld door een Dysonzwerm van ruimtehabitats op te richten). Vervolgens zou een type-2 maatschappij zelfs kunnen doorgroeien naar een type-3 beschaving die zoveel mogelijk energie onttrekt aan het gehele sterrenstelsel waarin het woont. Dit soort sterrenstelsels zou te detecteren zijn, omdat hierin relatief veel warmtestraling ontstaat. Astronomen hebben wel eens geprobeerd dergelijke sterrenstelsels te vinden, maar zij zijn daar niet in geslaagd; hieruit zou blijken dat dit soort door aliens extreem geëxploiteerde sterrenstelsels in ons lokale universum niet bestaan of althans heel zeldzaam zijn. De schaal van Kardasjov is misschien ook wel een naïeve extrapolatie van de groei van ons eigen energieverbruik gedurende de afgelopen paar eeuwen. Hoewel de aarde nog geen Kardasjov type-1 maatschappij is geworden, is nu al duidelijk dat de bevolkingsgroei op de aarde niet meer als iets louter positiefs beschouwd kan worden.

De nadelen die een snelgroeiende miljarden bevolking op de aarde met zich meebrengt zijn ten eerste een toenemende drukte die als onaangenaam ervaren kan worden en ten tweede een toenemende dreiging van tekorten aan energie, grondstoffen en voedsel. Voor wat betreft energie gaat het er vooral om of op tijd kan worden overgeschakeld van fossiele brandstoffen naar zonne-energie en/of kernenergie. Voor zonne-energie alleen (zonnepanelen/collectoren en windturbines) is een energieopslagsysteem nodig, het meest voor de hand liggend op basis van waterstof. (Overigens is fossiele brandstof in zekere zin ook zonne-energie, alleen vastgelegd over miljoenen jaren en voor een groot deel verbruikt in een paar eeuwen.) Als deze energie-transitie niet snel genoeg doorgevoerd wordt, zal de mensheid in een crisis terechtkomen door een snelle globale opwarming van het klimaat. Op zich heeft het leven op aarde wel voor hetere vuren gestaan dan zo'n snelle globale opwarming, maar het is de combinatie met een miljarden bevolking die het voor de mensheid lastig maakt om de geavanceerde maatschappij dan in stand te houden. Anderzijds zou je kunnen zeggen dat een miljarden bevolking kennelijk nodig was om zo ver te komen als we nu zijn. Een andere dreiging door bevolkingstoename is een tekort aan voedsel. Nu al is ongeveer de helft van het bewoonbare oppervlak van de aarde in gebruik voor landbouw, 1000 jaar geleden was dit percentage nog maar 4%, volgens <https://ourworldindata.org/land-use>. Minder dan de helft van het bewoonbare oppervlak blijft over voor bos en ander natuurgebied. Een afwisseling van natuurgebieden en landbouwgebieden en daarnaast grote aaneengesloten natuurgebieden zijn van belang voor het behoud van biodiversiteit. Afnemende biodiversiteit en een afnemend areaal aan natuurgebied kunnen een rol spelen in het uitbreken van plagen, verminderde waterzuivering (o.a. ten behoeve van schoon drinkwater), verminderde bestuiving (o.a. van landbouwgewassen), meer erosie en minder bufferwerking o.a. met betrekking tot de waterhuishouding in periodes met veel of

juist weinig neerslag. Om een groeiende miljarden bevolking te kunnen blijven voeden zonder dat nog meer natuurgebieden verloren gaan kan zuiniger omgesprongen worden met voedsel (door minder weg te gooien) en vooral door de productiviteit per hectare van de landbouw nog verder te verhogen. De productiviteit van akkerbouw zou verder verhoogd kunnen worden door meer en efficiënter gebruik van kunstmest en bestrijdingsmiddelen, maar dat zal ook weer nadelige effecten hebben. Bovendien is er een bestanddeel van kunstmest waar een tekort aan zou kunnen ontstaan, namelijk fosfaat, omdat makkelijk winbare mineralen met een hoog fosfaatgehalte maar beperkt beschikbaar zijn. De grootste winst zou geboekt kunnen worden door minder vlees en zuivel te produceren en de vrijgekomen grond te gebruiken voor akkerbouw (ten behoeve van de productie van voedsel voor mensen), omdat 77% van al het landbouwareaal in gebruik is voor veeteelt terwijl dit maar 18% van de calorieën en 37% van de eiwitten oplevert in de totale hoeveelheid voedsel die de landbouw produceert. Het is echter de vraag of men in dunner bevolkte gebieden zoals in Rusland en Noord-Amerika waar nog wel ruim voldoende voedsel geproduceerd wordt voor de eigen bevolking, bereid is een groot deel van de veeteeltgebieden op te geven. Al met al zou een bevolking van 9 à 10 miljard mensen nog wel gevoed kunnen worden, maar dit zal nog heel wat voeten in de aarde hebben, en ergens zal daar ook wel een prijs voor betaald moeten worden in de vorm van ongewenste neveneffecten.

Een ander nadeel van een snel toenemende miljarden bevolking is drukte die als onaangenaam wordt ervaren. De meeste mensen hebben er geen bezwaar tegen om in een stad te wonen, of hebben daar zelfs een voorkeur voor omdat in een stad het voorzieningenniveau hoog is en de reistijd naar die voorzieningen in het algemeen kort is. Zolang de appartementen en huizen waar de mensen wonen maar van voldoende grootte en kwaliteit zijn en het transportsysteem goed functioneert kunnen in steden bevolkingsdichtheden van duizenden mensen per vierkante kilometer bereikt worden, zonder dat de inwoners in het algemeen last hoeven te hebben van drukte. Een wereldbevolking van miljarden mensen kan ook het best voor het overgrote deel in steden wonen, uit efficiency overwegingen. Het meest extreme andere uiterste is dat alle landbouwgrond evenredig verdeeld is over de gehele wereldbevolking. Indien een gemiddeld huishouden bestaat uit drie personen en de wereldbevolking 7,7 miljard mensen bedraagt, is er voor ieder huishouden 2 hectare grond beschikbaar. Maar dan moet zo'n huishouden alles wat het nodig heeft zelf verzamelen of produceren (voedsel, drinkwater, kleding en bouwmaterialen) op die 2 hectare grond, hooguit zou er wat ruilhandel gedaan kunnen worden met buurtbewoners en hier en daar wat uit bossen gehaald kunnen worden (of uit de zee als die in de buurt is). Een hoofdzakelijk stedelijke bevolking is dus efficiënter, maar de meeste mensen die in steden wonen willen ook af en toe genieten van de natuur, of in een andere meer inspirerende omgeving terecht kunnen komen. Indien twee derde van de natuur (inclusief woestijnen en landijs maar exclusief oceanen) niet toegankelijk is gesteld (reservaten & privébezit) of te onherbergzaam is, blijft er ongeveer 0,4 hectare natuurgebied per aardbewoner over (bij de huidige wereldbevolking). Verreweg de meeste stadsbewoners zullen op een willekeurige dag genoeg moeten nemen met een parkachtige omgeving in de buurt van hun woonplaats. Zo'n parkachtige omgeving kan best aardig zijn (en dat zou het ook moeten zijn om te voorkomen dat er te intensieve verkeersstromen ontstaan naar gebieden waar het nog wel mooi/interessant is), maar in het algemeen zal deze ruimte gedeeld moeten worden met nogal wat stadsgenoten en verkeersgeluid in de verte zal duidelijk hoorbaar blijven. Omdat de meeste mensen in het algemeen in deze parkachtige natuur blijven, resteert er meer ruimte voor de overige mensen die ruimere en stillere gebieden bezoeken, in de vorm van grotere natuurgebieden waar men zich meer dan circa 5 km uit de bewoonde wereld en verkeersaders kan begeven en vakantiegebieden met bijzondere landschappen. Natuurgebieden waarin men zich minstens 5 km uit de bewoonde wereld kan begeven, vereisen dat in dat gebied infrastructuur (vooral in de vorm van verharde

wegen) ontbreekt en dat er weinig privé bezit is. In dichtbevolkte gebieden zal dit in het algemeen zeldzaam zijn. Een grote wereldbevolking die veel vrije tijd en een hoge mobiliteit heeft, kan er toe leiden dat de ruimte per persoon in grotere natuurparken en vakantiegebieden toch tegenvalt, de verkeersstromen ernaar toe hinderlijk zijn of dat deze gebieden voor de meeste mensen alleen met veel moeite en lange reistijden bereikt kunnen worden. Daarnaast is het gemiddelde woonoppervlak per persoon in Europa maar 45 m² en het gemiddelde (particuliere) tuinoppervlak per persoon is nog wat minder (in Nederland ongeveer 36 m²). Het gemiddelde woonoppervlak per persoon is in Azië en Afrika nog lager. Als iets minder vlees en zuivel geproduceerd wordt, zou zeg maar 10% van het landbouwareaal vrijkomen en deze grond zou verdeeld kunnen worden over de gehele wereldbevolking voor een zelf te bouwen zomerhuisje. Bij de huidige wereldbevolking zou er dan maar 675 m² per persoon aan zomerhuisgebied beschikbaar zijn, en per huishouden van gemiddeld 3 personen maar 0,2 hectare. Als de zomerhuisgebieden wereldwijd geclusterd zijn in bijvoorbeeld 7000 aparte gebieden dan zouden de zomerhuisjes gemiddeld maar 45 meter van elkaar kunnen staan. Nu zal echter lang niet iedereen tegelijk in zijn zomerhuisje zitten. Sterker nog, de meerderheid van de wereldbevolking zal niet eens gebruik willen maken van de mogelijkheid om midden in de natuur te zitten, maar een voorkeur hebben voor een uitje of een vakantie met een hoog voorzieningenniveau. Als maar één op de 20 huishoudens gebruik wil maken van de mogelijkheid om een (zelf te bouwen) vakantiehuisje in de natuur te hebben, zal de gemiddelde afstand tussen naastliggende zomerhuisjes toenemen tot 200 meter. Dit is echter nog steeds vrij weinig zodat een vakantiehuisjesgebied nog steeds lijkt op een soort bungalowpark. Bij een kleinere wereldbevolking kan er nog meer landbouwgrond vrij komen omdat er minder mensen gevoed hoeven te worden en die grond hoeft dan ook nog eens verdeeld te worden over minder mensen. Zo zal bij een wereldbevolking van een miljard mensen de gemiddelde afstand tussen de zomerhuisjes toenemen tot 1,7 kilometer. Dit is een afstand die ergens op begint te lijken en die bijvoorbeeld net voldoende zou kunnen zijn om geen hinder te hebben van een onverlaat als buurman die het onzalige idee heeft opgevat om een bladblazer of kantenmaaier te gebruiken. Overigens is het de vraag of je aan mensen beter niet één klein stukje wildernis als particulier bezit kunt geven, maar gewoon 1 groot onverdeeld gebied waar iedereen wild mag kamperen.

Op grond van bovenstaande berekening is de optimale maximale bevolkingsgrootte voor de aarde ongeveer 1 miljard mensen (hoewel dit getal nog steeds enigszins willekeurig is). Is de bevolking aanzienlijk kleiner dan dat, dan kan het zijn dat de steden te klein worden om voldoende experts en artiesten samen te brengen voor genoeg levendigheid en beschikbaarheid van specialisten of wordt het overgrote deel van het bewoonbare oppervlak niet of nauwelijks door mensen gebruikt en is er daardoor weinig culturele diversiteit, wat vooral jammer is voor reizigers. Hecht men niet meer zo aan culturele diversiteit dan is een wereldbevolking van ongeveer 20 miljoen mensen bijvoorbeeld verdeeld over 10 stadstaten (verspreid over alle continenten) met elk 2 miljoen mensen ook wel voldoende. Er valt wel wat te voor zeggen om minder te hechten aan culturele diversiteit, want nu wordt de culturele identiteit vaak nog te serieus genomen, wat vaak aanleiding geeft tot conflicten. Is de wereldbevolking aanzienlijk groter dan circa een miljard mensen dan krijg je meer van ongeveer het zelfde en lopen de mensen elkaar ook meer in de weg. Meer zorgwekkend dan dat de wereldbevolking inmiddels de 7,7 miljard mensen heeft overschreden, is het ontbreken van controle over de groei van de wereldbevolking. Lokaal wordt bevolkingsgroei nog steeds gestimuleerd, om de economie een impuls te geven of om vergrijzing van de bevolking tegen te gaan. Sommige landen zijn er tijdelijk in geslaagd de bevolkingsgroei te remmen, zoals China met een 1-kindpolitiek. In veel andere landen wordt het totalitaire regime dat nodig is om de bevolkingsgrootte op deze wijze constant te houden of te verminderen, echter veroordeeld. In sommige geïndustrialiseerde landen in Zuid- en Oost-Europa, neemt de bevolkingsgrootte al af, omdat het geboortecijfer onder invloed van

economische factoren, laag genoeg geworden is. Een hoog opleidingsniveau bij vrouwen leidt in het algemeen ook tot lagere geboortecijfers. Of zo'n soort geboortebeperkend effect, mondiaal op tijd zou kunnen optreden, is echter nog maar de vraag. In armere landen neemt bovendien met een afnemend geboortecijfer de consumptie per nieuw geborene in het algemeen toe. Met een ongecontroleerde bevolkingsgroei stevent de mensheid af op een crisis zodra de vraag naar meer grondstoffen en energie, niet meer kan worden bijgebeend, of indien ongewenste neveneffecten van bevolkingsgroei en technologie, hun tol gaan eisen. Die crisis zou tot een maatschappelijke terugval kunnen leiden. Hierbij neemt de bevolkingsgrootte af maar dan wel op een rampzalige manier. Op deze wijze zou de mensheid zelfs kunnen uitsterven, en in zekere zin een zwakke diersoort blijken te zijn ten opzichte van bijvoorbeeld vissen die al 400 miljoen jaar in de oceanen zwemmen. (Anderzijds zou je kunnen zeggen dat het er niet om gaat hoe lang je overleeft maar wat je gedurende die tijd deed en dacht om het interessant te houden.) Hoog ontwikkelde beschavingen kunnen maatregelen nemen om zo'n crisis te voorkomen, en zo zouden ze hun geavanceerde technologie kunnen behouden en zelfs kunnen doorontwikkelen. Een technologisch geavanceerde maatschappij die er in slaagt zijn bevolkingsgrootte constant te houden, en die zich niet wil en hoeft uit te breiden naar andere sterren, zou je hoger ontwikkeld kunnen noemen, dan een maatschappij die een ontembare groeidrift heeft, en die dan ook inmiddels koloniën rond andere sterren heeft.

Indien het plan is opgevat om koloniën te stichten op bewoonbare planeten rond andere sterren, zou eerst uitgezocht moeten worden waar je precies heen wil gaan en of daar al leven is zo ja wat voor een soort leven dat dan is, en welke gevaren dat leven mogelijk voor ons zou kunnen hebben. Hiervoor is eerst onderzoek nodig met onbemande sondes, omdat alleen met telescopische waarnemingen (zelfs met behulp van de zon als gravitatielens) vermoedelijk onvoldoende details achterhaald kunnen worden. Dit onderzoek zou wel eens ongeveer een millennium tot tienduizenden jaren in beslag kunnen nemen. Als uit dit onderzoek zou blijken dat er leven is op planeten rond andere sterren, is het ook de vraag of je dit leven moet gaan bedreigen omdat de mensheid zo nodig een multiplanetaire soort moet worden (tenminste als dat leven niet compatibel blijkt met aards leven). Als het wemelt van het leven op zeer veel exoplaneten maar dit leven is in het algemeen primitief ééncellig leven, dan zou het bezwaar om althans enkele planeten te koloniseren, vervallen. Dit zou ook gelden als enkele planeten gekoloniseerd worden waar helemaal geen leven is, maar die ogenschijnlijk wel bewoonbaar zijn, bijvoorbeeld in het geval dat buitenaards leven sowieso erg zeldzaam blijkt of helemaal niet aangetoond kan worden. Maar als eenmaal begonnen wordt met het koloniseren van enkele exoplaneten zou het hek wel eens van de dam kunnen zijn, en zal een verdere kolonisatie naar steeds weer andere exoplaneten moeilijk tegen te houden zijn.

Het voornaamste bezwaar van interstellaire kolonisatie is dat het in eerste instantie waarschijnlijk een moeizame onderneming zal zijn, die maar voor erg weinig mensen iets oplevert. Indien met generatieschepen vertrokken zal worden naar planeten rond andere sterren zal een eventuele kolonie slechts een vage belofte zijn voor toekomstige generaties waar de achterblijvers en degenen die vertrekken weinig aan hebben. Indien met een relativistisch ruimteschip gereisd zal worden, zullen degenen die vertrekken nog wel kunnen aankomen op de bestemmingsplaneet. Maar de hiervoor benodigde energie per reiziger zal zo groot zijn, dat dit vermoedelijk maar voor heel weinig mensen is weggelegd. Bovendien zou voor deze enkelingen de bestemmingsplaneet kunnen tegenvallen, en wacht hen daar een teleurstellend en moeizaam leven. Omdat deze vorm van kolonisatie zoveel tijd en energie kost, zullen degenen die vertrekken waarschijnlijk ook nooit meer terugkomen. Communicatie met de thuisplaneet zal zoveel vertraging ondervinden, door de eindige waarde van de lichtsnelheid, dat hier ook niet al te veel van voorgesteld moet worden. Hierdoor zouden de mensen die zijn vertrokken kunnen vervreemden van de mensen die in het zonnestelsel

zijn achtergebleven en zich misschien ooit zelfs tegen hen kunnen gaan keren. Indien binnen het eigen planetenstelsel nog prima geleefd kan worden, is voor mensen één van de weinige redenen om exoplaneten te koloniseren dat men zich dan op de borst kan kloppen met de zelfingenomen gedachte dat de mensheid een multiplanetaire soort aan het worden is, die waarschijnlijk minder snel zal uitsterven dan een monoplanetaire soort. En dat terwijl mensen weten dat ze een diersoort zijn met nog al wat nare trekjes, die eigenlijk die ambitie misschien wel niet zou moeten hebben. Bovendien ben je dan aan het speculeren over het lot van de mensheid over een tijdsbestek van miljoenen jaren. Maar over zo'n lang tijdsbestek kunnen wij helemaal niet overzien wat er met de mensheid gaat gebeuren. Zal zij evolueren tot andere soorten (waarvan sommigen nu weerzin bij ons zouden oproepen als we ze zouden ontmoeten) of zal zij krampachtig blijven vasthouden aan wat ze ongeveer genetisch nu is, en overvleugeld worden door andere levensvormen of misschien wel de kunstmatige intelligentie die ze oorspronkelijk zelf ontworpen heeft? Overigens is deze analyse niet of in veel mindere mate geldig, als ooit wel technieken worden ontwikkeld waarmee snel en makkelijk naar andere sterren gereisd kan worden.

Als het gaat om de vraag wat we van aliens te vrezen hebben, kan vooruitlopend op een onderzoek met sondes al wel vast een analyse gemaakt worden. Aliens die minder ver ontwikkeld zijn dan mensen hoeven we niet te vrezen, want zij zitten opgesloten op hun eigen planeet (aangenomen dat de ruimte te vijandig is voor dierlijk leven). Alleen indien we die planeet lijfelijk zouden bezoeken zouden we ons mogelijk moeten hoeden voor een eventuele (dierlijke) aanval of verdediging. Voor aliens die verder ontwikkeld zijn dan wij maar niet expansief zijn, en doelbewust op hun thuisplaneet of binnen hun planetenstelsel blijven, geldt ook dat we ze niet hoeven te vrezen zolang we niet binnen hun territorium komen. Het is alleen de vraag tot waar hun territorium reikt, mogelijk gaat dit wel wat verder dan alleen hun planetenstelsel en omvat het ook een aantal buursterren. Op zich zijn geavanceerde niet-expansieve aliens te prijzen, omdat ze hun bevolkingsgrootte onder controle hebben en zich daarom niet hoeven uit te breiden. Hun niet-expansieve houding zou er ook op kunnen duiden dat ze eventuele andere levensvormen in het heelal de ruimte gunnen, en dat ze daarom zelf niet meer ruimte in beslag nemen dan nodig is. Mogelijk zijn ze meer geïnteresseerd in levensvormen die zich onafhankelijk van het leven op hun eigen planeet ontwikkeld hebben op andere planeten, dan de verspreiding van hun eigen levensvormen waarvan de aard hun al lang bekend is, naar andere planeten. Hun eventuele interstellaire missies zouden daarom vooral onbemand zijn en wetenschappelijke doeleinden dienen. Alleen indien het echt nodig is, zouden ze verhuizen naar een planeet rond een andere ster. Omdat deze aliens globaal maar op één plek blijven, hebben we misschien afgezien van hun wetenschappelijke sondes, maar weinig kans ze tegen te komen. Dan is er nog de mogelijkheid van aliens die misschien wel expansief zouden willen zijn, maar ondanks hun geavanceerde technologie, bemande interstellaire ruimtevaart niet van de grond krijgen. Zij zouden wel genetisch materiaal kunnen sturen naar andere bewoonbare planeten om op die manier hun biochemie te verspreiden naar planeten rond andere sterren. Dit zou echter weinig zin hebben tenzij ze menen ooit wel bemande en op kolonisatie gerichte reizen naar die planeten te kunnen maken. Hoewel het intensief en met weinig voorkennis verspreiden van sporen van leven als een bedenkelijke actie kan worden beschouwd, biedt besmetting met een buitenaardse biochemie waarschijnlijk niet zo veel gevaar voor ver geëvolueerd leven zoals op de aarde. Het doelbewust verspreiden van genetisch materiaal naar andere planeten, zou echter door andere aliens uitgelegd kunnen worden als een vijandige actie, het zou daarom ook nog eens gevaarlijk kunnen zijn. Dan is er nog de optie van aliens die wel expansief zijn en koloniën stichten rond andere sterren dan hun thuis-ster. Als ze dit doen omdat hun thuisplaneet of planetenstelsel overbevolkt is geraakt of anderszins door eigen toedoen matig of slecht leefbaar is geworden, dan is dit een slecht teken. Verwacht mag worden dat zij dan een destructieve levensstijl exporteren naar planeten rond andere

sterren (hoewel ze mogelijk wel geleerd hebben van hun fouten). Als zij exoplaneten koloniseren niet uit noodzaak maar uit hebzucht, geldingsdrang of een ontembare behoefte aan telkens weer wat nieuws, dan is dat ook een minder goed teken. Een bescheiden en gecontroleerde kolonisatie van een beperkt aantal reserve-planetten, die op een gegeven moment tot stilstand komt, zou niet zorgwekkend zijn, maar dit lijkt niet zo aannemelijk. Er zouden tenslotte ook nog wel aliens kunnen bestaan die niet koloniseren maar alleen maar wat rondreizen van ster naar ster (in een comfortabel schip waar ze van alle gemakken zijn voorzien), om af en toe de toerist uit te hangen op een planeet.

Van alle aliens die beschikken over geavanceerde technologie is de kans op een ontmoeting het grootst indien ze expansief zijn (onbemande verkenningssondes buiten beschouwing gelaten). Dit zijn ook de aliens waarvan vijandig gedrag het meest aannemelijk is, als mensen of andere aliens ze in de weg zitten. Wij hebben tot nu op de aarde of daar in de buurt niet aantoonbaar iets gemerkt van aliens, vijandig of niet. De eenvoudige verklaring hiervoor is dat ze er niet zijn, of alleen maar ver weg, misschien wel in een geheel ander sterrenstelsel. (Of ze bevinden zich niet al te ver van ons maar hebben ons nog niet gevonden, zodat een ontmoeting of confrontatie op de aarde nog moet plaatsvinden). Het kan ook zo zijn dat ze er wel zijn, maar de aarde bewust links laten liggen omdat hun voorkeur uitgaat naar het koloniseren van bewoonbare planeten waarop geen leven is of alleen maar primitief leven; dit op ethische of praktische gronden. Als dit zo is, dan zou het pas tot een confrontatie kunnen komen tussen mensen en aliens als ze de zelfde bewoonbare maar hooguit door primitieve organismen bevolkte planeten, (willen) gaan koloniseren. Het kan zijn dat de primitieve organismen op zo'n planeet al zijn aangepast aan het leven van de aliens, om zo latere bewoning mogelijk te maken. Er is wel eens gesuggereerd dat een beschaving die koloniën heeft rond een groot aantal sterren, evenwichtig moet zijn op een tijdschaal die overeenkomt met galactische reistijden, van zeg maar honderdduizend jaar. Die stabiliteit zou alleen gegarandeerd zijn, indien die beschaving in essentie vredelievend is. Dit argument gaat echter alleen op als er sprake is van een galactisch imperium. Echter als de lichtsnelheid een beperking blijft in communicatie en ruimtevaart, is het niet aannemelijk dat een galactisch imperium gevormd wordt. Interstellaire kolonisatie zou eerder het karakter van een diaspora hebben. Kolonisten vertrekken naar bewoonbare exoplaneten om in principe nooit meer terug te keren. De beschaving moet dan zo stabiel zijn dat ze tijd heeft om de technologie te ontwikkelen voor bemande interstellaire ruimtevaart (voor zover überhaupt haalbaar). Dat hoeft niet extreem lang te zijn, misschien dat mensen zoiets al binnen een paar eeuwen zouden kunnen ontwikkelen. Een bepaalde mate van agressiviteit zoals je die ook bij mensen aantreft, valt daarbij niet uit te sluiten. Zolang aliens daarnaast voldoende rationeel zijn, hoeft een snelle zelfdestructie (voordat de technologie is ontwikkeld om naar andere sterren te reizen) door bijvoorbeeld oorlogen, niet de enige mogelijke uitkomst te zijn. Een ander punt is dat sommige aliens mogelijk maar weinig empathie voor ons zouden kunnen opbrengen omdat wij in uiterlijk en gedrag zeer sterk van hen verschillen. Zo kunnen wij maar weinig empathie opbrengen voor kakkerlakken. Als mensen een kakkerlakkensoort zouden ontdekken die raketten maakt waarmee ze heen en weer vliegen naar Mars, zouden we wel wat meer bewondering voor ze krijgen. Maar als ze dan nog steeds door onze huizen zouden blijven kruipen, zouden we ze mogelijk toch net zo lief weer vermorzelen onder de hakken van onze schoenen.

De in de vorige alinea's beschreven bedenkingen en mogelijke gevaren van interstellaire kolonisatie ontbreken grotendeels bij kolonisatie door middel van ruimtehabitats binnen ons eigen planetenstelsel. Hierbij moet echter wel een kanttekening geplaatst worden. Het is namelijk goed denkbaar dat grote tot middelgrote ruimtehabitats niet gemaakt kunnen worden of een te korte levensduur hebben, om bruikbaar te zijn. Dat bulkmaterialen met een treksterkte van 50 GPa gemaakt kunnen worden, mag aangenomen worden, maar dat wil nog niet zeggen dat je er werelden op kan bouwen die een miljoen jaar of langer mee kunnen gaan. Het zou bijvoorbeeld kunnen dat

het draagmateriaal al in de loop van duizenden jaren langzaam degradeert, en daardoor een deel van zijn sterkte verliest. Herstelwerkzaamheden zouden zo goed als onmogelijk kunnen zijn omdat de rotatie van de habitat niet even stil gezet kan worden. Als de constructie en exploitatie van grote tot middelgrote ruimtehabitats niet mogelijk is, zijn de mogelijkheden om koloniën te stichten buiten de aarde in het zonnestelsel zeer beperkt en die koloniën zullen bovendien geen goede alternatieve leefruimte voor de aarde bieden. Kleinere ruimtehabitats van de omvang zoals Gerard O'Neill die destijds voorstelde, zouden nog wel gemaakt kunnen worden. Daarnaast is het ook wel aannemelijk dat verbeteringen in constructiematerialen tot stand komen die de eerder beschreven kleine ruimtehabitats met een rotatiestraal van 11,5 km, mogelijk maken. De levensduur van deze kleine habitats zou dan ook nog wel opgerekt kunnen worden tot ruim honderdduizend jaar. Als de aarde echt de enige plek is waar de mensheid goed kan leven, is het toch de vraag of niet geprobeerd zou moeten worden om een bewoonbare planeet rond een andere ster te bereiken, of de optie te hebben dit ooit eens te gaan doen. Als de boel hier echt reddeloos verloren is, zou je nog de mogelijkheid hebben te vluchten naar een ander planetenstelsel. Het volgende hoofdstuk gaat onder meer over de vraag of het mogelijk is om van zo'n kleine roterende ruimtehabitat een generatieschip te maken om andere sterren mee te bereiken, en of het mogelijk is dit op een andere (snellere) manier te doen.

4. Koloniën op bewoonbare planeten rond andere sterren dan de zon.

Om met een ruimteschip naar andere sterren te gaan, moeten astronomisch grote afstanden van vele lichtjaren overbrugd worden. Als zich op 300 lichtjaar een bewoonbare planeet zou bevinden die op de aarde lijkt, zou dat een meevaller zijn. Misschien moet je wel meer dan 10 keer zo ver gaan om zo'n planeet te vinden. Als je zo'n verre eindbestemming wilt bereiken zul je beschikking moeten hebben over een grote hoeveelheid energie. Deze energie zal voor de meeste ruimteschepen ook meegenomen moeten worden om voor voortstuwing te zorgen tijdens de reis. Deze voortstuwing komt voort uit de impuls van de uitgestoten massa of straling per eenheid van tijd. Volgens de derde wet van Newton (of de wet van behoud van impuls) ontstaat dan immers een reactiekracht op de raket in de tegenovergestelde richting. Er zijn enkele technieken waarvoor geldt dat je de energie niet hoeft mee te nemen (omdat de energie bijvoorbeeld via lasers wordt verzonden vanuit vaste locaties over grote afstanden of geoogst wordt uit het interstellair medium), maar deze worden tot nu toe nog maar beperkt en met weinig spectaculaire resultaten toegepast of zijn nog niet goed technisch te onderbouwen. Verderop in dit artikel zullen deze technieken nog ter sprake komen. De ondergrens voor de benodigde energie voor een ruimtereis wordt gegeven door de kinetische energie van het ruimteschip bij zijn maximale snelheid ($\frac{1}{2}mv^2$ met v de maximale snelheid en m de massa), eventueel vermenigvuldigd met 2, als je er rekening mee wilt houden dat ook energie nodig is om af te remmen richting de bestemming. Dit geldt voor een niet relativistisch ruimteschip (globaal tot een maximale snelheid ruim onder de 25% van de lichtsnelheid). Voor een relativistisch ruimteschip zal relatief nog meer energie nodig zijn; de kinetische energie wordt meer algemeen gegeven door: $mc^2((1-v^2/c^2)^{-0.5}-1)$ waarin c de lichtsnelheid. Uiteraard zal aanzienlijk meer energie dan deze ondergrens nodig zijn, omdat lang niet alle energie die als brandstof wordt meegenomen in de kinetische energie van het ruimteschip kan worden omgezet. Maar de grootte van de kinetische energie van een ruimteschip bij zijn maximale snelheid geeft al wel goed aan om welke gigantische energieën het gaat. Bijvoorbeeld de kinetische energie van een ruimteschip met een maximale snelheid van 25% van de lichtsnelheid, die daarbij een massa van 10000 ton heeft, bedraagt: $2,9 \cdot 10^{22}$ Joule, wat ongeveer 50 keer zo veel is als het huidige totale jaarlijkse wereldwijde energiegebruik. Bij een gegeven hoeveelheid energie die beschikbaar is voor een interstellair reis kan gekozen worden voor een zo groot mogelijke snelheid en een minimale massa, om zo snel mogelijk op de bestemming aan te komen. De droge massa, dat is de massa zonder reactiemassa/brandstof, zal echter nog wel zo

hoog moeten zijn dat het de bemanning voldoende comfort en bescherming tegen kosmische straling biedt en het zal ook alle technische installaties omvatten die nodig zijn voor het functioneren van de raket. Een andere benadering is, om de maximale snelheid hoog genoeg te laten oplopen om in ieder geval aan de zwaartekracht van de zon te ontsnappen, en een zeer lange reis naar de eindbestemming te accepteren, maar dan wel met een maximale massa ten behoeve van de bemanning in de vorm van een zogenaamd generatieschip; dit concept zal later behandeld worden. In beide gevallen is het van belang zo veel mogelijk energie mee te nemen maar zo min mogelijk massa in de vorm van brandstof. Dit betekent dat alleen brandstoffen met een extreem hoge energiedichtheid in aanmerking komen. Dit zijn nucleaire brandstoffen (gebaseerd op kernsplijting of kernfusie) of antimaterie/materie. De laatste is de brandstof met de hoogst haalbare energiedichtheid.

§ 1. Snelle interstellaire bemande ruimtevaart met weinig massa

Om de maximale snelheid van een raket te berekenen kan gebruik gemaakt worden Tsiolkovski's raketvergelijking. De klassieke raketvergelijking van Tsiolkovsky is afgeleid uit Newtoniaanse mechanica en luidt: $\Delta v = v_e \cdot \ln(M_0/M_1)$, waarin: M_0 de startmassa van de raket (ook wel de natte massa genoemd), M_1 de eindmassa van de raket (ook wel de droge massa genoemd), Δv de verandering van de snelheid van het ruimteschip ten gevolge van de uitstoot en v_e is de effectieve uitstootsnelheid van de reactiemassa die afkomstig is van de raket ten behoeve van de voortstuwing. De effectieve uitstootsnelheid (in m/s) vermenigvuldigd met het verbruik van de reactiemassa per tijdseenheid (in kg/s) is gelijk aan de stuwkracht in Newton. Voor traditionele raketten geldt dat het verbruik van de reactiemassa per seconde gelijk is aan het brandstofverbruik per seconde. De effectieve uitstootsnelheid gedeeld door de zwaartekrachtversnelling aan het oppervlak van de aarde is gelijk aan de specifieke impuls. Traditioneel wordt vaak gesproken over de specifieke impuls in plaats van de effectieve uitstootsnelheid, en de stuwkracht wordt dan gegeven in een massa-eenheid, maar rekening houdend met de eenheden zijn beide grootheden equivalent. Er bestaat overigens ook een relativistische variant van de Tsiolkovsky's raketvergelijking (namelijk: $\Delta v = c \cdot \tanh(v_e/c \cdot \ln(M_0/M_1))$ waarin c de lichtsnelheid is). Tsiolkovsky's raketvergelijking laat zien dat indien je een hoge maximale snelheid (of eigenlijk een hoge Δv) wilt halen van bijvoorbeeld meer dan 10% van de lichtsnelheid een hoge effectieve uitstootsnelheid van ongeveer de zelfde grootteorde, nodig is. Door veel brandstof/reactiemassa mee te nemen ten opzichte van het droge gewicht van de raket, kan Δv nog wel 3 keer zo groot worden als de effectieve uitstootsnelheid, voor een relativistisch ruimteschip is dit nog minder. Om dit te bereiken moet de verhouding M_0/M_1 20 zijn. Heel veel groter kan die verhouding niet gemaakt worden omdat de constructie van de daarvoor vereiste raket, rekening houdend met brandstoftanks, de vereiste stevigheid van de romp en andere essentiële technische voorzieningen, dan zeer problematisch wordt. Door gebruik te maken van een meertrapsraket kan Δv nog wel iets verder opgerekt te worden, omdat zo'n raket stapsgewijs zijn massa extra verlaagd door het afwerpen van lege brandstoftanks en bijbehorende motoren. De versnellingsfase van een meertrapsraket kan opgesplitst worden in een Δv voor iedere trap; de som van de Δv 's geeft dan de totale snelheidsverandering. Echter door trappen toe te voegen neemt de startmassa van de raket exponentieel toe. Stel dat een raket is opgebouwd uit trappen die elk bestaan uit een massa van 80% brandstof, 10% structuur en 10% resterende trappen (of nuttige lading indien sprake is van de laatste trap), neem als effectieve uitstootsnelheid telkens 4,4 km/s en kies voor de nuttige lading 45 ton (een massa die een Saturnus 5 raket naar een baan om de Maan kon brengen). Iedere trap geeft dan een Δv van ongeveer 7 km/s ($4,4 \cdot \ln 5$). De startmassa van de raket (in tonnen) wordt nu gegeven door $45/(0,1)^x$, waarin x het aantal trappen. Voor een Δv van 28,3 km/s (6,4 maal de effectieve uitstootsnelheid) zijn nu vier trappen nodig; de benodigde

startmassa is daarbij opgelopen tot circa 450000 ton, 150 maal de startmassa van een Saturnus 5 raket. Nog een trap erbij zou een Δv geven van 35,4 km/s en een startmassa van 1500 maal een Saturnus 5 raket. Dit rekenvoorbeeld illustreert dat door het gebruik van trappen de maximale snelheid nog wel hoger dan drie maal de effectieve uitstootsnelheid kan worden, maar dat dit al snel leidt tot onrealistisch hoge startmassa's. Een andere reden om een getrapte raket te gebruiken is overigens, dat op deze wijze de te gebruiken raketmotor op specifieke omstandigheden tijdens de lancering kan worden aangepast. Bij een lancering vanaf de aarde is de eerste stap, waarbij de raket behalve tegen de zwaartekracht ook tegen de wrijving van de atmosfeer moet opboksen, de lastigste. Voor deze stap kan bijvoorbeeld gekozen worden voor een iets lagere effectieve uitstootsnelheid en een hogere stuwkracht.

Een hoge effectieve uitstootsnelheid is dus nodig voor een hoge maximale snelheid. Echter hoe hoger de effectieve uitstootsnelheid is, hoe minder stuwkracht per geleverd vermogen je krijgt, want de kinetische energie van de uitgestoten massa hangt af van het kwadraat van de effectieve uitstootsnelheid terwijl de impuls evenredig is met de effectieve uitstootsnelheid. De verhouding tussen de stuwkracht en het vermogen dat de raket moet leveren (rendementsverliezen buiten beschouwing gelaten) is $2/v_e$. Maar een lage effectieve uitstootsnelheid ten opzichte van de snelheidsverandering die nagestreefd wordt, maakt het noodzakelijk om relatief veel reactiemassa mee te nemen wat ook niet energie efficiënt is. De optimale (de meest energie efficiënte) effectieve uitstootsnelheid voor een vereiste snelheidsverandering Δv wordt gegeven door:

$v_e(\text{optimaal})=0,6275 \cdot \Delta v$ (voor een niet relativistisch ruimteschip). Indien men gebruik wenst te maken van een hoge effectieve uitstootsnelheid (om een hoge maximale snelheid te halen), zal voor een zekere stuwkracht relatief veel vermogen geleverd moeten worden. Dit zal in het algemeen al snel aanleiding geven tot een ongunstige verhouding tussen de stuwkracht en de massa van de brandstof en de technische installatie die de stuwkracht levert. Een ionenmotor zou bijvoorbeeld een hoge effectieve uitstootsnelheid kunnen geven vergeleken met een conventionele chemische raket. Daartoe zou de ionenmotor aangedreven moeten worden met een generator die elektrische stroom levert. De elektrische stroom zou dan gebruikt worden om een reactiemassa die bijvoorbeeld bestaat uit Xenon-gas, te versnellen. Echter als een chemische brandstof wordt gebruikt om de generator aan te drijven zou de totale massa van het ruimteschip zodanig groot worden dat de winst die geboekt was met de hoge effectieve uitstootsnelheid, teniet gedaan wordt door een ongunstige verhouding M_0/M_1 . Bovendien zou door de geringe stuwkracht ten opzichte van de totale massa van het ruimteschip, slechts een kleine versnelling mogelijk zijn. Dit probleem zou opgelost kunnen worden door een brandstof te gebruiken met een veel hogere energiedichtheid dan chemische brandstoffen, zoals nucleaire brandstoffen. Om met nucleaire brandstoffen hoge vermogens te leveren voor een ionenmotor, is echter een nucleaire elektriciteitscentrale nodig die een aanzienlijke massa zal hebben. Die hoge massa zal al gauw opnieuw aanleiding geven tot een ongunstige verhouding M_0/M_1 en een hoge totale massa ten opzichte van de stuwkracht. Er zijn wel technieken waarmee met nucleaire brandstoffen hoge effectieve uitstootsnelheden en een gunstige verhouding tussen stuwkracht en massa gecombineerd kunnen worden. Deze zullen verderop in dit artikel nog ter sprake komen.

In een ionenmotor wordt een stuwstof (vaak Xenon) geïoniseerd, waarna de positief geladen ionen via een Coulomb-kracht worden versneld; de effectieve uitstootsnelheden liggen zo tussen de 20 en 50 km/s. Er bestaan daarnaast plasma voortstuwingstechnieken. Hierbij wordt eerst een plasma gemaakt, vervolgens wordt het plasma door middel van een Lorentz-kracht versneld. Een voorbeeld van zo'n techniek is VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket). Hierin wordt een inerte stuwstof door middel van radiogolven omgezet in een plasma, waarna het plasma magnetisch versneld wordt om zo stuwkracht te genereren. Plasma en ionen motoren hebben een goed

rendement en verbruiken weinig stuwmassa voor toch nog redelijke snelheidsveranderingen, maar leveren maar weinig stuwkracht, omdat ze werken met lage vermogens. De elektrische energie voor dit soort motoren wordt in het algemeen verkregen via zonnepanelen. Ze worden vooral gebruikt voor satellieten en kleine verkenningssondes in het zonnestelsel.

Raketten waarmee tot nu toe bemande buitenaardse vluchten zijn uitgevoerd zijn allemaal chemisch aangedreven. De meest performante chemische raketmotor is gebaseerd op de verbranding van waterstof met zuurstof. Deze geeft een effectieve uitstootsnelheid van 4,4 km/s. Met deze effectieve uitstootsnelheid kan nog maar net de ontsnappingsnelheid van de aarde (11,2km/s) overtroffen worden. Vandaar dat voor een reis naar de Maan al een reusachtige drietrapsraket met een startmassa van 2950 ton die voor 91% uit brandstof bestond, nodig was. Het voordeel van een chemische verbrandingsmotor is wel dat het brandstofverbruik per seconde hoog opgevoerd kan worden, hierdoor kan toch een enorme stuwkracht ontwikkeld worden. Verder geldt dat voor een chemische raket de verhouding tussen stuwkracht en de massa van de brandstof weliswaar klein is, maar dat de massa die nodig is aan technische installaties ten opzichte van de massa van de brandstof niet al te hoog hoeft te zijn. Al met al kunnen bemande chemisch aangedreven ruimteschepen een lading van tientallen tonnen in een baan om de aarde brengen en nog wel verder, bijvoorbeeld de Maan. Bovendien is het gebruik van een chemische raket één van de weinige manieren om vanaf het aardoppervlak naar de ruimte te gaan. Deze stap vereist een voldoende hoge verhouding tussen stuwkracht en massa om de zwaartekracht van de aarde en de wrijving van de atmosfeer te overwinnen. Het vereist bovendien een type motor dat ook functioneert bij atmosferische druk. Ook is het voor deze stap van belang dat er geen radioactieve afvalstoffen of gevaarlijke straling vrijkomt. Een chemische verbrandingsmotor behoort tot de zeldzame technieken die aan al deze eisen voldoet.

Om hoge effectieve uitstootsnelheden te combineren met hoge stuwkracht en relatief lage brandstofmassa zodat interstellair, bemande reizen mogelijk worden, zal voor raketten die hun brandstof zelf meenemen, gebruik gemaakt moeten worden van alternatieve (zoals nucleaire) brandstoffen die een veel hogere energiedichtheid hebben dan chemische brandstoffen. Een chemische brandstof zoals een mengsel van waterstof en zuurstof (2:1) heeft slechts een energiedichtheid van 15 MJ ($1,5 \cdot 10^7$ J) per kg. Nucleaire brandstoffen kunnen gebaseerd zijn op de zware splijtbare (en potentieel kettingreacties veroorzakende) isotopen uranium-233, uranium-235 en plutonium-239, waarvan alleen uranium-235 van nature voorkomt op de aarde. Naast plutonium-239 kunnen uranium of thorium (de laatste via uranium-233) in kweekreactoren, rond de 80 TeraJoule ($8 \cdot 10^{13}$ J) per kg nucleaire brandstof, leveren. Nog betere nucleaire brandstoffen zijn gebaseerd op kernfusie. Kernfusie kan nu alleen nog ongecontroleerd uitgevoerd worden in explosies zoals in waterstofbommen gebeurt. Een kernfusiereactie die een kans maakt om op redelijk korte termijn in een gecontroleerde fusiereactor uitgevoerd te worden, is de reactie tussen tritium en deuterium onder vorming van helium-4 en een neutron; een mengsel van deuterium en tritium zou dan een energiedichtheid van 337 TJ per kg hebben. Tritium is echter tamelijk instabiel met een halveringstijd van ongeveer 12 jaar, wat het minder geschikt maakt als raketbrandstof. Bovendien komt bij deze fusiereactie een neutron vrij, en in dit neutron zit ook de meeste energie die bij de reactie vrijkomt. Dat is vooral in een toepassing in een raket ongunstig omdat een neutron niet met elektrische of magnetische krachten te controleren is. Het instabiliteitsprobleem van tritium zou met lithium-6 opgelost kunnen worden, omdat lithium-6 onder opname van een neutron helium-4 en tritium oplevert; het gekweekte tritium kan vervolgens gebruikt worden voor fusie met deuterium. De raketbrandstof zou dan ${}^6\text{LiD}$ (lithiumdeuteride) zijn. ${}^6\text{LiD}$ heeft dan een energiedichtheid van 269 TJ per kg. Fusie van alleen deuterium o.a. tot helium-4 en helium-3 is iets lastiger om op gang te brengen en levert 225 TJ per kg, maar is ook niet aneutronisch. Meer dan de helft (66%) van de

vrijgekomen energie gaat zitten in neutronen. Wel een voordeel van deuteriumfusie is dat deuterium van alle hoogwaardige fusiebrandstoffen het minst zeldzaam is. Nog beter zou de reactie tussen helium-3 en deuterium zijn onder vorming van helium-4 en een proton. Deze reactie is aneutronisch en zou 352 TJ per kg helium-3/deuterium leveren indien geen zijreacties optreden, maar is wel nog moeilijker om op gang te brengen. Maar er zal wel in enige mate sprake zijn van zijreacties tussen deuterium kernen waarbij alsnog neutronen ontstaan (de fractie van de energie die als neutronen vrij komt is 5%). Dit nadeel heeft de fusiereactie tussen 2 helium-3 kernen tot helium-4 en 2 protonen niet, maar vereist nog hogere temperaturen om op gang te brengen. De reactie levert 206 TJ per kg helium-3. De conversie van 4 protonen tot 1 helium-4 kern in meerdere stappen, zoals die in sterren als de zon plaats vindt (ook wel proton-proton cyclus genoemd), levert circa 630 TJ per kg waterstof, maar dit zal niet zomaar in een fusiereactor te imiteren zijn. Vooral de eerste stap waarin 2 protonen 1 deuterium kern vormen verloopt zeer traag. Dankzij deze traagheid kan een ster die zijn energie haalt uit de proton-proton cyclus erg lang teren op zijn waterstofvoorraad, en daardoor miljarden jaren lang schijnen. Tenslotte is er nog de optie van materie/antimaterie dat de hoogst mogelijk energiedichtheid heeft, namelijk 89875,5 TJ per kg.

De meest eenvoudige manier om met behulp van kernenergie hoge uitstootsnelheden voor raketvoortstuwing te bewerkstelligen is het tot ontploffing brengen van kernbommen; met de hoge impuls van het uitgestoten explosieplasma wordt dan een enorme kracht op de eigenlijke raket uitgeoefend die voor de voortstuwing zorgt. Deze manier van voort bewegen lijkt meer thuis te zijn in een Wile e Coyote tekenfilm, maar is serieus overwogen. Het is de hoge temperatuur van het plasma (miljoenen graden C) die voor de hoge uitstootsnelheid zorgt; de effectieve uitstootsnelheid is evenredig met de vierkantswortel uit de temperatuur van de uitlaatgassen. In kernreactoren zijn dit soort temperaturen moeilijk te bereiken en nuttig te gebruiken omdat ons bekende materialen er niet tegen bestand zijn, (een uitzondering hierop vormt een zogenaamde kernsplijtingsfragment reactor, die echter alleen nog als theoretisch concept bestaat: https://en.wikipedia.org/wiki/Fission-fragment_rocket). Door kernexplosies buiten de raket te laten plaats vinden, wordt dit probleem omzeild. Bovendien is voor het tot ontploffing brengen van kernbommen relatief weinig massa aan technische installaties nodig vergeleken met energie geleverd door kernreactoren. In de jaren zestig van de vorige eeuw is het zogenaamde project Orion voorgesteld om dit principe te gebruiken voor ruimtevaart. In project Orion wordt voorgesteld om gebruik te maken van een drukplaat waaraan zoveel mogelijk impuls van het explosieplasma van de kernbommen wordt overgedragen; de drukplaat is met schokdempers verbonden aan de rest van de raket. Met deze techniek zou een effectieve uitstootsnelheid van circa 10000 km/s bereikt kunnen worden. Oorspronkelijk was het de bedoeling om met een dergelijk raketsysteem vanaf de aarde bijvoorbeeld in één keer naar Mars te vliegen. Een lancering vanaf de aarde zou echter tot een behoorlijke radioactieve besmetting leiden, waar bezwaar tegen is gemaakt. Later is met de sluiting van een verdrag tegen het gebruik van kernwapens in de ruimte, ook een lancering buiten de aarde minder waarschijnlijk geworden. In de jaren 70 van de vorige eeuw is een meer geavanceerde variant van deze raketvoortstuwingstechniek voorgesteld onder de naam project Daedalus. In dit ontwerp worden pellets van helium-3 en deuterium met behulp van een bombardement van elektronen tot ontploffing gebracht; het resulterende plasma wordt met een magnetisch veld in één richting afgebogen, om zo voor de voortstuwing te zorgen. De effectieve uitstootsnelheden die hiermee bereikt kunnen worden, zijn ongeveer gelijk aan die van project Orion. Het helium-3 dat nodig is voor project Daedalus is nu nog te beperkt voorradig om interstellaire reizen mogelijk te maken. Op de Maan zou zich een voorraad van een miljoen ton helium-3 bevinden. Daarnaast bevindt zich veel helium-3 in de atmosfeer van de grote gasplaneten (Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus). Nucleaire-puls-propulsie zoals voorgesteld in project Orion, behoort waarschijnlijk tot de weinige technieken waarmee met de

huidige stand van techniek interstellaire reizen gemaakt zouden kunnen worden, die ook de massa van een bemanning en uitrusting zouden kunnen dragen. Het type kernfusie dat deze techniek benut, wordt ook wel traagheidsfusie genoemd, omdat door de traagheid van de samengeperste massa lang genoeg condities aanwezig zijn, waarbij kernfusie kan optreden. Een ander type kernfusie is magnetische opsluitingsfusie, die krachtige magneten gebruikt om de fusiereactie meestal in een donutvormig vat (ook wel tokamak genoemd), tot stand te brengen. De maximale snelheid die met nucleaire-puls-propulsie bereikt kan worden, bedraagt ongeveer 10% van de lichtsnelheid (ca. 30000 km/s). Indien ook afgeremd moet worden naar de eindbestemming met de meegenomen kernbommen is de maximale snelheid echter nog maar circa 5% van de lichtsnelheid. Dat afremmen is voor bemande missies noodzakelijk omdat anders alleen een glimp van de eindbestemming opgevangen kan worden en een echt bezoek aan een eventuele planeet onmogelijk zou zijn. Een missie inclusief afremmen wordt ook wel een rendez-vous missie genoemd, terwijl een missie zonder afremmen bekend staat als een fly-by missie. Met een maximale snelheid van 5% van de lichtsnelheid zou zelfs de dichtstbijzijnde ster (proxima Centauri op een afstand van 4,25 jaar) niet binnen 1 leven (met de huidige levensverwachting en een onbezorgde jeugd op de aarde) te bereiken zijn. Indien afgeremd zou kunnen worden door gebruik te maken van interstellair waterstof zou wel 10% van de lichtsnelheid gehaald kunnen worden. De daartoe voorgestelde remtechniek met een magnetisch zeil, zou echter wel vereisen dat de lading van de raket ongeveer anderhalf tot twee keer zo groot wordt vanwege de massa van het magnetische zeil dat dan meegenomen moet worden. Zie <https://arxiv.org/pdf/1707.02801.pdf> voor de achterliggende berekening.

Om nog sneller te kunnen gaan dan raketten zoals voorgesteld in project Orion of Daedalus zouden nog hogere effectieve uitstootsnelheden verkregen moeten worden. Eén van de mogelijkheden is een fotonische raket die weliswaar geen reactiemassa uitstoot maar wel licht en dat met de lichtsnelheid. Licht heeft geen massa, maar wel impuls zodat het gebruikt kan worden voor voortstuwing. De impuls van een foton is volgens de vergelijking van de Broglie: $p = h/\lambda$, met h de constante van Planck en λ de golflengte. Uit $c = \lambda \cdot f$ en $E = h \cdot f$ (waarin c de lichtsnelheid, f de frequentie van het licht en E de energie van het licht) volgt dat voor de impulsverandering ofwel de stuwkracht van het licht (F) geldt: $F = P/c$, waarin P het vermogen is van het uitgezonden licht, waarbij is aangenomen dat al het licht gebundeld is en één specifieke richting opgaat. Het licht kan gemaakt worden door een zogenaamde zwarte straler die bijvoorbeeld bestaat uit wolfram of grafiet te verhitten met warmte geproduceerd door een kernreactor. Vervolgens wordt het licht van de zwarte straler dat niet al de goede kant op gaat zoveel mogelijk in de juiste richting gereflecteerd. Het is ook mogelijk om licht te produceren met een laser, zodat al het licht direct de juiste richting op gaat, maar dat heeft wel als nadeel dat lasers een behoorlijk lager rendement hebben, omdat dan eerst met de kernreactor elektrische stroom gemaakt moet worden. Om de maximale snelheid te berekenen van een fotonische raket, kan gebruik gemaakt worden van de raketformule, maar dan moet wel de effectieve uitstootsnelheid geherdefinieerd worden, omdat nu geen reactiemassa wordt uitgestoten. In dit geval geldt dat de effectieve uitstootsnelheid (c) vermenigvuldigd met de corresponderende energie van de massa van de brandstof die per tijdseenheid wordt omgezet in licht (P/c^2) gelijk is aan de stuwkracht (rendementsverliezen buiten beschouwing gelaten); de corresponderende energie van de massa van de brandstof die wordt omgezet in licht is immers mc^2 . Voor kernenergie op basis van kernsplijting geldt dat naar boven afgerond 0,1% van de massa van de nucleaire brandstof wordt omgezet in energie. Stel dat de droge massa van een fotonisch ruimteschip 50000 ton is en de massa van de brandstof 450000 ton, dan zal slechts 450 ton van de brandstof omgezet worden in energie (licht). In de raketvergelijking levert dat voor de startmassa $M_0 = 500000$ ton en $M_1 = 50000 + (450000 - 450)$. Dit ingevuld in de raketvergelijking geeft: $\Delta v = c \cdot \ln(500000/499550) = \pm 270$ km/s. Met kernenergie op basis van kernfusie, wordt iets meer

brandstof omgezet in licht. Voor ${}^6\text{LiD}$ is dat circa 0,3% en voor ${}^3\text{HeD}$ is dat circa 0,38%, zodat Δv respectievelijk ± 800 km/s en ± 1000 km/s is. Nu kan nog wel enige winst geboekt worden door onderweg in stappen verbruikte brandstof af te werpen, maar zelfs als rendementsverliezen buiten beschouwing gelaten worden blijft de maximale snelheid ruim onder de 1% van lichtsnelheid voor fusiebrandstoffen zoals ${}^6\text{LiD}$ en ${}^3\text{HeD}$. Deze tegenvallende maximale snelheden komen voort uit de ongunstige verhouding tussen de stuwkracht en het vermogen van het uitgezonden licht, gegeven dat de raket dit licht zelf moet produceren. Zelfs nucleaire brandstoffen hebben dan onvoldoende energiedichtheid om tot redelijk hoge percentages van de lichtsnelheid te geraken.

Om de energiedichtheid van nucleaire brandstoffen te overtreffen resteert nog de optie om materie/antimaterie te gebruiken. Bij de annihilatie van elektronen en positronen komt gammastraling vrij. Destijds is door Eugen Sänger voorgesteld om analoog aan een fotonische raket die het licht van een zwarte straler gebruikt voor voortstuwing, gammastraling te gebruiken voor de voortstuwing. Het is alleen niet mogelijk gebleken om gammastraling te reflecteren. Indirect kan de gammastraling die vrijkomt bij de annihilatie van antimaterie wel gebruikt worden. Door gammastraling door middel van afscherming om te zetten in zichtbaar licht, zou in theorie een fotonische raket mogelijk zijn die antimaterie als brandstof gebruikt. Ook zou gammastraling gebruikt kunnen worden om een werkvloeistof of drijfgas zoals waterstof te verhitten (waterstof verdient de voorkeur omdat hiermee een relatief hoge effectieve uitstootsnelheid verkregen kan worden vanwege de lage massa van waterstofatomen), waarna het verhitte medium via een straalpijp wordt uitgestoten voor voortstuwing. Op deze wijze zou met enkele tientallen milligram elektronen/positronen al een snel reisje (mogelijk in 45 dagen) naar Mars haalbaar zijn. Eén van de voordelen van deze techniek ten opzichte van sommige nucleaire aandrijftechnieken, is dat het een behoorlijk schone techniek is zonder radioactieve afvalstoffen. Vanwege dit voordeel zou deze voortstuwingstechniek ook gebruikt kunnen worden voor raketlanceringen vanaf de aarde als alternatief voor chemische raketten. Een dergelijke raket zou veel lichter uitgevoerd kunnen worden dan een chemische raket dankzij de hoge energiedichtheid van antimaterie en de hogere effectieve uitstootsnelheid. Daarbij komt nog dat de manier waarop een antimaterieraket zijn energie vrijmaakt eenvoudig en licht uitgevoerd kan worden; de materie en antimaterie hoeft alleen maar gecontroleerd bijeengebracht te worden (de opslag van grotere hoeveelheden antimaterie is daarentegen een lastige aangelegenheid). Een thermonucleaire raket is qua werking vergelijkbaar met dit type antimaterieraket, maar in plaats van een reactie tussen positronen en elektronen, wordt de warmte dan geleverd door een kernreactor. Hoewel een thermonucleaire raket geen radioactieve uitlaatgassen hoeft te hebben, vormt de kernreactor wel een bron van radioactieve verontreiniging in het geval dat de raket tijdens de lancering door een fout ontploft of desintegreert. Een raket met enkele tientallen milligram positronen en elektronen als brandstof, zou in het geval van een ongeval weliswaar ook rampzalig verloren gaan eventueel inclusief de lanceerbasis, maar dit zou slechts beperkt blijven tot een lokale ramp, zonder schade en verontreiniging op grotere afstand.

Indien ook antiprotonen kunnen worden gebruikt in een antimaterieraket is een nog meer performante voortstuwing mogelijk. Bovendien zou als brandstof dan neutraal antiwaterstof meegenomen kunnen worden, dat vanwege het ontbreken van elektrische repulsie betere opslag mogelijkheden biedt. Een efficiënte manier om de energie van antiprotonen te gebruiken is in de vorm van een zogenaamd antimateriezeil. Zo'n zeil bestaat uit uranium-238 op een ondergrond van bijvoorbeeld koolstofvezel. Het uranium-238 wordt vervolgens in contact gebracht met antiprotonen. Hierbij ontstaan kernslijtingsproducten met hoge impuls waarvan de helft overgebracht wordt op het zeil. De effectieve uitstootsnelheid die met deze techniek bereikt kan worden ligt tegen de 5% van de lichtsnelheid <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p03/papers/foaa005.pdf>. Om nog hogere effectieve uitstootsnelheden te realiseren, zou echter de straling of restmassa van de annihilatie van

protonen/antiprotonen rechtstreeks gebruikt moeten worden voor de voortstuwing (in zogenaamde beamed core antimaterieraket). Bij de annihilatie van protonen en antiprotonen ontstaan naast neutrale pionen ook geladen pionen. Daarnaast verdwijnt energie in de vorm van gammastraling en neutrino's. Alleen de geladen pionen kunnen (voordat ze vervallen in hoog energetische straling) rechtstreeks gebruikt worden voor voortstuwing door ze met magnetische krachten af te buigen in de gewenste richting. Op deze wijze kan 22,3% van de massa van de antimaterie/materie gebruikt worden voor voortstuwing. De snelheid van de geladen pionen is 80% van de lichtsnelheid en de efficiëntie van de magnetische sproeikop wordt geschat op 85%. Daarmee zou de effectieve uitstoosnelheid uitkomen op 69% van de lichtsnelheid, zie: <https://arxiv.org/abs/1205.2281>. Een nadeel van deze propulsietechniek is dat het merendeel van de antimaterie/materie in 'rook' opgaat zonder een bijdrage aan de voortstuwing te leveren, waardoor de prestaties van een raket uitgerust met deze techniek, misschien enigszins tegenvallen. Vanwege dit fenomeen mag de raketvergelijking (ook de relativistische variant) niet gebruikt worden om Δv te berekenen voor een gegeven verhouding M_0/M_1 of visa versa. In een artikel waarin tamelijk gedetailleerd wordt ingegaan op het ontwerp van zo'n antimaterieraket (<https://pdfs.semanticscholar.org/d2ad/c77de39251b894462c98d79e68c80763a4d8.pdf>) wordt een formule gegeven waarin M_0/M_1 berekend kan worden voor een gegeven Δv en effectieve uitstoosnelheid, en het percentage van de brandstofmassa dat gebruikt kan worden voor de voortstuwing (a). In dit artikel wordt uitgegaan van een veel lagere effectieve uitstoosnelheid van één derde van de lichtsnelheid. Voor een Δv van 0,25c en $a=0,223$ wordt M_0/M_1 geschat op 5,45. Vanwege deze al tamelijk hoge verhouding bij een Δv van 0,25c, is om een rendez-vous missie met een kruissnelheid van 0,5c te realiseren, een viertrapsraket nodig, van twee acceleratiestappen van elk 0,25c en twee deceleratiestappen ook van elk 0,25c. Hierdoor wordt de startmassa van het ruimteschip erg hoog, ook al omdat iedere trap voorzien moet zijn van een reusachtige langwerpige radiator om de hitte die ontstaat door de interactie van de vrijgekomen gammastraling met materie in de omgeving, af te schermen van de rest van de raket. Met positief ingeschatte parameters zou maar liefst 40 miljoen ton antiprotonen nodig zijn + nog eens 40 miljoen ton gewone protonen. Het jet-vermogen van de eerste trap van de raket zou een duizelingwekkende waarde van 123000 TW hebben. 40 miljoen-ton antiprotonen + 40 miljoen ton protonen staat ongeveer gelijk aan 12,7 miljoen keer het huidige totale jaarlijkse wereldwijde energiegebruik; zeker het dubbele daarvan zou nodig zijn om de antimaterie daadwerkelijk te maken. Met de nieuw berekende waarde van 0,69c voor de effectieve uitstoosnelheid zou echter voor een Δv van 0,5c en $a=0,223$, M_0/M_1 6,2 zijn, zodat maar een tweetrapsraket nodig is, met één versnellingsfase tot 0,5c en één vertragingfase vanaf 0,5c. Hierdoor zou een aanzienlijke besparing in de totale massa van 1 à 2 ordes, mogelijk moeten zijn. Een nog grotere besparing aan antimaterie zou mogelijk zijn indien met een magnetisch zeil zou kunnen worden afgeremd. Nog steeds blijft dan de benodigde hoeveelheid antimaterie heel groot. Bovendien is antimaterie nu nog een onrealistische brandstof, omdat het slechts op laboratoriumschaal in pico tot nanogram hoeveelheden en op een inefficiënte wijze gemaakt kan worden. Mogelijk zou echter in de toekomst antimaterie verzameld kunnen worden in de magnetosfeer van bijvoorbeeld Jupiter. Daarnaast moet een veilige opslagtechniek voor de langere termijn nog ontwikkeld worden. Hoewel antimaterie als raketbrandstof, zeker in de bovengeschetste hoeveelheden, verre toekomstmuziek is, ligt er al vast een raketontwerp op de tekentafel voor een interstellaire rendez-vous missie met een kruissnelheid van 50% van de lichtsnelheid.

De tot nu toe behandelde propulsietechnieken hebben allemaal last van wat wel de tirannie van de raketvergelijking wordt genoemd. Dat wil zeggen dat de noodzaak om reactiemassa/brandstof mee te nemen de prestaties van de raket sterk limiteert, vooral als hoge (relativistische) snelheden en het afleggen van (lichtjaren) lange rendez-vous missies, gewenst zijn. Er zijn enkele technieken die

kunnen ontsnappen aan deze tirannie. Dat kan omdat ze de energie voor de voortstuwing oogsten uit het interstellair medium of omdat de energie voor de voortstuwing vanuit een locatie die buiten de raket ligt bijvoorbeeld als elektromagnetische straling gestuurd wordt naar de raket. De eerste techniek wordt gebruikt in het concept van een Bussard ramjet (ook wel een Bussard collector genoemd). Een Bussard collector buigt geïoniseerd waterstof in de interstellair ruimte af en comprimeert het, met een reusachtige trechter die bestaat uit een supergeleidende ring of ringen die de daartoe vereiste magnetische krachten leveren. Dit waterstof wordt zo sterk gecomprimeerd dat een proton-proton reactie op gang komt, waarbij de protonen worden gefuseerd tot helium. Met het uitstoten van het verhitte plasma wordt vervolgens een stuwkracht geleverd. Een Bussard ramjet kan alleen werken als de protonen al een zekere naderingssnelheid (V_n) hebben ten opzichte van de collector. In de interstellair ruimte betekent dat, dat de collector zelf al een flinke snelheid moet hebben die het op een andere manier verkregen moet hebben. Een andere voorwaarde is dat de stuwkracht groter moet zijn dan de wrijvingskracht bij de minimale naderingssnelheid die nodig is voor het op gang brengen van de fusiereactie. De wrijvingskracht en de stuwkracht nemen vervolgens bij toenemende snelheid toe maar het verschil tussen de krachten blijft gelijk, zodat het ruimteschip eenparig versnelt in principe tot relativistische snelheden. Eén van de problemen waar een Bussard collector mee te maken heeft, is dat tijdens de compressie van de protonen tot dichtheden waarbij proton-proton fusie kan optreden, bremsstrahlung ontstaat die het plasma juist afkoelt. De reactiesnelheid van de normale P-P fusiereactie is te laag om hier voor te compenseren. Een proton-proton fusiereactie via de CNO cyclus zou echter wel voldoende snelheid hebben om vermogen te produceren via een P-P fusiereactie (maar hoe zou een CNO gekatalyseerde fusie uitgevoerd kunnen worden als het plasma beweegt t.o.v. de collector?). De fusiereactie komt op gang bij een minimale aanvoer van een massa protonen per eenheid van tijd (dm/dt). De relatie tussen dm/dt en de naderingssnelheid van de protonen (V_n) luidt: $dm/dt = V_n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho$, waarin r de straal van de trechter is, en ρ de dichtheid van de protonen in het interstellair medium. Het is niet precies bekend hoe groot dm/dt moet zijn, maar vaak wordt een waarde van 1 gram/seconde gegeven. De dichtheid waterstof in de interstellair ruimte is ongeveer $1,67 \cdot 10^{-21}$ kg/m³ (1 atoom per cm³), in de lokale bubbel rond ons zonnestelsel zou de waterstofdichtheid zelfs nog lager zijn. Met de huidige beschikbare technieken is het al lastig genoeg om een groot ruimteschip een snelheid van 200 km/s te geven in de interstellair ruimte rond het zonnestelsel. Bij deze snelheid zou de Bussard collector al een straal van minimaal 1000 km moeten hebben (op basis van de zojuist gegeven waarden), om de fusiereactie op gang te brengen. Mogelijk zou een Bussard ramjet kunnen profiteren van de sterke zonnewind en hogere waterstofdichtheden in de binnenste regionen van het zonnestelsel; de zonnewind heeft daar ongeveer een waarde van 500 km/s. Als de collector vanaf bijvoorbeeld de baan van Jupiter een scheervlucht zou maken langs de zon, zou het met een trechterstraal van 250 km ongeveer 1% van de lichtsnelheid kunnen opbouwen, dat zou dan net voldoende zijn om de fusiereactie op gang te houden in de interstellair ruimte met lage waterstofdichtheid, om te kunnen doorversnellen. De versnelling (a) waarmee een Bussard ramjet kan reizen wordt (volgens <http://www.dangermouse.net/gurps/science/ramjet.html>) gegeven door: $a = \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot \eta \cdot c^2 / M$, waarin r de trechterstraal, ρ de waterstofdichtheid in de interstellair ruimte, η de efficiëntie van de fusiereactie (=energie van 1 kg fusiebrandstof / $1 \text{ kg} \cdot c^2$), c de lichtsnelheid en M de massa van het ruimteschip. Bijvoorbeeld met $\rho = 5 \cdot 10^{-22}$ kg/m³ (0,3 atoom per cm³ zoals geschat voor de lokale wolk), $\eta = 0,007$, $r = 1600$ km en $M = 2000$ ton (waarvan ongeveer de helft de massa van de collector is), komt er uit op $1,27 \text{ m/s}^2$. Liever zou je een versnelling van 1g (direct gevolgd door een vertraging van 1g halverwege de rendez-vous trip) hebben, want dan heeft de bemanning direct al de juiste kunstmatige zwaartekracht. Maar dan kan de massa van de raket maar 270 ton zijn wat te weinig lijkt voor een trechterstraal van 1600 km, en voorzieningen die genomen moeten worden voor een bemanning. De tijd die tijdens een ruimtereis over een afstand S verstrijkt (met versnellen tot $0,5 S$

en vertragen vanaf 0,5 S), op de klok van de bemanning, kan berekend worden met de volgende formule: $t = (2c/a) \cdot \cosh^{-1}(1 + (a \cdot S)/(2c^2))$. Voor $S=300$ lichtjaar en $a=1,27 \text{ m/s}^2$ komt t uit op 56 jaar, wat nog net zou kunnen binnen het leven van een astronaut. De veragingsfase zou overigens eerder trager en onregelmatiger verlopen dan de versnellingsfase. Bovendien is de versnelling aan de lage kant voor de bemanning om 56 jaar lang aan bloot te staan. Een voorziening voor kunstmatige zwaartekracht zou de massa van het ruimteschip minimaal met ongeveer een factor 10 verhogen, hierdoor zou de interstellaire reis met het ruimteschip ruim twee eeuwen langer duren. Een ander mogelijk probleem van een Bussard-ramjet is oververhitting. Gedurende de tijd dat de ramjet een versnelling ondergaat, wordt namelijk het vermogen dat de kernfusie levert, steeds groter (door de steeds hogere aanvoersnelheid van waterstof). De vraag is of de restwarmte van de kernfusiereactie wel voldoende snel kan worden afgevoerd juist als de snelheid interessante relativistische waardes begint te krijgen. Ook zou de collector beschadigd kunnen worden door stofdeeltjes, dit ook juist als de snelheid hoog wordt. Zo'n collector met een groot oppervlak van een supergeleidende ring die alleen beschermd is met een coating is meer kwetsbaar dan een gepantserde raketkop. Ook blijft het de vraag of de stuwkracht van een ramjet de wrijvingskracht die ontstaat tussen de protonen en de collector wel kan overtreffen, om überhaupt op te kunnen starten. Berekeningen aan de wrijvingskrachten die in de collector ontstaan, vormden de inspiratie voor het concept van een magnetisch zeil om een raket juist mee af te remmen. Een Bussard ramjet is al met al voorlopig alleen nog maar een theoretisch concept, dat omgeven is met meerdere vraagtekens en uitvoeringsproblemen.

Een tweede manier om te ontkomen aan de tirannie van de raketvergelijking, is het verzenden van straling (of eventueel massa met een hoge impuls) vanuit een locatie los van raket naar de raket. Dit kan o.a. licht van een laser zijn of microgolfstraling van een maser of zonlicht of licht van een andere ster. Voor interstellaire toepassingen gaat de voorkeur uit naar lasers omdat de bundelverspreiding met toenemende afstand kleiner is voor lasers dan voor masers. De lasers (of masers) kunnen opgesteld zijn op de aarde, of beter nog in een baan om de aarde of om een ander hemellichaam, of op een andere planeet of maan. Een elektriciteitscentrale levert de energie voor de laser, en die energie wordt verzonden naar de raket als een bundel elektromagnetische straling. Daar kan de energie rechtstreeks gebruikt worden door de laser te weerkaatsen tegen een lichtzeil (ook wel een reflector genoemd) en de impulsverandering die daar het gevolg van is te gebruiken als stuwkracht, of indirect door er in de raket stroom mee op te wekken of een werkvloeistof mee te verhitten. De eerste methode lijkt het meest veelbelovend voor interstellaire reizen omdat hiervoor helemaal geen reactiemassa hoeft te worden meegenomen of hoeft te worden verzameld. De voortstuwingsstechniek waarmee met een laser een werkvloeistof wordt verhit zou daarentegen een alternatieve methode kunnen zijn om een raket te lanceren vanaf de aarde. De relatie tussen de stuwkracht en het vermogen van de verzonden lichtbundel, is in het geval dat de bundel wordt gereflecteerd vergelijkbaar met de relatie die al gegeven is voor een fotonische raket die het licht voor zijn voortstuwings zelf produceert, maar nu is de impulsverandering twee keer zo groot vanwege de weerkaatsing. Dus: $F = (2 \cdot P \cdot \eta) / c$, waarin η een rendementsfactor is om vermogensverliezen van de laserbundel te verrekenen (deze formule geldt overigens alleen voor een niet relativistisch lichtzeil, tot ca. 20% van de lichtsnelheid levert deze formule uitkomsten die goed genoeg zijn voor een globale schatting). De efficiëntie van deze voortstuwingsmethode is met 6,7 Newton per gigawatt vermogen aan laserlicht, erg laag. Maar het voordeel is nu dat het vermogen niet door de raket zelf hoeft te worden geleverd. De overdracht van energie van de bundel aan het lichtzeil gaat gepaard met een roodverschuiving van de gereflecteerde bundel. Bij hogere snelheden wordt deze roodverschuiving sterker en neemt de efficiëntie van de laser-voortstuwings toe. Vanwege dit fenomeen is laservoortstuwings met een enkele niet hergebruikte bundel, vooral interessant voor

snelle ruimtevaart met relativistische snelheden en minder voor bijvoorbeeld langzame ruimtevaart in de vorm van vrachtvervoer binnen het zonnestelsel. Indien het ruimteschip een massa heeft van 20000 ton, is met deze techniek circa 2.10^{23} Joule aan energie nodig om het te versnellen tot 20% van de lichtsnelheid, met $\eta=90\%$. (voor een relativistische correctie zie

[http://www.deepspace.ucsb.edu/wp-](http://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2016/10/Kulkarni_etal_2016_SPIE_RelativisticSolutionsToDirectedEnergy.pdf)

[content/uploads/2016/10/Kulkarni_etal_2016_SPIE_RelativisticSolutionsToDirectedEnergy.pdf](http://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2016/10/Kulkarni_etal_2016_SPIE_RelativisticSolutionsToDirectedEnergy.pdf)) Dat is ongeveer 350 keer zo veel als het huidige totale jaarlijkse wereldwijde energiegebruik. Dat is energie die we nu goed zouden kunnen gebruiken voor huishoudelijk gebruik op de aarde. Pas als elektriciteitscentrales beschikbaar komen (buiten de aarde) die dit soort energieën makkelijk in een paar maanden tijd met behulp van zonlicht kunnen opwekken, zou dit soort ruimtevaart een optie worden. Kernfusie met bijvoorbeeld helium-3 en deuterium zou men hier liever niet voor gebruiken omdat dit vrij zeldzame isotopen zijn, die beter gebruikt kunnen worden voor minder energie-intensieve taken, of voor taken waarbij zonlicht niet gebruikt kan worden. De lading van het ruimteschip zal ongeveer minimaal 10000 ton bedragen; een belangrijk deel van deze 10000 ton is nodig voor een centrifuge die kunstmatige zwaartekracht levert (die na de versnellingsfase geactiveerd kan worden) en een bescherming voor de bemanning tegen kosmische straling. Als de remvoorziening een magnetisch zeil is, dan zal de massa hiervan ongeveer 5000 ton kunnen zijn met een straal van circa 5500 km zodat de remtijd ongeveer 9 jaar is vanaf een snelheid van $0,2c$ (zie eerder gegeven link over magnetische zeilen voor de achterliggende berekening). Het magnetische zeil zou bij voorkeur uitvouwbaar (of uitklapbaar) moeten zijn op het moment dat het remmen moet beginnen. Aangezien de totale massa op 20000 ton gesteld was, blijft er 5000 ton over voor het lichtzeil inclusief structuur.

Omdat sprake is van een bemande raket is de gewenste versnelling van het laser-voortgedreven ruimteschip ongeveer tussen de $0,1$ en $1 g$. Een lagere versnelling zou onpraktisch zijn voor de bemanning en limiteert de mogelijkheden om hoge relativistische snelheden te halen, een hogere versnelling zou onaangenaam zijn voor de bemanning. Met een versnelling tussen $0,1$ en $1 g$, een ruimteschip van 20000 ton en $\eta=90\%$, moet 3250 tot 32500 TW aan laser vermogen geleverd worden. Om een indruk te geven hoe hoog dit vermogen is, zou je kunnen zeggen dat een laser van 3250 TW gevoed moet worden met al het zonlicht dat op de Maan instraalt indien dit licht met een rendement van 25% zou kunnen worden omgezet in die ene laserbundel. Je zou 3250 TW ook kunnen afzetten tegen 18 TW, wat het huidige gemiddelde vermogen is van alle machines op aarde gecombineerd. Verder zal een tamelijk groot lichtzeil nodig zijn, want naarmate de afstand tussen het laserstation en het ruimteschip toeneemt zal de laser zich enigszins verspreiden loodrecht op de bewegingsrichting van de bundel. Als de bundelverspreiding groter wordt dan de doorsnede van het lichtzeil zal de efficiëntie van de voortstuwing snel afnemen. Om de massa van een groot lichtzeil beperkt te houden, moet het reflecterende materiaal dun zijn zodat de massa per vierkante meter laag is, en het moet bestand zijn tegen de zeer hoge laser vermogens die per oppervlakte-eenheid op het zeil afgeleverd worden. Dat laatste betekent in het algemeen dat een heel hoog percentage van het laserlicht gereflecteerd moet worden, ten opzichte van slechts een minuscuul percentage dat geabsorbeerd mag worden. Het kleine beetje dat wel geabsorbeerd wordt leidt tot een temperatuurstijging waartegen het materiaal bestand moet zijn. Robert Forward, die beschouwd kan worden als een pionier in de ontwikkeling van de theorie van met licht voortgedreven ruimteschepen, stelde destijds voor, 16 of 20 nanometer dik aluminium te gebruiken; later zijn diëlektrische materialen voorgesteld om het laserlicht te reflecteren, zoals Al_2O_3 (saffier), ZrO_2 (zirkonia) en halfgeleiders zoals diamant, silicium en siliciumcarbide die in het algemeen hogere laser vermogens per oppervlakte-eenheid verdragen (afhankelijk van de golflengte of het golflengtegebied indien vanwege hoge snelheden sprake is van roodverschuiving)

http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/4Landis.pdf . Met MNT zouden misschien zeer dunne reflecterende zeilen op basis van grafeen mogelijk zijn met een dikte van slechts 1 nm. Nu al beschikbaar is een dunne film rol-reflector die bestaat uit 15 laagjes Ag-SiO₂-TiO₂ , met een totale dikte van 10000 nm (en een dichtheid van circa 10 ton per km²), die een reflectiviteit geeft van 99,995% bij 1060 nm laserlicht. Voor de laservoortstuwing kan het best een phased array gebruikt worden, want dan is niet één super krachtige laser nodig. In plaats daarvan wordt een bron-laser van bescheiden sterkte gesplitst in aparte laserstralen, die ieder met ook weer een bescheiden vermogen versterkt worden. De daartoe te gebruiken versterkers kunnen in principe vrijwel onbeperkt (zolang de voorraad strekt) modulair toegevoegd worden zodat de phased array gigantische afmetingen kan krijgen, en daarmee ook een gigantisch totaal vermogen. De individuele laserstralen worden met dunne laag optiek bijgesteld, waardoor op dikte, gewicht, en kosten bespaard wordt vergeleken met traditionele optiek. Bovendien kan de laserbundel dan gestuurd worden op een niet mechanische manier. De technologische ontwikkeling van phased arrays gaat erg snel en daarmee wordt het behalen van hoge output vermogens steeds realistischer, hoewel het natuurlijk nog wel een ander verhaal is om dit soort lasers op te schalen tot Petawatt vermogens en ze te bouwen in de ruimte, gevoed met enorme hoeveelheden zonne-energie. Wat inmiddels wel op de tekentafel begint te komen is een phased array die ook al wel DE STAR-4 wordt genoemd (Directed Energy System for Targetting of Asteroids or exploRation) met een vermogen van circa 100 Gigawatt. De toevoeging 4 slaat op afmetingen van de phased array: 10⁴ x 10⁴ meter). Hoewel vooral bedoeld voor het onschadelijk maken van gevaarlijke planetoïden, zou zo'n phased array ook al een sonde van 100 kg een fly-by tripje naar Mars kunnen laten maken in drie dagen. Het is met zo'n DE STAR 4 phased array mogelijk om het 100 GW laser Vermogen te focussen op een lichtzeil met een diameter van 30 meter op een afstand van 1 AU (149,6 miljoen km); ontfofocussen in het geval het lichtzeil dichter bij de phased array staat is ook mogelijk. Voor wat meer achtergrond informatie over phased arrays voor laservoortstuwing zie: <https://www.nextbigfuture.com/2016/06/history-and-future-of-laser-pushed.html>. Een andere technologische uitdaging bij laser-voortgestuwde ruimtevaart is het goed in het midden van de reflector houden van de laserbundel over zeer grote afstanden; een correctiemechanisme waarmee de reflector zelf het midden van de bundel opzoekt zou uitkomst kunnen bieden. Ook het stabiel houden van de reflector als deze beschenen wordt door de laser zou een probleem kunnen zijn. Een plat zeil dat niet wordt gestabiliseerd door de lading zou bij minuscule verstoringen al makkelijk kunnen gaan spinnen of tuimelen; hier zou aanpassing van de vorm van het lichtzeil een oplossingsrichting kunnen zijn.

Dan resteert nog de vraag welke snelheden gehaald kunnen worden met laser-voortstuwing voor kleine sondes en bemande ruimteschepen. Dit wordt inzichtelijk als de eindsnelheid (v_0) wordt afgeleid uit $\frac{1}{2}mv_0^2 = F \cdot L_0$ waarin m de massa van het ruimteschip, F de laser stuwkracht en L_0 de afstand die wordt afgelegd totdat de bundelverspreiding van de laser even groot is als de dwarsdoorsnede van de reflector. Deze relatie geldt niet voor relativistische snelheden, maar bij snelheden onder $0,2c$ is de fout aanvaardbaar voor een globale schatting. Voor L_0 geldt: $L_0 = \frac{d \cdot D}{2 \cdot \lambda}$ waarin d de apertuur van de phased array, λ de golflengte van de laser en de D de zijde van een vierkant lichtzeil, zodat $V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot \eta \cdot d \cdot D}{c \cdot \lambda \cdot (M + \rho \cdot D^2)}}$ waarin M de massa van de lading (inclusief magnetisch zeil), ρ de massa per m² lichtzeil, P het laser vermogen, η een rendementsfactor en c de lichtsnelheid. Uit deze formule volgt o.a. dat hoge snelheden makkelijker bereikt kunnen worden als de phased array van een De STAR-4 opgeschaald wordt naar een DE STAR-5, die 100 bij 100 km groot is. Deze opschaling zorgt voor een vertienvoudiging van de apertuur, en een verhonderdvoudiging van het vermogen (tot 10 TW) bij gelijkblijvende samenstellende versterkers. Enigszins tegen intuïtief volgt uit bovenstaande formule ook dat bij verder gelijk blijvende massa van de lading en andere parameters de snelheid V_0 het hoogst is als de massa van de het lichtzeil even groot is als de massa

van de lading. Een lichtzeil dat groter is gemaakt zodat het een zelfde massa heeft als de lading, heeft wel tot gevolg dat de versnelling daalt en de laser (bij gelijk blijvend vermogen) daardoor langer moet aanstaan voor een zelfde snelheidsverandering. Aangezien de laser toch op zonne-energie draait, maakt het echter niet zoveel uit om deze langer te laten aanstaan, zolang de baan van het laserstation dat tenminste toelaat. Als de laser toch onbeperkt of bijvoorbeeld een paar jaar lang aan kan blijven staan, kan het ruimteschip ook voorbij de afstand L_0 blijven versnellen. Voorbij L_0 neemt de versnelling van het ruimteschip wel af, omdat er bij een toenemende afstand voorbij L_0 een steeds hoger percentage van het laserlicht langs de reflector lekt. Toch leidt dit nog wel tot een aardige snelheidstoename volgens de volgende formule (voor niet relativistische snelheden) : $V(L) = V_0 \cdot (2 - L_0/L)^{1/2}$ (waarin L het totale versnellingstraject). Hieruit volgt dat de snelheid nog met maximaal een factor $\sqrt{2}$ hoger kan worden. Bij een gegeven phased array met een zeker vermogen, apertuur en golflengte en een gegeven massa van de lading en het lichtzeil, is alleen de grootte van het lichtzeil nog een factor die bepalend is voor de snelheid die gehaald kan worden. Daarbij gaat het om de dichtheid ρ ofwel de massa per m^2 lichtzeil. Een lagere ρ maakt een groter lichtzeil mogelijk bij een gelijk blijvende massa. En een groter (maar even zwaar) lichtzeil geeft een grotere L_0 afstand, en daarmee een langere optimale versnelling. Er moet nog nader onderzoek gedaan worden met welke materialen een lage dichtheid en hoge reflectiviteit gecombineerd kan worden bij hoge laser vermogens. Een materiaal dat wel eens is voorgesteld is saffier. Een 57 nm dik laagje van saffier geeft een reflectordichtheid van 227 kg/km^2 (exclusief structuur). Het reflecteert daarbij 26% van 400nm licht, de rest van het licht wordt echter doorgelaten, maar het zou wel moeiteloos enorme vermogens laserlicht kunnen weerstaan vanwege de lage absorptie. Grafeen is ook wel voorgesteld als materiaal om een lichtzeil van te maken, ondanks dat grafeen weinig tot geen reflectiviteit heeft. Grafeen zou echter wel redelijk licht kunnen absorberen (afhankelijk van de golflengte). Omdat grafeen bestand is tegen hoge temperaturen van 3000 K of meer en daarnaast heel efficiënt de geabsorbeerde energie van het laserlicht kan uitstralen, is het toch in staat hoge vermogens aan laserlicht te weerstaan. Een lichtzeil van een multilaag van grafeen zou daarmee een dichtheid (ρ) hebben ongeveer 50 kg/km^2 (inclusief structuur) en een rendement (η) van circa 0,36 (<https://arxiv.org/pdf/1506.09214.pdf>). Indien grafeen vanwege zijn lage reflectiviteit toch niet geschikt blijkt als materiaal voor laser-lichtzeilen zou het via MNT wel verwerkt kunnen worden in een geoptimaliseerd reflectormateriaal voor mechanische sterkte. Voor een DE STAR 4 phased array ($P=1 \text{ TW}$, $\lambda=1060 \text{ nm}$, $d=10 \text{ km}$) en een sonde met een lading van 2 ton en een lichtzeil van eveneens 2 ton, een reflectordichtheid van 1000 kg/km^2 (en daarmee een reflectorzijde van 1414 m) en tenslotte een rendement van 90% zou je uitkomen op $V_0 = 0,015c$ over een afstand van 45 AU in 34,5 dagen en na doorversnellen voorbij L_0 op $V=0,021c$. Toepassing van een multilaag van grafeen met een dichtheid van 50 kg/km^2 en een corresponderende reflectorzijde van 6325 m en een rendement van 36% bij verder gelijke parameters, geeft een lichte verhoging van de maximale snelheid met $V_0=0,02c$ over een afstand van 199 AU in 115 dagen. Na doorversnellen voorbij L_0 komt de snelheid uit op $V=0,028c$. De winst die geboekt wordt met de lage dichtheid van het lichtzeil wordt voor een groot deel teniet gedaan door het lage rendement.

Om relativistische snelheden te berekenen voor laser voortgestuwde ruimtevaartuigen moet rekening gehouden met drie fenomenen die dan relevant beginnen te worden. Dat zijn tijddilatatie, toename van de Doppler roodverschuiving bij reflecties die optreden bij hogere snelheden en afname van de fotonflux bij hogere snelheden. Indien aangenomen wordt dat het lichtzeil perfect reflecterend is, geldt de volgende relatie tussen de tijd (t) dat het lichtzeil beschoren is door de laser en de snelheid (β) die het lichtzeil daarbij heeft gekregen: $t = mc^2/6P \cdot ((1+\beta) \cdot (2-\beta) \cdot \gamma / (1-\beta) - 2)$ waarin γ de Lorentzfactor is ($1/(1-\beta^2)^{0,5}$) en $\beta=v/c$ ontleend aan:

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aaafd2/meta#ajaaafd2s5> . Met deze formule

kan via numerieke integratie de verplaatsing van het ruimteschip tot een afstand L achterhaald worden. Zodra L gelijk is aan L_0 is de snelheid V_0 bekend. Voorbij L_0 kan de snelheidstoename berekend worden door te corrigeren voor het afnemende vermogen. Dit vermogen neemt dan af met $(L_0/L)^2$. Aangenomen wordt dat een lichtzeil niet langer dan 5 jaar door de laser belicht blijft. De snelheid die dan bereikt wordt, wordt V_{\max} genoemd. In de volgende voorbeelden van laser voortgestuwde sondes en ruimteschepen, kan het laserstation 0,94 tot 2,73 jaar eerder uitgezet worden dan de gekozen maximale duur van 5 jaar dat het lichtzeil beschreven wordt. Aangenomen wordt verder dat de phased array telkens een DE STAR 5 is met een golflengte van 1060 nm en een apertuur van 100 km. Verder is het rendement van de laser-voortstuwing gesteld op 100%, omdat uitgegaan is van perfecte fotonreflecties. Voor de dichtheid van de lichtzeilen wordt 1000 kg per km^2 , genomen (inclusief structuur). In het geval van de 4 ton zware onbemande sonde met een lading van 2 ton geeft dat een lichtzeil met een zijde van 1414 meter. Indien nu voor de onbemande sonde het laser vermogen 10 TW is, zijn V_0 en V_{\max} resp. 0,14c en 0,19c waarbij L_0 (446 AU) bereikt wordt in 34,5 dagen. Bij 100 TW zijn V_0 en V_{\max} resp. 0,36c en 0,46c waarbij L_0 bereikt wordt in 12 dagen. Voor het bemande ruimteschip met een massa van 20000 ton, een lading van 15000 ton en een laser vermogen van 3250 TW (en wederom een rendement van 100% en $\rho=1000 \text{ kg/km}^2$ en een corresponderende lichtzeilzijde van 70711 m) bedraagt V_0 0,24c over een afstand 0,35 lichtjaar in 998 dagen en loopt V_{\max} op tot 0,31c. Verhoging van het laser vermogen tot 15000 TW geeft een V_0 van 0,42c over een L_0 van 0,35 lichtjaar in 517 dagen en een V_{\max} van 0,5c. Een vermogen van 32500 TW, geeft een V_0 van 0,53c in 384 dagen en een V_{\max} van 0,62c. Een lagere lichtzeildichtheid en een langere tijd dat de het lichtzeil door de laser beschreven wordt (of een nog hoger vermogen indien de versnelling groter mag worden) geven nog hogere snelheden. Een verhoging van de totale massa van een ruimteschip met een factor x vereist een verhoging van het laser vermogen met ook een factor x om op de zelfde snelheid uit te komen (bij verder gelijk blijvende parameters). Indien bij een verhoging van de massa van het ruimteschip een evenredig deel daarvan in de vergroting van het lichtzeil gaat zitten, hoeft het vermogen minder sterk te worden opgevoerd om op een zelfde V_0 uit te komen, zolang V_0 bereikt wordt binnen de tijd dat het lichtzeil beschreven wordt. Bijvoorbeeld een verhoging van de totale massa met een factor 4 geeft een verdubbeling van de straal van het lichtzeil, zodat ook maar een verdubbeling van het vermogen nodig is om op de zelfde V_0 uit te komen. Tenslotte in het geval van het bemande ruimteschip, loont het misschien om gebruik te maken van een DE STAR 6 (1000x1000 km). Een vermogen van 6100 TW is dan al genoeg om een V_{\max} van 0,5c te halen, zodat het vermogen van de versterkers maar met ruim een factor 6 hoeft te worden verhoogd t.o.v. van het oorspronkelijke DE STAR 4 ontwerp.

Het is niet zo dat het vermogen van een phased array gevoed met zonlicht vrijwel onbeperkt kan worden opgevoerd om daarmee ook extreem massieve ruimteschepen te versnellen tot 0,5c. Zo zal er een limiet zitten aan het maximale vermogen dat per vierkante meter lichtzeil weerstaan kan worden (in de orde van circa 10 MW) en de grootte van het lichtzeil. Hoe groter het lichtzeil hoe hoger de moeilijkheidsgraad van de constructie en hoe lastiger de besturing wordt. Bovendien geldt dat hoe groter een lichtzeil wordt hoe groter de kwetsbaarheid is voor beschadiging door allerlei ruimtepuin. Ook kan het vermogen van een phased array niet onbeperkt worden opgevoerd ook al is deze modulair opgebouwd. Het verhogen van het vermogen van de samenstellende versterkers kan leiden tot koelingsproblemen. Het vergroten van het oppervlak van de phased array kan leiden tot stabiliteitsproblemen van de phased array als deze in een baan om zon is geplaatst. Ook kan er tekort ontstaan aan grondstoffen voor de benodigde elektronica, bijvoorbeeld indien daarvoor zeldzame aarden nodig zijn. Het is lastig om aan te geven waar de limiet ligt, maar vermoedelijk zal de massa van een laser-voortgestuwd ruimteschip dat snelheden kan halen tussen 0,25 en 0,5c nog wel een orde hoger kunnen zijn, dan het voorbeeld van een ruimteschip met een massa van 20000 ton.

Afgezien van de ongunstige verhouding tussen stuwkracht en laservermogen, is een nadeel van laser-voortgedreven ruimteschepen dat het afremmen lastig is. Er kan afgeremd worden met een magnetisch zeil, maar voor een bemand ruimtevaartuig met grote massa en relativistische snelheden, zal ook het magnetische zeil veel massa hebben. Voor $0,2c$ zal de massa van het magnetische zeil circa één derde van de massa van de lading zijn (indien de reflector na de versnellingsfase is afgeworpen) en bij hogere snelheden wordt dit percentage nog hoger voor een remsnelheid van toch al circa 9 jaar; een kortere remsnelheid schroeft dit percentage nog verder op. Het inzetten van zo'n groot magnetisch zeil zal moeilijk uitvoerbaar zijn en zo'n zeil zou tamelijk kwetsbaar kunnen zijn zeker bij relativistische snelheden. Een magnetisch zeil werkt bovendien niet zo goed als de dichtheid van interstellair waterstof laag is. Uitgerekend in de lokale bubbel is sprake van een relatief lage dichtheid van waterstof. Er zou ook afgeremd kunnen worden met een laserbundel verstuurd vanuit het zonnestelsel die weerkaatst wordt door een losgelaten lichtzeil voor het ruimteschip uit, lichtjaren ver van het zonnestelsel verwijderd, om vervolgens het ruimteschip via een secundair lichtzeil af te remmen, zoals destijds voorgesteld door Forward. In dit plan werd gebruik gemaakt van een Fresnel-lens met een diameter van 1000 km geïmplementeerd ergens tussen de baan van Saturnus en Uranus in. Deze lens zou dan met een precisie van minder dan 10 meter nauwkeurig geïmplementeerd moeten zijn. Dit is een veeleisende en ingewikkelde operatie die bovendien alleen toepasbaar is in de lokale interstellaire ruimte tot enkele tientallen lichtjaren rond de zon. Een ander bezwaar tegen laser-voortgedreven ruimtevaart zou het gevaar van extreem sterke lasers kunnen zijn. Lasers met een vermogen van tientallen tot duizenden terawatts zouden als een wapen misbruikt kunnen worden. Ook zouden (onbedoelde) reflecties van de lasers gevaarlijk kunnen zijn. De reflectoren van laser-voortgedreven ruimteschepen zouden doelbewust divergerend gemaakt kunnen worden. Hierdoor neemt het vermogen van het gereflecteerde licht per oppervlak bij toenemende afstand van het ruimteschip snel af, waardoor de reflecties voor de aarde of het laser station ongevaarlijk zijn, tenminste als het ruimteschip pas op een flinke afstand (bijvoorbeeld een miljoen km) van de aarde en het laserstation, wordt versneld. Door daarnaast extreem sterke lasers voor ruimtevaart alleen op de achterkant van de Maan te plaatsen of in het L2 aarde-zon Lagrange punt (het verst van de zon), zouden de grootste gevaren voor de aarde weggenomen zijn.

Bemande laser-voortgedreven interstellaire missies zijn nu nog niet realistisch, maar dat geldt wel voor onbemande missies met sondes die een lage massa hebben, hoewel die ook al een grote uitdaging zijn om uit te voeren. Een fly-by missie naar Proxima Centauri met snelheden tussen de 15 en 20% van de lichtsnelheid, zou binnen 26 jaar foto's en andere data kunnen opleveren van Proxima Centauri-b, een planeet die in de juiste temperatuurzone ligt om vloeibaar water aan het oppervlak te hebben. Dit is precies wat beoogd wordt met het Breakthrough Startshot project. Een 100 GW phased array laser, hoog in de Californische bergen, versnelt één voor één circa 1000 kleine lichtzeilen (4 bij 4 meter) met elk een massa van slechts enkele grammen, die al in een baan om de aarde zijn gebracht. In 10 minuten worden de lichtzeilen versneld tot 20% van de lichtsnelheid of iets korter tot 15 % van de lichtsnelheid, met een versnelling van 10000g. Microscopische elektronica bestand tegen de extreme omstandigheden tijdens de reis, leveren de gewenste data en zorgen voor transmissie naar de aarde. Het grote aantal lichtzeilen is nodig omdat te verwachten valt dat er vele onderweg zullen stranden, of net niet de gewenste foto's maken. Er bestaan ook plannen voor een laser voortgedreven rendez-vous missie naar Alpha Centauri met een grotere sonde met een totale massa van ongeveer vier ton. Het afremmen gebeurt met een magnetisch zeil, en de maximale snelheid zou iets van 5% van de lichtsnelheid zijn en de reistijd ruim 80 jaar. Dit project staat bekend onder de naam Dragonfly, zie <https://www.youtube.com/watch?v=598UtgxFd1E&t=160s>. Bij dit project wordt uitgegaan van een laser met een vermogen van 100 GW en een lichtzeil dat bestaat uit een monolaag van grafeen. De optische eigenschappen van deze monolaag van grafeen moeten wel

erg gunstig zijn om met 100 GW 5% van de lichtsnelheid te halen voor een totale massa van 4 ton. Een andere ontwikkeling in de laser-voortgedreven ruimtevaart is de eerder genoemde photonic laser thruster, waarmee de invallende laser bundel wordt hergebruikt om de verhouding tussen stuwkracht en laservermogen sterk te verbeteren https://wiki2.org/en/Photonic_laser_thruster.

In plaats van lasers zou je ook gewoon zonlicht kunnen gebruiken om een lichtzeil voort te stuw. Er zijn voor zonnezeilen een paar verschillen ten opzichte van lichtzeilen voor lasers. Zonnezeilen vangen een breed spectrum aan straling op terwijl lichtzeilen voor lasers vooral monochromatisch licht opvangen. Voor zonnezeilen is het minder cruciaal dat zo min mogelijk licht geabsorbeerd wordt, omdat ze beschadigd worden met veel lagere vermogens. Een zonnezeil dat beter absorbeert dan reflecteert zou ook nog wel goed kunnen werken (hoewel dit voor een materiaal als grafeen ook nog wel zou kunnen gelden voor laser voortgedreven zeilen) als de massa per oppervlakte-eenheid laag gehouden kan worden. Voor zonnezeilen die veel snelheid moeten krijgen, loont het om ze dicht bij de zon te lanceren omdat het stralingsvermogen per oppervlakte-eenheid dicht bij de zon veel groter is. De stralingskracht van de zon zoals die wordt uitgeoefend op het lichtzeil is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de zon, de zwaartekracht van de zon die daar tegenin werkt, is ook omgekeerd evenredig met het kwadraat van die afstand. De verhouding tussen deze krachten is daarom een constante, die ook wel de lichtheidsfactor wordt genoemd. De lichtheidsfactor moet sowieso groter dan 0,5 zijn voor een zonnezeil om te kunnen ontsnappen aan de zwaartekracht van de zon. Terwijl de versnelling van laser voortgestuwde lichtzeilen min of meer constant is (in het niet relativistische geval), is de versnelling van een zonnezeil dat dus niet (want omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de zon). Voor zonnezeilen loont het om het oppervlak te vergroten om zo meer stuwkracht te verkrijgen. Indien een zonnezeil een lading met zich meevoert leidt een vergroting van het zeiloppervlak bovendien tot een lagere waarde van σ en daarmee tot een hogere maximale snelheid. De massa van een lichtzeil voor een laser kan daarentegen beter niet groter gemaakt worden dan massa van de lading. Net zoals een gewoon zeilschip niet alleen voor de wind kan zeilen, kan een reflecterend zonnezeil overigens ook in andere richtingen bewegen dan de richting van de zon af, door de stand van het zeil aan te passen. Door de baansnelheid af te remmen kan een (reflecterend) zonnezeil ook in een kleinere baan dicht bij de zon terecht komen.

De maximale snelheid van een zonnezeil (via een parabolische baan gelanceerd) kan geschat worden met de volgende formule : $v_{\max} \approx 1167 \cdot ((A+2R)/(\sigma \cdot D_{\text{au}}))^{1/2}$, waarin v_{\max} de maximale snelheid in m/s, A de absorptie-coëfficiënt is R de reflectie-coëfficiënt, σ de massa per m² lichtzeil en D_{au} de startafstand vanaf de zon (perihelium) uitgedrukt in AU, bij een zonneconstante van 1366 W/m² op 1 AU, ontleend aan:

<https://www.researchgate.net/publication/286517608> [The speed limit for graphene interstellar Solar photon sails](#) (maar ook makkelijk af te leiden uit: $\int_{D_{\text{au}}}^{\infty} F dr = \frac{1}{2} m (v_{\max})^2$ met F de zonnestralingskracht waarbij de tegenwerkende zonnegravitatie verwaarloosd kan worden indien de lichtheidsfactor hoog is). De massa per m² lichtzeil (σ) kan uitgesplitst worden in een component afkomstig van alleen het zeil en een component van de lading en structuur : $\sigma = \sigma_{\text{zeil}} + M/O$, waarin M = de massa van de lading en structuur, en O = de oppervlakte van het lichtzeil. De laagste waarde voor σ kan bereikt worden door een monolaag van grafeen te gebruiken als lichtzeil, de massa is dan $7,4 \cdot 10^{-7}$ kg per m². Omdat grafeen een extreem hoge treksterkte heeft, hoeft dan ook geen verdere versteviging van het lichtzeil uitgevoerd te worden die de waarde van σ zou verhogen. Om een bovengrens te stellen aan de snelheid die met een zonnezeil bereikt kan worden, worden de waarden van A en R gesteld op respectievelijk 0,95 en 0,05. Hiermee wordt aangenomen dat de monolaag ondoorzichtig is en zich gedraagt als een bijna perfecte zwarte straler. Aangenomen is verder dat de monolaag onder de 3000 K moet blijven door instraling van intensief zonlicht waardoor

0,01 AU de laagste waarde is voor D_{au} . Al deze waarden in de formule ingevuld leveren dan een maximale snelheid op van 4,6% van de lichtsnelheid. Een monolaag van grafeen zal echter nog redelijk transparant zijn. Voor een zonnezeil zal eerder een dubbele laag grafeen gebruikt moeten worden met daartussen metaalatomen, dan nog zal de laag waarschijnlijk niet geheel ondoorzichtig zijn. Te hopen valt dan overigens dat de interactie van de metaal atomen met grafeen, de treksterkte van het materiaal niet al te nadelig beïnvloedt. Een lagere waarde voor $A+2R$ en een hogere waarde voor σ geven dan een lagere maximale snelheid met ongeveer een factor 2. Het nadeel van de kleine startafstand vanaf de zon, is echter behalve sterke opwarming van het zeil en hoge blootstelling aan ioniserende zonnewind, de hoge startversnelling. Deze zal bij 0,01 AU al snel rond de 1000g liggen. Zo'n hoge versnelling limiteert de aard van de lading die met het zonnezeil meegenomen kan worden. Al met al zal de startafstand tot de zon beter opgeschroefd kunnen worden tot bijvoorbeeld 0,03 AU. De initiële versnelling zal dan liggen rond de 100g. Voor een lading en structuur van 2 ton zou de diameter van het zonnezeil dan 40 km zijn. Nu zal de maximale snelheid van het zonnezeil nog maar ongeveer 1% van de lichtsnelheid zijn en bij een startafstand van 0,1 AU en een initiële versnelling van circa 10g nog maar 0,5% van de lichtsnelheid. Dat laatste is niet eens zo veel beter dan een beryllium-zonnezeil, die een maximale snelheid kan halen van 0,2% van de lichtsnelheid vanaf 0,07 AU. Dan nog is het de vraag of zo'n zonnezeil voldoende bestuurbaar zou zijn, en of zo'n zonnezeil wel bestand zou zijn tegen de extreme omstandigheden tijdens de versnellingsfase.

Zonnezeilen zijn niet geschikt voor snelle bemande ruimtevaart, maar ze zouden wel interessant kunnen zijn voor onbemande verkenningsmissies naar andere sterren. Dit zal dan wel zo traag gaan dat de ingenieurs die ze maken en lanceren niet lang genoeg leven om kennis te kunnen nemen van de waarnemingen op of rond de exoplaneten die men met de sondes hoopt te bereiken (tenzij de levensverwachting enorm zou stijgen). Dit zal echter ook gelden voor Dragonfly-achtige sondes die bijvoorbeeld 5 keer zo snel zijn (mogelijk dat een bezoek aan het Alpha Centauri systeem daarop een uitzondering is). Het zou kunnen dat grafeen-zonnezeilen in de nabije toekomst redelijk goedkoop geproduceerd kunnen worden. Interstellaire verkenningssondes met zonnezeilen zouden ordes goedkoper kunnen zijn dan meer complexe alternatieven zoals Dragonfly-sondes waarvoor eerst een zonne-energiecentrale in de ruimte, aangelegd moet worden. Als er éénmaal een 1 tot 10 TW phased array gevoed met zonne-energie in de ruimte beschikbaar is, zal waarschijnlijk wel de voorkeur uitgaan naar Dragonfly-sondes, omdat deze sneller kunnen gaan met een kleiner lichtzeil en dan bovendien een minder hoge initiële versnelling hoeven te ondergaan. Dit zou helemaal gelden als op grafeen gebaseerde zonnezeilen geen succes worden. Het zou daarentegen ook kunnen dat de aanleg van krachtige lasers in de ruimte via een verdrag wordt verboden, omdat het te gevaarlijk wordt geacht. Ook zou het kunnen dat magnetische zeilen die nodig zijn om Dragonfly-sondes af te remmen geen succes worden. In dat geval zouden zonnezeilen een aardig alternatief blijven voor verkenning van de nabije melkweg. In eerste instantie zijn zonnezeilen vooral interessant om te reizen naar de Oortwolk. Dit is ook een goede bestemming om zonnezeilen naartoe te sturen om ze te testen. Magnetische zeilen zijn dan nodig om af te remmen, deze kunnen dan ook direct getest worden. Dit kunnen de onderzoekers en ingenieurs wel meemaken in hun eigen leven. Een zonnezeil dat versnelt tot 0,01c vanaf 0,03 AU zal in ruim 14 uur de baan van de aarde passeren en in ruim 21 uur de baan van Mars. In circa 5 jaar zal 3000 AU zijn afgelegd en is de periferie van de Oortwolk bereikt. In 15,8 jaar is 10000 AU afgelegd en is de sonde al aardig diep in de Oortwolk doorgedrongen. Ook zou op deze wijze binnen een decennium (en met een aanzienlijk minder veeleisende snelheid) een telescoop gelanceerd kunnen worden die gebruik maakt van de zon als gravitatielens om hoge resolutiebeelden van exoplaneten te verkrijgen. De focale lijn die hiertoe bereikt moet worden begint ongeveer vanaf 550 AU. Als deze missies aan de periferie van het zonnestelsel goed verlopen zijn, zou overwogen kunnen worden om een aantal zonnezeilen naar

andere sterren te sturen, ongeveer zoals nu voyager 1 en 2 de interstellaire ruimte in zijn gevlogen. Er is tegen die tijd vast wel een multimiljardair te vinden die daar een paar miljard in wil investeren. Een voordeel van een zonnezeil is ook dat deze met het zelfde zeil waarmee versneld kon worden ook kan remmen, als deze is aangekomen bij de bestemmingsster. Met reistijden van tienduizenden jaren en voortdurende blootstelling aan kosmische straling is het echter nog maar de vraag of zo'n zeil nog voldoende intact zal blijven om nog goed te kunnen functioneren. Je zou het zonnezeil na de versnellingsfase eventueel kunnen opvouwen en bewaren in de sonde en pas wanneer het weer nodig is om mee af te remmen, ontvouwen (een operatie die overigens verre van eenvoudig lijkt). In een kleine sonde, wordt het opgevouwen zonnezeil echter ook nog steeds blootgesteld aan kosmische straling. Lange blootstelling aan kosmische straling is overigens een probleem voor alle kleine interstellaire verkenningssondes. Je zou eerst eens kunnen proberen of het mogelijk is om met een zonnezeil naar Alpha Centauri te gaan en dan weer terug naar de aarde. Dit zou echter al circa 900 jaar duren als het zonnezeil een kruissnelheid heeft van 0,01c. De duurzaamheid van een zonnezeil zou ook op een wat kortere termijn getest kunnen worden door deze met een lagere snelheid rondjes om de zon te laten draaien bijvoorbeeld tussen de baan van de aarde en Jupiter.

Nu een aantal technieken is beschreven voor interstellaire ruimtevaart is het misschien interessant om enige aandacht te besteden aan de detecteerbaarheid van interstellaire ruimtevaart. Als wij buitenaardse ruimtevaart zouden kunnen detecteren aan de hand van spectrometrische kenmerken van de straling die daarbij wordt uitgezonden, zouden we weten dat bepaalde voortstuwings-technieken inderdaad succesvol toegepast kunnen worden door buitenaardse technologisch geavanceerde samenlevingen, als deze tenminste überhaupt bestaan of een voldoende hoge waarschijnlijkheid van bestaan hebben om binnen onze waarnemingshorizon te komen. Hier zijn wel eens berekeningen aan gedaan o.a. door Robert Zubrin (zie <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2950156>). Hieruit is gebleken dat de gammastraling die fusie en antimaterieschepen produceren slecht waarneembaar is over langere afstand. Dat geldt in iets mindere mate ook voor de bremsstrahlung die bij kernfusie-ruimtevaart te verwachten valt. Een fotonische raket die antimaterie als brandstof gebruikt, zou wel zichtbaar licht produceren, dat over enkele honderden lichtjaren waarneembaar zou moeten zijn met een telescoop zoals de Hubble-ruimtetelescoop, als de uitlaatpijp tenminste onze kant op staat. Dit licht zou eenvoudig te onderscheiden zijn van sterrenlicht door ontbrekende waterstof absorptielijnen. De meest opvallende straling zou echter de laagfrequente radiostraling zijn die als cyclotronstraling wordt uitgezonden door magnetische zeilen. Deze straling zou over afstanden van duizenden lichtjaren detecteerbaar zijn. Om deze straling te detecteren is wel een antenne nodig van ongeveer 6 km diameter of meer die geplaatst is in de ruimte. Bij deze berekeningen is overigens wel uitgegaan van vrij zware ruimteschepen van ongeveer een miljoen ton, maar voor een ruimteschip van 10000 ton zou de cyclotronstraling nog steeds over honderden lichtjaren zichtbaar zijn. Wat over grote interstellaire afstanden ook goed zichtbaar is, zijn sterk gebundelde laserstralen zoals die nodig zijn voor laser-voortgestuwde ruimtevaart. Het is niet de gereflecteerde bundel die ver reikt en goed zichtbaar blijft over grote afstanden maar de bundel die rechtstreeks afkomstig is van een phased array of alternatieve laseropstelling, indien deze langs de reflector gaat in de fase dat de bundelverspreiding groter is dan de diameter van het de reflector. Dit laatste zou alleen van toepassing zijn indien men het onderste uit de kan wil halen voor de versnelling van het ruimtevaartuig. De zichtbaarheid van zo'n laserbundel zou zelfs spectaculair zijn. Een DE STAR 4 met een vermogen van 1TW (wat zo'n beetje de meest bescheiden opstelling is voor rendez-vous missies met kleine onbemande sondes van een paar ton) zou op een afstand van 1000 lichtjaar, zichtbaar zijn als een ster die helderder is dan Sirius (de meest heldere ster die 's nachts zichtbaar is op de aarde). Dit zou helemaal indrukwekkend zijn als het laserlicht in het zichtbare deel van het spectrum van

elektromagnetische straling zit. Zo zou bijvoorbeeld opeens een ster van bescheiden helderheid kunnen veranderen in een zeer heldere knal groene ster waarvan het licht vrijwel geheel monochromatisch is. Een langzame afname van de helderheid van zulk monochromatisch licht zou dan bovendien een indicatie zijn dat het gebruikt is voor een laser-voortgestuwd ruimtevaartuig dat gestuurd is in de richting van ons zonnestelsel. Op duizend lichtjaar afstand is de bundelverspreiding van een DE STAR 4 phased array echter nog maar ongeveer een miljoen kilometer. Indien alleen waarnemingen gedaan worden op of direct rondom de aarde, is de kans dat het signaal onderschept wordt daarom echter heel klein. Vanaf een grotere afstand van 2,5 miljoen lichtjaar (zoals een ster in ons buurmelkwegstelsel Andromeda) is de laserbundel nog steeds waarneembaar maar nu is daar al wel een redelijk goede amateur telescoop voor nodig (de helderheid van de laser is dan te vergelijken met de helderheid van Pluto voor waarnemers vanaf de aarde). De bundelverspreiding is dan inmiddels wel opgelopen tot meer dan een miljard kilometer. Indien de laser zeer nauwkeurig gericht was op de zon (voor zover dat überhaupt mogelijk is vanaf die afstand), zou het signaal professionele astronomen na verloop van tijd niet meer kunnen ontgaan. Maar nu is het juist erg onwaarschijnlijk dat de laser uitgerekend op de zon zou zijn gericht. Waarom zou er ergens in de Andromeda nevel speciaal belangstelling voor een missie naar de zon bestaan? Er zijn daar genoeg zonachtige sterren die veel dichterbij liggen waar men naartoe zou kunnen gaan. De kans om de laserbundel waar te nemen zou bovendien een stuk lager kunnen zijn, als je er rekening mee houdt dat deze niet precies op de bestemmingsster gericht hoeft te zijn, een afwijking van bijvoorbeeld 10 miljard kilometer zou tijdens de remfase nog wel bijgestuurd kunnen worden. Ook is het denkbaar dat technologisch hoog ontwikkelde samenlevingen de optie om een sonde extra snelheid mee te geven door toe te laten dat in de laatste fase van de versnelling laserlicht langs de reflector lekt, niet willen of hoeven te gebruiken.

De tot nu toe beschreven technieken voor snelle bemande interstellaire ruimtevaart hebben grote beperkingen of zijn nog niet uitvoerbaar. Nucleaire puls propulsie is waarschijnlijk nog altijd het beste wat met de huidige stand van techniek zou kunnen, maar geeft voor een rendez-vous missie maar een maximale snelheid van circa 0,05c. Antimaterie raketten zouden aanzienlijk hogere maximale snelheden kunnen halen, maar er is voorlopig weinig zicht op de beschikbaarheid en betrouwbare opslag van grotere hoeveelheden antimaterie die daarvoor nodig zijn. Een Bussard ramjet is eigenlijk het meest aantrekkelijke concept. De benodigde energie hoeft niet meegenomen te worden of te worden opgewekt in elektriciteitscentrales, maar kan onderweg gewoon bij elkaar geveegd worden. Maar Bussard ramjet-voortstuwing is technologisch nu nog niet mogelijk, en zou zelfs in de toekomst op onneembare technische barrières kunnen stuiten. Bemande laser voortgestuwde ruimtevaart naar andere sterren, zou met technologische verbeteringen die redelijk aannemelijk lijken, waarschijnlijk wel kunnen, maar vergt enorme investeringen in zonne-energie centrales en phased arrays in de ruimte. Een onzekere factor is daarnaast de toepassingsmogelijkheid van een magnetisch zeil om mee af te remmen. Om een ruimteschip van 20000 ton een snelheid te geven van 0,25c zou al een laservermogen van circa 3250 TW nodig zijn, en daarnaast een reflector en een magnetisch zeil van reusachtige afmetingen, terwijl 20000 ton (waarvan 10000 ton voor de reflector en het magnetische zeil) niet eens heel veel is voor een interstellair ruimteschip waarin een bemanning vele jaren in zou moeten verblijven. Voor een bestemming van 300 lichtjaar ver weg zou met een snelheid van 0,25c de reistijd voor de bemanning ongeveer 1170 jaar zijn. Met een laservermogen van ruim 15000 TW zou misschien 0,5c gehaald kunnen worden. De reistijd wordt dan circa 530 jaar. Dat is nog steeds te lang om in 1 generatie te doen zelfs als de levensverwachting behoorlijk toeneemt. Relativistische tijddilatatie is bij 0,5c nog maar bescheiden. Vanaf 0,9c begint de relativistische tijddilatatie interessant te worden, en zou de reistijd voor de bemanning aanzienlijk bekort worden. Afgezien van de hoge moeilijkheidsgraad om deze snelheden te halen met een bemand ruimteschip

(zoals dat in theorie bijvoorbeeld zou kunnen met een beamed-core antimaterieraket of een laser voortgedreven ruimteschip, die afgeremd kunnen worden met een magnetisch zeil) wordt bij dit soort snelheden de schade die ontstaat door botsingen met stofdeeltjes een serieus probleem. Je zou nog wel kunnen proberen om de bemanning in te vriezen (cryonisme) of in een kunstmatige slaap (hibernatie) te brengen waarna ze vlak bij de bestemming kan worden ontdooid of wakker gemaakt, zodat zij zonder noemenswaardige veroudering die 500 tot 1200 jaar kan doorkomen. Maar dit zijn speculatieve technieken waar voorlopig maar weinig van verwacht kan worden. Om een techniek als hibernatie te ontwikkelen zul je vrijwilligers nodig hebben die weten dat ze mogelijk nooit meer ontwaken of misschien nog wel maar dan met schade. Hoe langer de hibernatie duurt hoe groter de bezwaren van een proefpersoon zullen zijn. Hierdoor zou het kunnen zijn dat de duur van hibernatie die als medisch betrouwbaar te boek staat, niet heel lang wordt. Als de betrouwbare duur van hibernatie bijvoorbeeld een maand is, is dat voor toepassing in de ruimtevaart eigenlijk te kort, omdat een reiziger dan heel vaak in en uit hibernatie moet worden gebracht, wat waarschijnlijk te belastend is. Een ander punt is dat voldoende bescherming tegen kosmische straling geboden moet worden. Kosmische straling zou bijvoorbeeld tegengehouden kunnen worden met een laag van 4 meter dik vloeibaar waterstof, dubbelwandig opgesloten. Op deze wijze zou met een massa van 500 ton een ruimte van ongeveer 3000 m³ beschermd zijn tegen kosmische straling. Afscherming van kosmische straling zou ook kunnen met een sterk magneetveld maar dan zou de bemanning blootgesteld worden aan zulke hoge magneetveldsterktes dat fysieke klachten zoals hoofdpijn kunnen optreden. Door meerdere op elkaar afgestelde magneten te gebruiken zou de ruimte waar de bemanning zit, de magneetveldsterkte door tegenwerkende krachten geminimaliseerd kunnen zijn, maar daarbuiten sterk genoeg om kosmische straling af te buigen. Maar hier zou ook veel massa voor nodig zijn. Indien ook nog kunstmatige zwaartekracht nodig is, zullen twee beschermde ruimtes (of 1 beschermde ruimte en een contragewicht) om elkaar heen moeten draaien met een straal van een paar honderd meter, wat de benodigde massa al snel met een factor 10 verhoogt. Nog niet besproken is dat deel van de lading dat nodig is om de bemanning in leven te houden, zoals voedsel (inclusief kassen voor het verbouwen van gewassen), water, en lucht, bijbehorende zuiveringsinstallaties en een energievoorziening. Verder zal ook behoorlijk wat massa gaan zitten in de romp van de raket, want deze ondervindt bij hoge snelheden nogal wat slijtage. Geschat wordt dat bij een snelheid van 0,2c over een afstand van 6 lichtjaar 30 kg per vierkante meter zal afslijten door botsingen met stofdeeltjes in de ruimte; dit komt overeen met 1 cm dik aluminium. Al met al kom je al snel uit op 10000 ton aan massa voor het ruimteschip exclusief motor, brandstof, magnetische zeil, lichtzeil of andere voorzieningen ten behoeve van de voortstuwing. Deze 10000 ton kan beschouwd worden als een globale ondergrens voor de benodigde massa om een bemanning van enkele personen decennia in leven te kunnen houden tijdens een interstellaire reis, waarbij zal gelden dat de bemanning dan bij voorkeur gedurende het overgrote deel van de reis in hibernatie verkeert. Om op massa te besparen en lange reistijden voor mensen te voorkomen zou ook nog gekozen kunnen worden voor transport van bevroren embryo's (enkele cellen) of genetisch materiaal dat pas later tot embryo's wordt samengebracht. Deze embryo's zouden pas als de eindbestemming is bereikt in een kunstmatige baarmoeder tot wasdom gebracht worden. De aldus geboren kinderen zouden dan vervolgens door kunstmatig intelligente robots opgevoed worden. Dat laatste vergt dan weer enorme technologische doorbraken. Bovendien is het de vraag of je dit wel moet willen. De kinderen worden tenslotte door hun ouders in de steek gelaten en aan een onbekend lot overgelaten. Je moet wel erg wanhopig zijn om zo'n soort kolonisatie te willen uitvoeren.

Maar er is nog een meer fundamenteel bezwaar tegen interstellaire reizen naar leefbare planeten, volgens de tot nu toe beschreven methoden, als het doel daarvan kolonisatie van die planeten is. Als de bemanning na bijvoorbeeld meer dan 1000 jaar is aangekomen bij een leefbare planeet, dan is het

nog maar de vraag of die wel veilig bewoond kan worden. Gesteld dat er al een atmosfeer van zuurstof en stikstof is zoals op de aarde, en vloeibaar water aan het oppervlak, dan is het vervolgens de vraag of het leven dat deze zuurstofhoudende atmosfeer mogelijk heeft gemaakt wel compatibel is met ons leven. Is dit niet het geval dan kun je niet zomaar leven op zo'n planeet. Mogelijk zou men zich moeten afzonderen in koepels om aldaar een eigen ecosysteem tot stand te brengen. Dat zou echter een teleurstellende maatregel zijn, na zo'n lange veeleisende reis. Om wel een planeet direct te kunnen bewonen zal deze eerst door aardse microben leefbaar gemaakt moeten zijn. Hoe dit gedaan zou moeten worden en hoe veel tijd dit kost, zou eerst op testlocaties binnen ons zonnestelsel uitgezocht moeten worden. In het geval dat er op een planeet al primitief leven is, wordt het nog lastiger. Je zou dit primitieve leven eerst moeten vervangen door aards leven met de voor ons geschikte biochemie, maar omdat je de aard van het buitenaardse leven niet kent, is van te voren niet precies bekend hoe dit uitgevoerd zou kunnen worden. Heel misschien is er ook buitenaards leven met precies dezelfde biochemie als ons die van ons. In dat geval zou er mogelijk geen aanpassing nodig zijn, maar zelfs dat is niet gegarandeerd. Om de biochemie en specifieke aard van buitenaards leven te achterhalen zijn eerst wetenschappelijke sondes nodig; detectie met telescopen zal onvoldoende zijn om dit soort details te achterhalen. Deze sondes zijn ook nodig om aardse microben te introduceren op geschikte exoplaneten. Deze onbemande missies zullen al snel duizenden tot tienduizenden jaren in beslag nemen voor exoplaneten die honderden lichtjaren ver verwijderd zijn van de aarde. Voor meer nabije doelen (tientallen lichtjaren) zou de duur van de onbemande missies beperkt kunnen blijven tot eeuwen. Pas als deze missies resultaten hebben opgeleverd zou begonnen kunnen worden met interstellaire bemande ruimtevaart die kolonisatie tot doel heeft. In het algemeen geldt dat een bemande missie pas uitgevoerd zou moeten worden als deze ruimschoots binnen het leven van 1 generatie uitgevoerd kan worden. Op die manier zou voorkomen worden dat levens opgeofferd worden aan schier eindeloos lange reizen (in raketten met beperkte ruimte), terwijl technologische verbeteringen misschien veel snellere reizen mogelijk maken in een nabije toekomst. Dit argument zou echter minder sterk worden als bijvoorbeeld na een paar eeuwen lang onderzoek nog steeds geen noemenswaardige verbeteringen in rakettechnologie voor bemande interstellaire reizen, tot stand zijn gebracht. Voor onbemande interstellaire sondes geldt ook dat deze eigenlijk binnen 1 generatie al hun doel zouden moeten bereiken. Als dit namelijk niet het geval is zouden deze sondes waarschijnlijk ingehaald worden door snellere en meer moderne onbemande ruimtevaartuigen die later gelanceerd worden, waarmee de kans dat de investering die gedaan is in de oude sondes, iets oplevert, ook voor latere generaties heel klein wordt. Dit geldt echter in mindere mate voor een eerste generatie onbemande sondes indien deze relatief goedkoop en als spin-off van onderzoek aan de periferie van het zonnestelsel gelanceerd zouden kunnen worden (bijvoorbeeld sondes die voor hun voortstuwing zonnezeilen gebruiken). Zo'n eerste generatie onbemande interstellaire sondes zou ook een soort garantie zijn voor de verkenning van de nabije melkweg, indien later zou blijken dat modernere en snellere technieken voor onbemande sondes toch niet gerealiseerd worden.

Voor wat betreft bemande ruimtevaart geldt nog het volgende. Met een snelheid van 0,25c zouden wel de meest nabije sterren (en dan vooral het Alpha Centauri systeem: Alpha Centauri A,B en proxima Centauri) bezocht kunnen worden binnen enkele decennia. Dit geldt ook voor de al circa 2,5 maal zo ver weggelegen K/G-sterren Epsilon Eridani, Epsilon Indi en Tau Ceti, indien de snelheid kan worden opgevoerd tot 0,5c. K/G-sterren zijn sterren van een spectrale klasse die de meeste kans biedt op de aanwezigheid van bewoonbare aardachtige planeten. De meest nabije echt zonachtige solitaire ster Beta Canum Venaticorum (Chara) op 27,5 lichtjaar zou nog net met een kruissnelheid van 0,5c binnen 60 jaar bereikt kunnen worden. De kans dat zich rond de 3 sterren van het Alpha Centauri systeem een echte aardachtige planeet bevindt is niet zo groot. Mogelijk is proxima

Centauri-b wel een planeet met vloeibaar water aan het oppervlak waar je zou kunnen rondlopen met alleen een zuurstofmasker. Een bemande reis naar Alpha Centauri zou dan in eerste instantie meer een expeditie zijn, zoals de Apollo-missies dat waren voor de Maan. Zo'n expeditie zou pas aannemelijk worden als er eerst onbemande missies aan vooraf zijn gegaan die hebben uitgewezen naar welke planeten je zou kunnen gaan en of dat wel de moeite waard is. Maar dan nog zou er waarschijnlijk te weinig budget voor zijn, als het doel vooral een expeditie is voor avonturiers. Bovendien is een expeditie pas compleet als er voor de bemanning ook een terugreis naar de aarde is, zeker als de bestemming slechts een planeet met een zuurstofloze atmosfeer is. Voor een expeditie naar Alpha Centauri met ook een terugreis, zou eigenlijk een kruissnelheid van ongeveer 0,5c nodig zijn (bij de huidige levensverwachting). 0,5c zou met laservoortstuwing misschien nog bereikt kunnen worden, maar dat geldt alleen voor een enkele reis, als op de bestemming niet ook een krachtig laserstation beschikbaar is. Al met al is interstellair bemand ruimtevarende zoals tot nu toe beschreven voorlopig een aantal bruggen te ver. Maar, niet uit te sluiten valt dat ooit door onvoorziene technologische doorbraken veel snellere verplaatsingen in de ruimte mogelijk worden, zoals dat bijvoorbeeld met Alcubierre warpdrive en mind-uploading in theorie zou kunnen.

§ 2. Langzame interstellair bemand ruimtevarende met generatieschepen

Een generatieschip is een bemand interstellair ruimtevarende dat een lage maximale snelheid heeft, (in het algemeen minder dan een paar procent van de lichtsnelheid), en dat daardoor zo lang onderweg is dat meerdere opeenvolgende generaties erin moeten zien te overleven; zij hebben daartoe wel veel massa voor een kunstmatige leefomgeving tot hun beschikking. Aanzienlijk snellere bemand ruimteschepen die langer dan 1 generatie onderweg zijn, zou je ook nog wel generatieschepen kunnen noemen. Zij hebben echter, om de benodigde energie en vermogen binnen realistische proporties te houden, zo'n geringe massa dat alleen een zeer beperkte leefomgeving aan de bemanning geboden kan worden. In die gevallen kan beter hibernatie of cryonisme gebruikt worden om de extreem lange reisduur voor de bemanning dragelijk te maken. In het vorige hoofdstuk kwamen generatieschepen al even ter sprake als alternatief voor snelle bemand ruimtevarende met relatief kleine raketssystemen. Zij werden toen gekenmerkt als onaantrekkelijk, omdat niet alleen de achterblijvers de bestemmingsplaneet nooit bereiken maar ook degenen die vertrekken, en zelfs verreweg de meeste mensen die in het generatieschip ooit zullen leven. Een generatieschip zal echter minder onaantrekkelijk zijn indien het een grote en aantrekkelijke leefomgeving biedt voor een redelijk grote groep mensen (zeg maar 1000 tot 2000 mensen), en daarnaast de situatie op de aarde of in het zonnestelsel in het algemeen er niet meer zo rooskleurig voorstaat voor mensen. In deze paragraaf worden een groot generatieschip met een kruissnelheid van 100 km/s en een klein generatieschip met een kruissnelheid van 1000 km/s nader beschouwd. Het uitgangspunt daarbij zal zijn dat de maximale kinetische energie van het generatieschip van een zelfde grootteorde moet zijn, als de kinetische energie van een relativistisch ruimteschip van 75000 ton met snelheid van 0,5c, namelijk 10^{24} Joule. De gegeven massa van het relativistische schip is 3,75 keer zo hoog als beschreven in het voorbeeld dat in vorige hoofdstuk ter sprake kwam, maar dit is nog wel ruim onder de maximale massa voor een snel relativistisch schip, die haalbaar lijkt. Op grond van dit uitgangspunt zal de droge massa van het kleine generatieschip 2 miljard ton ($2 \cdot 10^{12}$ kg) zijn en de droge massa van het grote generatieschip 200 miljard ton ($2 \cdot 10^{14}$ kg). De maximale reistijd van een generatieschip wordt gesteld op honderdduizend jaar. Voordat deze reistijd verstreken is, zou bijvoorbeeld nucleaire brandstof bijgetankt moeten worden of een bepaalde vorm van onderhoud uitgevoerd moeten worden die onderweg niet mogelijk is. Met 100 km/s is de actieradius van het grote generatieschip 33,3 lichtjaar, terwijl de actieradius bij 1000 km/s 333 lichtjaar is. Dit betekent dat een groot generatieschip circa 50 K/G sterren kan bereiken terwijl een klein generatieschip circa 50000 K/G sterren kan bereiken. Omdat het grote generatieschip maar

een geringe keuze heeft aan geschikte bestemmingssterren, zal er ook maar een geringe keuze aan bestemmingsplaneten zijn. De focus zal dan vooral liggen op terravorming van geschikte levenloze planeten waarbij het generatieschip nog lange tijd de leefomgeving van de bemanning blijft. Het kleine generatieschip heeft een veel grotere keuze aan bestemmingssterren, zodat men veel kieskeuriger kan zijn in het selecteren van een planeet. Tenslotte zal geanalyseerd worden wat de maximale snelheid van een groot generatieschip kan worden als wel aanzienlijk meer energie beschikbaar is, en de kinetische energie ordes hoger kan oplopen dan die van een licht relativistisch ruimteschip. In dat geval zou ook voor een groot generatieschip de keuze aan bestemmingsplaneten heel ruim kunnen zijn.

In een generatieschip zal kunstmatige zwaartekracht aanwezig moeten zijn en een redelijk groot bewoonbaar oppervlak. Dit kan geboden worden door middel van een roterende cilinder zoals voorgesteld door O'Neill; zo'n roterende cilinder biedt de meest gunstige verhouding tussen het constructieoppervlak en het bewoonbare oppervlak vergeleken met andere ontwerpen. Indien het generatieschip uit 1 enkele niet gekoppelde cilinder bestaat is het van belang dat de lengte van de cilinder niet groter is dan 1,3 maal de rotatiestraal voor voldoende rotatiestabiliteit, zoals toegepast is in het eerder genoemde Kalpana-1 ontwerp. Een minimaal generatieschip zou gebaseerd kunnen zijn op dit ontwerp. Zo'n habitat bestaat uit 1 enkele roterende cilinder met een straal van 250 meter en een lengte van 325 meter. Bij deze rotatiestraal zijn fysieke ongemakken door de hoge hoeksnelheid en sterke corioliseffecten nog net aanvaardbaar. Voor een generatieschip zou zo'n roterende cilinder waarschijnlijk nog wel omgeven moeten zijn met een niet roterende beschermhuls, uit veiligheidsoverwegingen en om ruimte te bieden aan apparatuur ten behoeve van de voortstuwing van het generatieschip. Geschat kan worden dat de minimale droge massa van zo'n generatieschip uitkomt op 20 miljoen ton. Volgens <https://www.sciencealert.com/how-big-would-a-spacecraft-need-to-be-to-keep-a-crew-alive-to-travel-to-another-star> is een startbemanning van minimaal 98 niet-verwante mensen (50% vrouw, 50% man) nodig voor voldoende genetische variatie om over langere tijd gezonde nakomelingen voort te brengen. Dit geldt echter niet voor een onbeperkt aantal generaties. Voor duizenden generaties zou de startbemanning groter moeten zijn. Het zou echter mogelijk zijn om met behulp van biochemische technieken inteelt te voorkomen, als dat later nodig zou zijn. Aangenomen wordt dat een bemanning van gemiddeld 250 mensen voldoende is. Om deze mensen te kunnen voeden is circa 23 hectare aan landbouwgrond nodig (op basis van de productiviteit van de landbouw zoals die op aarde mogelijk is). Wel zou dan waarschijnlijk als aanvullende eiwitbron, insecten gebruikt moeten worden (in plaats van eiwitten die uit veeteelt verkregen worden). 23 Hectare is ongeveer de helft van het bewoonbare oppervlak van de habitat, dus dat zou net kunnen. Zo'n generatieschip is echter te mager om permanent in te leven. Met een omtrek van ruim 1,5 km loop je de hele habitat in 20 minuten rond, al in een paar dagen zul je alle wegen en landschappen al kennen. Al zou de water- en luchtkwaliteit goed blijven dan nog zou je niemand gunnen om zijn hele leven in zo'n kleine ruimte te leven. Het is bovendien de vraag of zo'n klein ecosysteem wel stabiel genoeg is over langere tijd om zonder hulp van buitenaf in te kunnen overleven. Eén van de kleinste geïsoleerde eilanden op aarde waar een kleine groep mensen kan overleven zonder hulp van buitenaf is Pitcairn eiland in de stille oceaan, dat een bevolking van slechts 50 mensen heeft. Maar Pitcairn is met een oppervlak van 420 hectare ruim 8 keer zo groot als zo'n minimale habitat. Bovendien profiteert Pitcairn van verse lucht en vers oceaانwater van de stille oceaan.

Een groot generatieschip dat een kruissnelheid van 100 km/s zal kunnen halen, zal waarschijnlijk wel een acceptabele leefomgeving kunnen bieden. Zo'n leefomgeving kan geboden worden in de vorm van een roterende ruimtehabitat zoals genoemd in het vorige hoofdstuk. Twee gekoppelde tegengesteld roterende cilinders met elk een lengte van 15 km en een straal van 11,5 km geven dan

een habitatooppervlak van ruim 2000 km². Inclusief beschermhuls zal de massa van zo'n habitat ongeveer 2.10¹⁴ kg (200 miljard ton) bedragen. Gekoppelde tegengesteld roterende cilinders zoals oorspronkelijk voorgesteld in het ontwerp van O'Neill waren bedoeld voor rotatiestabiliteit en om de cilinders goed gericht te houden op de zon door ze te gebruiken als reactiewielen, zodat geen reactiemassa verbruikt hoeft te worden. Dat laatste is niet nodig voor generatieschepen omdat die hun eigen energievoorziening moeten hebben. Indien het netto impulsmoment van het generatieschip nul is en het daarmee gyroscopisch stabiel is, blijft dat echter wel een voordeel in de navigatie. De straal van 11,5 km heeft als voordeel dat de luchtdruk op de rotatie-as dan de helft is van de luchtdruk op grondniveau. Het is dan mogelijk om een gravitatie-loze ruimte in te richten nabij de draai-as waar je nog net zonder zuurstofmasker kunt rondlopen. Bij een aanzienlijk grotere rotatiestraal wordt daarvoor de luchtdruk te laag. Als deze voordelen minder belangrijk gevonden worden kan ook gekozen worden voor een enkele grotere roterende cilinder met een lengte van niet groter dan 1,3 maal de rotatiestraal voor rotatiestabiliteit (zoals in het Kalpana ontwerp). De afmetingen van die ene cilinder worden dan 16,5 km voor de rotatiestraal en 21,5 km voor de cilinderlengte. De andere voordelen van een relatief kleine cilinderlengte ten opzichte van de rotatiestraal zijn dat de verlichting via de eindkappen geregeld kan worden, de corioliseffecten geringer zijn en de bewoners minder een kokervisie hebben.

De kruissnelheid van het grote generatieschip wordt gesteld op 100 km/s. Dit is snel genoeg om 33 lichtjaar in ongeveer 100 duizend jaar af te leggen, dit komt overeen met 3000 generaties bij de huidige levensverwachting. Dit is een voor menselijke begrippen een erg lange periode, die hoge eisen stelt aan de levensduur van het schip en de stabiliteit van de maatschappij in het schip. Als startpunt van het generatieschip wordt de baan van de aarde om de zon genomen buiten de directe zwaartekrachtinvloed van de aarde, bijvoorbeeld op het zon-aarde Lagrangepunt L4 of L5. Een ander mogelijk startpunt is ergens in de planetoïdengordel tussen Mars en Jupiter. Deze locatie heeft als voordeel dat geschikte mijnbouwlocaties voor de constructiematerialen dichtbij zijn in de vorm van planetoïden. Voor het L4/L5 startpunt in de baan van de aarde, zal de Maan een belangrijke mijnbouwlocatie zijn. Het startpunt van het generatieschip zal ook (ongeveer) de plek zijn waar het schip geconstrueerd wordt. Om op een eindsnelheid van 100 km/s uit te komen, is vanuit de baan van de aarde om de zon een Δv van 79 km/s nodig, indien de baansnelheid van 29,8 km/s maximaal benut wordt. Deze snelheid kan berekend worden door de kinetische energie ($\frac{1}{2}mv^2$) die aan het ruimteschip gegeven moet worden plus de zwaarteenergie ($-GMm/r$ met G de gravitatieconstante, M de massa van de zon en r de straal van de baan van de aarde om de zon) van de uitgangssituatie gelijk te stellen aan de kinetische energie die het schip moet overhouden als het ontsnapt is aan de zwaartekracht van de zon. Bij de Δv mag dan de baansnelheid van 29,8 km/s die het ruimteschip al heeft, opgeteld worden. Een klein generatieschip dat versnelt tot 1000 km/s kan relatief veel minder profiteren van de baansnelheid die het in het begin al heeft.

Voordat ingegaan wordt op de vraag hoe aan een groot generatieschip een snelheid van 100 km/s gegeven kan worden in de interstellaire ruimte, zal eerst behandeld worden hoe de ruimtehabitat is opgebouwd en hoe deze voor lange tijd zelfvoorzienend kan zijn. Voor het generatieschip volstaat een dikte van 2 meter voor het supersterke MNT materiaal als draagconstructie voor de cilinder, dit komt overeen met 7,5 miljard ton voor 1 cilinder met een diameter van 23 km en een lengte van 15 km, inclusief enigszins ellipsoïde afsluitkappen (het ellipsoïde karakter van de afsluitkappen maakt de draaias door het afgesloten deel van de habitat iets langer dan 15 km, zeg maar 15,6 km). Voor een luchtdruk van 1 atmosfeer is per cilinder 10 miljard ton lucht nodig. Voor de inrichting van de cilinder wordt 4 maal de massa van de atmosfeer genomen (40 miljard ton). Dit zou overeenkomen met een laag van 40 meter water over het oppervlak van de cilinder exclusief afsluitkappen. Met behulp van aerogel en ander sponsachtig gesteente op basis van silica met lage dichtheid, kan een landschap

met heuvels en kliffen gemaakt worden, waarbij de hoogteverschillen kunnen oplopen tot enkele honderden meters, met bijvoorbeeld 400 meter voor de hoogste bergtoppen. De steile delen van de heuvels en kliffen kunnen voorzien worden met steenlagen van enkele decimeters dik van hogere dichtheid (bijvoorbeeld graniet en kalksteen), elders is plaats voor bodems die meters dik gemaakt kunnen worden. Zeeën en meren kunnen hier en daar 20 meter diep zijn. Tussen de MNT laag en het water/land zit nog een beschermlaag van bijvoorbeeld een meter dik. Uiteraard moet de massaverdeling over de cilinder symmetrisch zijn, zodat er geen schommelingen ontstaan. Een correctiemechanisme met regelbare waterbassins zou nodig kunnen zijn om de massa op langere termijn evenredig verdeeld te houden. De twee cilinders gecombineerd hebben op basis van boven genoemde samenstellende massa's een gezamenlijke massa van 114 miljard ton. Indien beide cilinders in elkaars verlengde zijn geplaatst kunnen ze overkoepeld worden door 1 grote beschermende niet roterende cilinder met een lengte van 32 km en een diameter iets groter dan 23 km. Diamagnetische repulsie zorgt er voor dat de roterende cilinders de buitenste beschermcilinder niet kunnen raken. De buitenste beschermcilinder is voorzien van eindkappen en een wand tussen de tegengesteld roterende cilinders. Indien de buitenste cilinder een dikte heeft van 25 meter en een gemiddelde dichtheid van 1000 kg/m^3 zal de massa inclusief afsluitkappen circa 86 miljard ton bedragen. De buitenste cilinder zou bijvoorbeeld uit een laag of geraamte van titanium kunnen bestaan voor structurele sterkte met daarover heen een dikke laag met lage dichtheid om kosmische straling tegen te houden. De niet roterende cilinder is niet belast met (pseudo)gravitatie maar zal toch nog wel wat structurele sterkte moeten hebben o.a. om torsiekrachten te weerstaan. Daarnaast zullen in de buitenste cilinder tanks en andere ruimtes aangelegd zijn voor opslag van grondstoffen, (nucleaire) brandstof en voor technische installaties. Hiermee komt de totale droge massa van het generatieschip uit op 200 miljard ton. Er is wel eens gesuggereerd dat de niet roterende beschermhuls van een generatieschip gebaseerd zou kunnen zijn op een uitgeholde planetoïde. Om op massa te besparen zou echter een geconstrueerde en geoptimaliseerde beschermhuls voordeliger zijn. Die beschermhuls zou van buitenaf wel het uiterlijk van een planetoïde gegeven kunnen worden. Het is echter de vraag of zo'n camouflage zin zou hebben omdat het generatieschip toch wel zou opvallen door zijn snelheid en stralingsprofiel. Het interstellaire object (planetoïde of restant van een komeet) Oumuamua, een paar jaar geleden zichtbaar in het zonnestelsel, had een perihelium snelheid van bijna 88 km/s, maar de interstellaire snelheid bedraagt maar 26,3 km/s. Ten opzichte van zo'n object zou een generatieschip met een snelheid van 100 km/s, aardig opvallen.

De verlichting van het generatieschip moet kunstmatig zijn. Dit kan met behulp van OLED-panelen die zijn bevestigd op de eindkappen, ongeveer zoals beschreven voor afgedekte koepelkolonies op de aarde. Omdat het te verlichten oppervlak van de twee cilinders gecombineerd drie keer zo groot is als voor de beschreven koepelkolonie met een straal van 15 km, zal het piekvermogen van de verlichting ook ongeveer drie keer zo hoog moeten zijn. Een generatieschip zal daarnaast ook nog wel wat extra vermogen moeten hebben voor andere huishoudelijke taken, daarmee zal het piekvermogen op ongeveer 200 GW uitkomen. Tenminste als beide cilinders gelijktijdig verlicht worden. Dit zou wel wenselijk zijn, omdat anders sprake zal zijn van een jetlag voor mensen die van de ene naar de andere cilinder reizen. Met een nachtperiode die even lang duurt als een dagperiode zal het gemiddelde vermogen voor verlichting en andere huishoudelijke taken op 100 GW uitkomen. De cilinders maken circa 400 rotaties per dag. Het kan zijn dat in de loop der tijden door interne wrijving de rotatiesnelheid wat afneemt. Een klein beetje van het vermogen voor de huishoudelijke energievoorziening is gereserveerd om de rotatiesnelheid op peil te houden. Om voor honderdduizend jaar genoeg energie te hebben is ongeveer 10^{24} Joule aan nucleaire brandstof nodig, als je er van uitgaat dat deze brandstof met een rendement van 33,3% in elektrische energie kan worden omgezet. Voor nucleaire brandstof zoals die in kweekreactoren (op basis van kernsplijting

van laag verrijkt uranium of thorium) kan worden gebruikt, is de energie-inhoud ongeveer 80 TJ per kg. Daarmee komt de massa aan benodigde nucleaire brandstof uit op ongeveer 12 miljoen ton. Dit is maar ruim een tiende van een promille van de massa van de niet roterende beschermcilinder. Voor kernfusie met lithiumdeuteride als brandstof (ten behoeve van deuterium-tritium fusie in een tokamak) kan in theorie een besparing bereikt worden van de massa van de nucleaire brandstof met ruim een factor 3 bij een zelfde rendement. Bovendien zou de exploitatie van fusiecentrales minder complex zijn dan kernsplijtingscentrales met kweekreactoren. De energie kan dus makkelijk meegenomen worden. Lastiger zal het zijn om in het generatieschip een 100 GW kerncentrale operationeel te krijgen (en voor langere tijd te houden). De grootste operationele kerncentrale tot nu toe (de Kashiwazaki-Kariwa kerncentrale in Japan) heeft maar een vermogen van 8 GW. De massa aan staal en beton die nodig is voor alle reactoren bij elkaar zal meevallen. Deze zal ongeveer van de zelfde grootteorde zijn als de beginmassa van alle nucleaire brandstof, en makkelijk geïntegreerd kunnen worden in de architectuur van de niet roterende beschermhuls. De massa die nodig is voor koeling, en koelvloeistof o.a. voor het aandrijven van turbines met stoom, zal echter aardig kunnen oplopen. Aneutronische kernfusie op basis van helium-3 zou wat dat betreft grote voordelen bieden, omdat dan elektrische stroom rechtstreeks uit de kinetische energie van de geladen deeltjes kan worden opgewekt met een rendement dat circa twee keer zo hoog is vergeleken met een conventionele kerncentrale, bovendien zou de koeling veel efficiënter uitgevoerd kunnen worden en zou veel minder stralingsafscherming nodig zijn. Om op deze efficiënte wijze voor honderdduizend jaar voldoende elektriciteit op te wekken is minimaal 0,84 miljoen ton helium-3 nodig indien helium-3 -deuterium fusie wordt toegepast, of minimaal 2,3 miljoen ton helium-3 indien fusie met alleen helium-3 wordt toegepast. Er is echter veel minder zicht op magnetische opsluitingsfusie van helium-3 of helium-3+deuterium dan van deuterium+tritium.

Bovendien is helium-3 een zeldzaam isotoop. Het zou gewonnen kunnen worden uit de atmosfeer van Uranus of Neptunus met behulp van speciale ballonnen of thermonucleaire ramjets., zie <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140017392.pdf>. Maar deze atmosferen bevatten maar een paar honderdste van een promille aan helium-3. De atmosfeer van Uranus heeft een massa ongeveer gelijk aan de massa van de aarde. Daarmee is de totale hoeveelheid helium-3 in Uranus alleen al, toch nog erg groot, namelijk ongeveer 10^{20} kg (in tegenstelling tot de schamele miljoen ton helium-3 die aanwezig zou zijn in de regoliet van de Maan). Alleen om het met bijvoorbeeld miljoen ton per jaar uit die atmosfeer te halen is nogal lastig. Helium-3 kan ook geproduceerd worden uit lithium-6 door lithium-6 met een neutron te splitsen in helium-4 en tritium. Het tritium vervalt dan vervolgens in helium-3 met een halfwaardetijd van 12,3 jaar. Deze methode zou voor handen komen zodra een eerste generatie kernfusie met deuterium en tritium beschikbaar komt, waarbij tritium gekweekt kan worden met lithium en neutronen die bij de fusie vrijkomen. Echter zelfs al zou de energieproductie met dit type kernfusie het tienvoudige zijn van het huidige jaarlijkse energiegebruik, en 10% van het tritium onttrokken worden aan de fusiereactoren, om te laten vervallen tot helium-3, dan nog zou er maar een paar duizend ton tritium per jaar geproduceerd worden om te laten vervallen tot helium-3. Een fusiereactor die alleen deuterium gebruikt zou ook helium-3 kunnen produceren, echter is deze fusiereactie lastiger op gang te brengen. De wereldvoorraad lithium op de aarde is circa 53 miljoen ton. Daarnaast zit ongeveer 230 miljard ton lithium opgelost in de oceanen in een concentratie van ongeveer 0,2 ppm. Bij dit soort lage concentraties is lithium echter nog niet economisch winbaar (met de huidige technieken). Er is nu overigens al een toenemende vraag naar lithium maar dan vooral voor gebruik in (oplaadbare) batterijen. Voor zover bekend ligt elders in het zonnestelsel lithium ook niet voor het oprapen, al is het plausibel dat op andere planeten, manen en planetoïden net als op de aarde mineralen met makkelijk winbare hoeveelheden lithium, bestaan. Deuterium is iets minder zeldzaam. Op de aarde is

1 op de 6400 waterstof atomen deuterium. Dit geldt ook ongeveer voor het waterstof dat aanwezig is in planetoïden. Een belangrijke bron van deuterium is water waarin deuterium voorkomt als half zwaar water met 1 deuterium kern of zwaar water met 2 deuteriumkernen. Het deuterium kan hier zonder al te veel moeite uit geïsoleerd worden, zodat de productie van zuiver deuterium niet al te moeilijk is. Met alleen deuterium kan echter geen aneutronische fusie uitgevoerd worden.

Net als voor een afgesloten koepel op de aarde, zal het weer in het generatieschip enigszins stuurbaar moeten zijn. Het vermogen van de instraling kan geregeld worden via de lichtpanelen op de afsluitkappen, warmteafvoer zal via uitstraling van de eindkappen geregeld kunnen worden. De aanwezigheid van de beschermhuls zal echter de capaciteit van de uitstraling beperken, zodat de instraling van het licht waarschijnlijk zoveel mogelijk in het zichtbare deel van het spectrum zal komen te liggen. Neerslag zal bij voorkeur geregeld worden door middel van convectiestromen waarmee stapelwolken en buien gevormd kunnen worden. Er zou voor gekozen kunnen worden om in 1 cilinder een zomerseizoen en winterseizoen elkaar te laten afwisselen terwijl in de andere cilinder geen seizoenen zijn, maar alleen warm (sub)tropisch weer. Zo zou je op vakantie kunnen gaan naar de andere cilinder alsof je naar een ander warm land gaat. Een reis naar de andere cilinder vindt plaats met een zeppelin die naar het centrale punt van één van de afsluitkappen vliegt. In het centrale punt van de afsluitkap bevinden zich luchtsluisen om naar het gekoppelde centrale punt van de afsluitkap van de andere tegengesteld roterende cilinder te gaan. Om lange tijd zelfvoorzienend te kunnen zijn, heeft een generatieschip wel onderhoud nodig. Onderhoudswerkzaamheden aan de lichtpanelen van de cilinders en aan het herstellen van gesteentelagen zouden tamelijk veeleisend kunnen zijn, zodat hiervoor geavanceerde robotarbeid nodig is. Omdat de bewoners van een generatieschip zich heel lang met een klein stukje land moeten behelpen, is het van belang dat er een circulaire en duurzame economie tot stand komt. Hierbij helpt het om pre-industriële technieken toe te passen. Bouwmaterialen zouden bij voorkeur bestaan uit hout, stenen, keramiek en ijzer plus een aantal legeringen. Plastics zouden zoveel mogelijk vermeden worden omdat deze uiteindelijk degraderen tot min of meer schadelijke micro-deeltjes die in de biosfeer blijven hangen en daar moeilijk uit op te ruimen zijn. In sommige gevallen zal het moeilijk zijn om klassieke materialen te gebruiken, bijvoorbeeld isolatiemateriaal voor elektrische bedrading. Hiervoor zouden misschien kunststoffen gebruikt kunnen worden die zo'n hoge dichtheid hebben dat ze kunnen bezinken als onschadelijk sediment.

Eerder in dit artikel werd een kleine roterende habitat met een bewoonbaar oppervlak van ruim 2000 km² (inclusief zeeën en meren) omschreven als te beperkt qua leefruimte, om aantrekkelijk te zijn voor permanente bewoning. Als dit echter het grootste type habitat is dat ontwikkeld zal worden, is zo'n habitat waarschijnlijk wel het beste wat aan leefruimte aan mensen geboden kan worden buiten de aarde in het zonnestelsel. Als de aarde getroffen wordt door allerlei rampspoed is zo'n kleine ruimtehabitat zo gek nog niet. De sleutel tot een succesvolle bewoning van zo'n kleine ruimtehabitat is een kleine en stabiele populatie, zodat er per inwoner toch veel ruimte beschikbaar is. Te denken valt aan een maximale bevolking van 10000 mensen, een bevolking van 1000 à 2000 mensen zou groot genoeg zijn voor voldoende genetische verscheidenheid, en zou ook als voordeel hebben dat iedereen elkaar globaal kan kennen (zoals gebruikelijk voor de bemanning van een ruimteschip). Een bevolking van meer dan 2000 mensen zou maatschappelijk en politiek minder stabiel kunnen zijn. Een nadeel van zo'n kleine populatie is dat nog al wat inwoners het leven in zo'n habitat te dorps zouden kunnen vinden. Voor een grootstedelijke miljoenen bevolking is echter sowieso geen plaats. Wel zou de menselijke bevolking aangevuld kunnen worden met een paar duizend sterk op mensen gelijkende cyborgs, om naar het inzicht van de mensen, meer levendigheid in de steden te brengen (als ze dat zelf niet kunnen). Bovendien kunnen deze cyborgs werk verrichten dat liever niet door mensen gedaan wordt of waarvoor te weinig (of geen) mensen

beschikbaar zijn. Met een bevolking van een paar duizend mensen is er in het generatieschip per bewoner meer oppervlak beschikbaar dan voor de meeste aardbewoners in hun woonregio. Aan het oppervlak is bijna geen infrastructuur nodig. Een magnetische zweeftrein over een cirkelvormig tracé van ruim 72 km lang die het midden van de cilinder doorkruist, volstaat voor het meeste vervoer over lange afstand. Aantrekkelijke landschappen zoals tropische eilanden met parelwitte stranden, grillige kusten met kliffen, en bossen met meren en rivieren zullen voor het oprapen liggen. Je hoeft dan ook niet vreemd op te kijken als de bemanning al voordat ze vertrekt met het generatieschip helemaal niet zo'n behoefte heeft om terug te gaan naar een in crisis verkerende aarde. Zo'n generatieschip zal pas vertrekken als aangetoond is dat een stabiel ecosysteem tot stand is gebracht, en het generatieschip ook anderszins geen mankementen vertoont. Ook zal het generatieschip niet vertrekken als er geen goede reden voor is. Maar wat zou een goede reden kunnen zijn? Als het generatieschip goed functioneert, doet zich de vreemde situatie voor dat eigenlijk nog steeds niemand er belang bij heeft dat het schip vertrekt. De achterblijvers zullen het schip toch nooit meer terug zien als het eenmaal vertrokken is en de bewoners van het schip zijn veiliger als ze rondjes om de zon blijven draaien. Als je geen goede reden kan verzinnen om te vertrekken kun je je afvragen waarom het schip in de eerste plaats gemaakt is. Maar gold voor de ontdekkingsreizigers van vroeger ook niet dat ze uit veiligheidsoverwegingen beter met hun schip in de haven hadden kunnen blijven liggen? Je zou ook kunnen zeggen dat, met de beschaving op aarde die er weinig rooskleurig voorstaat, het niet veel uitmaakt voor de bemanning of het ruimteschip rondjes blijft draaien om de zon, of dat het definitief uit het zonnestelsel wegvliegt, als het daar tenminste goed voor is uitgerust. Wanneer tenslotte een andere bewoonbare planeet is bereikt, kan die planeet eerst rustig met aardse microben leefbaar gemaakt worden terwijl de bemanning gewoon nog langere tijd in het generatieschip blijft, waar het als het goed is nog steeds prima uit te houden valt. Het is overigens goed denkbaar dat een maatschappij in een groot generatieschip een langere gemiddelde levensduur heeft dan op een planeet, omdat een kleine populatie zich zelf minder snel te gronde zou richten door oorlog dan een grote populatie op een planeet. Maar zelfs al zou een technologisch geavanceerde beschaving in een generatieschip een langere levensduur hebben dan op een planeet dan nog zou zij door de extreem lange reistijd naar een bewoonbare planeet nog voordat de bestemmingsplaneet bereikt is ten einde kunnen komen. Er bestaan SF verhalen waarin de bewoners van een generatieschip in een middeleeuws tijdperk zijn teruggevallen of zelfs in het geheel zijn uitgestorven terwijl het schip uiteindelijk door geautomatiseerde systemen wel netjes in een baan nabij de bestemmingsplaneet ingeparkeerd wordt.

Kinderen die in een groot generatieschip opgroeien krijgen op een gegeven moment (als het tenminste niet verzwegen wordt) een heel raar verhaal te horen. Namelijk dat zij niet leven in een gewone wereld maar in een zelfgemaakt schip dat van binnen het uiterlijk van een echte wereld gegeven is. Oorspronkelijk komen hun voorvaders van een echte veel grotere wereld maar daar zijn ze om één of andere reden van weggegaan om naar een andere echte wereld te gaan. De reistijd naar die andere echte wereld was echter zo groot dat het te gebruiken ruimteschip moest worden omgevormd tot een nepwereld waarin de tussenliggende generaties redelijk konden leven alsof ze op een echte wereld leven. Zo'n verhaal zou moeilijk te geloven zijn. Zo moeilijk dat het een soort religie zou kunnen worden. Om het verhaal te ondersteunen zou aan iedere inwoner van het generatieschip de mogelijkheid geboden kunnen worden om minstens 1 keer in hun leven de brug van het schip de bezoeken, ongeveer zoals moslims minstens 1 keer in hun leven Mekka behoren te bezoeken. Deze in het niet roterende gedeelte van het schip gelegen plaats waar de navigatie geregeld wordt, is voorzien van een enorm venster dat uitzicht biedt op de echte kosmos. Ook zullen zij dan in de gelegenheid gesteld worden om een ruimtewandeling te maken zodat ze het schip van de buitenkant kunnen zien.

Een nadeel van een generatieschip zou kunnen zijn dat tegen de tijd dat de bestemmingsplaneet bereikt is, de planeet al ingepikt is door mensen die later zijn vertrokken met een snel ruimteschip dat bijvoorbeeld een paar eeuwen nodig heeft om 30 lichtjaar af te leggen. De bemanning van dit snelle schip zou dan tijdens de reis in hibernatie gebracht zijn. Op zich zou het goed kunnen uitkomen dat anderen de planeet al vast leefbaar hebben gemaakt, maar het zou ook goed kunnen dat de planeet inmiddels is verknoeid of dat de bewoners van het generatieschip niet welkom zijn op de planeet. De bewoners van het generatieschip zouden misschien hun habitat kunnen ruilen voor de technologie van de kolonisten om snel naar een andere planeet te reizen, maar het is twijfelachtig of ze daarmee akkoord zouden gaan. Anders zit er niet veel meer op dan helium-3 en deuterium bijtanken (als dat tenminste kan). Vervolgens zou men ergens anders heen kunnen gaan, waarvan men hoopt dat daar die vervloekte mensen niet ook al zitten.

Een klein generatieschip met een honderd keer kleinere massa zou kunnen versnellen tot een tienmaal zo hoge snelheid van 1000 km/s, en daarbij even veel kinetische energie verkrijgen als het grote generatieschip. Zo'n klein generatieschip zou dan een massa van 2 miljard ton hebben en bestaan uit 2 gekoppelde cilinders met een rotatiestraal van 1,45 km en een lengte van 1,85 km, of 1 grotere cilinder met een rotatiestraal van 2 km en een lengte van 2,6 km. Hierbij is uitgegaan van een iets minder grote belasting van de cilinder met 3 in plaats van 4 maal de massa van de atmosfeer. Als je er van uitgaat dat een derde van de habitat uit wateroppervlak bestaat levert zo'n klein generatieschip aan bewoonbaar oppervlak 2 maal 11,5 km² of 1 maal 22 km² op. Het grote generatieschip geeft 2 maal 722 km² of 1 maal 1486 km² aan landoppervlak. Daarmee is het bewoonbare oppervlak van een klein generatieschip ongeveer gelijk aan het oppervlak van het eiland Sint Eustachius of het eilandstaatje Nauru (ofwel de helft van het landoppervlak van Schiermonnikoog) en het grote generatieschip is ongeveer gelijk aan het oppervlak van het eiland Rhodos of Gran Canaria (ofwel even groot als de provincie Utrecht). Het snellere kleine generatieschip levert over een afstand van 10 lichtjaar een reistijdbesparing van 27 duizend jaar op ($3 \cdot 10^3$ jaar versus $3 \cdot 10^4$ jaar). Dat lijkt een groot voordeel, maar nog steeds geldt dat vrijwel alle inwoners hun hele leven in het generatieschip moeten verblijven. Voor de inwoners is het daarom van groter belang dat het bewoonbare oppervlak maximaal is voor zoveel mogelijk levensruimte. Wat (behalve de grotere actieradius) wel een voordeel van een klein en sneller generatieschip is, is dat de levensduur van de habitat minder hoog hoeft te zijn voor relatief korte reizen tot zeg maar 100 lichtjaar versus een reis over een afstand van 33 lichtjaar met het grote generatieschip in honderdduizend jaar. Eén van de grootste kwetsbaarheden van een generatieschip is dat door slijtage of ongelukken essentiële onderdelen, zoals de energievoorziening, de lichtpanelen en het MNT draagmateriaal uitvallen of verzwakken en niet meer afdoende gerepareerd kunnen worden, of dat het ecosysteem of de maatschappij catastrofaal ontregeld raken. Een kortere reistijd verlaagt deze kwetsbaarheid, hoewel een generatieschip waarschijnlijk ook als de bestemmingsplaneet is bereikt nog lang moet blijven functioneren voordat dat de planeet bewoonbaar is gemaakt. Een klein generatieschip van 2 miljard ton is echter mager wat betreft de beschikbare ruimte en het is ook twijfelachtiger of daar wel een stabiel ecosysteem tot stand kan komen. Wel heeft het kleine generatieschip als voordeel dat de interne elektriciteitsproductie een factor 68 kleiner gemaakt kan worden ten opzicht van het grote generatieschip, zodat hiervoor maar 12000 tot 34000 ton helium-3 nodig is, voor een reistijd van honderdduizend jaar.

Om een generatieschip een snelheid van 100 km/s of 1000 km/s te geven, kunnen enkele voortstuwingstechnieken overwogen worden. De eerste methode die te binnen schiet is een zonnezeil. Het voordeel van een zonnezeil is dat de zon de energie levert voor de voortstuwing zodat geen eigen energiecentrale gebruikt hoeft te worden. Het blijkt echter dat een zonnezeil zeer groot gemaakt moet worden om de gewenste snelheid te halen. Als je uit gaat van een zonnezeil gemaakt

van een multilaag van grafeen (50 kg/km^2) en een A+2R waarde van 0,9 dan moet de straal van het zonnezeil ongeveer een miljoen kilometer zijn voor een maximale snelheid van 100 km/s voor het grote generatieschip. Zo'n groot zonnezeil is niet erg realistisch en bovendien is nog geen rekening gehouden met de bestuurbaarheid van het zeil. Hiervoor zou waarschijnlijk een aanzienlijke extra massa aan kabels nodig zijn. Om het kleine generatieschip een snelheid van 1000 km/s te geven met een zonnezeil, is een zonnezeil nodig waaraan nog hogere eisen gesteld moeten worden. Dit zeil zal ook ongeveer een straal van een miljoen km moeten hebben maar dan ook nog eens gemaakt moeten zijn van een monolaag van grafeen op voorwaarde dat de A+2R waarde van een monolaag van grafeen hoog genoeg is. Indien het kleine generatieschip maar een snelheid van 100 km/s hoeft te krijgen, volstaat een zonnezeil van een multilaag van grafeen, met een straal van honderdduizend kilometer, wat echter nog steeds onpraktisch groot is. Indien een laser-aangedreven lichtzeil wordt gebruikt kan volstaan worden met een veel kleiner zeiloppervlak, echter voor lage snelheden is deze voortstuwingstechniek erg inefficiënt (tenzij de laserbundel zou kunnen worden hergebruikt). Voor het kleine generatieschip zou een vermogen van 60000 TW nodig zijn dat 158 jaar lang moet worden uitgeoefend voor een eindsnelheid van 1000 km/s , rendementsverliezen buiten beschouwing gelaten. Voor het grote generatieschip zou het laservermogen nog 10 keer zo hoog moeten zijn voor 100 km/s . Hoe het generatieschip moet afremmen is dan ook nog een probleem, want een magnetisch zeil om af te remmen werkt niet erg goed bij een combinatie van relatief lage snelheid en hoge massa. Deze methode is al met al ook niet goed toepasbaar.

Een andere voortstuwingsmethode waarvoor geen eigen energiecentrale nodig is, is een zwaartekrachtsslinger, wel moet dan het ruimteschip eerst in een juiste baan gemanoeuvreerd worden waarvoor een andere propulsie-techniek nodig is. Voortstuwing door een zwaartekrachtsslinger kan werken omdat energie onttrokken kan worden aan de beweging van een planeet of ster (of een ander hemellichaam). Het ruimteschip wordt dan als het ware op sleeptouw genomen door de planeet of ster via zijn zwaartekracht. Via de baan van Jupiter zou bijvoorbeeld 10 km/s snelheidswinst geboekt kunnen worden. Met een heel gunstige vertrektijd zou vervolgens ook nog wat bescheiden snelheidswinst geboekt kunnen worden door een volgende zwaartekrachtsslinger van Saturnus en Uranus of Neptunus, zoals dat mogelijk was met de Voyager missies. Een zwaartekrachtsslinger die de baansnelheid van de zon gebruikt, is in dit geval niet mogelijk omdat het generatieschip zich in het zelfde referentiestelsel bevindt als de zon. Wel kan geprofiteerd worden van het Oberth-effect door een ruimteschip heel dicht langs de zon te manoeuvreren, en dan een versnelling uit te voeren bij de hoge periheliumsnellheid. Zo'n manoeuvre is echter meer iets voor kleine hittebestendige onbemande sondes. Al met al blijft de snelheidswinst met planetaire zwaartekrachtsslingers te bescheiden om van veel nut te zijn voor generatieschepen. Bovendien zal een generatieschip bij voorkeur een lage en langdurige versnelling hebben die continue wordt uitgeoefend, zodat er zo min mogelijk interactie is met de kunstmatige gravitatie van de roterende cilinders. Dit laat zich moeilijk combineren met zwaartekrachtsslingers om zo het ruimteschip extra snelheid te geven.

Dan resteert nog de klassieke methode voor voortstuwing van ruimteschepen met het uitstoten van reactiemassa. Voor het grote generatieschip dat maar 100 km/s hoeft te halen zou een effectieve uitstootsnelheid van de zelfde grootteorde al volstaan. Zo'n effectieve uitstootsnelheid ligt binnen het bereik van een ionenmotor zoals VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket). De benodigde Δv bedraagt 79 km/s maar inclusief afremmen verdubbelt deze Δv tot 158 km/s . Met een effectieve uitstootsnelheid van 100 km/s zou de startmassa van het grote generatieschip uitkomen op 971 miljard ton met 771 miljard ton stuwstof in de vorm van argon, xenon of waterstof. Hoewel het niet onmogelijk zou zijn om zoveel reactiemassa mee te nemen is dit wel erg onpraktisch, alleen al vanwege de daartoe benodigde opslagtanks. Bovendien werkt een ionenmotor zoals VASIMR op

elektriciteit die eerst in een elektriciteitscentrale moet worden opgewekt. Indien de gemiddelde versnelling van een generatieschip op een tamelijk lage waarde van 10^{-5} m/sec^2 gesteld wordt, is toch al gauw minimaal 1000 keer meer vermogen nodig dan voor de interne elektriciteitsvoorziening. Dit soort vermogens zou waarschijnlijk alleen haalbaar zijn met (aneutronische) kernfusie, waarin de koeling efficiënter geregeld kan worden dan in traditionele elektriciteitscentrales. Maar als er toch al kernfusie beschikbaar is, kan het plasma beter direct gebruikt worden voor de voortstuwing zodat niet de omweg nodig zou zijn van elektriciteitsproductie en de vorming van een nieuw plasma ten behoeve van een techniek zoals VASIMR. Omdat de droge massa van een generatieschip al erg groot is, zal de natte massa in het algemeen al helemaal groot zijn. Om wat te bezuinigen op de hoeveelheid reactiemassa en daarmee op grootte van de daartoe benodigde opslagtanks, kan gekozen worden voor een relatief hoge effectieve uitstootsnelheid. Dit zal dan wel meer energie kosten. Eigenlijk bieden alleen kernfusie en antimaterie, technieken waarmee deze hogere effectieve uitstootsnelheden gehaald kunnen worden (met uitzondering van de minder aantrekkelijke opties die een kernsplijtingsfragmentreactor en de project Orion methode die kernsplijtingsbommen gebruikt, bieden). Het gebruik van antimaterie wordt onvoldoende realistisch geacht, zodat alleen kernfusie overblijft, voor de voortstuwing.

Kernfusie kan bereikt worden met magnetische opsluiting, zoals in een tokamak. Daarnaast is traagheidsfusie een optie. Dit laatste type fusie biedt als voorstuwingmethode in een ruimteschip vermoedelijk de minst hoge technologische barrières, en zal als leidraad gebruikt worden voor de voortstuwing van een generatieschip. Een voorbeeld van deze nucleaire puls propulsie is gegeven in het ontwerp van project Daedalus. Dit is nog wel hoofdzakelijk een theoretisch concept. In dit ontwerp wordt gekozen voor pellets van bevroren helium-3 en deuterium die worden verhit en samengeperst door ze te bestralen met elektronen. Het bij de fusie gevormde plasma van geladen deeltjes wordt vervolgens met magneetvelden in de gewenste richting afgebogen. In plaats van elektronen kan ook laserstraling gebruikt worden om de fusiereactie tot stand te brengen. Het zou gunstig zijn indien de lasers of elektronen die de fusiereactie mogelijk maken voor een belangrijk deel gevoed worden met het vermogen dat de traagheidsfusie zelf levert. Anders zou een aparte elektriciteitscentrale bijvoorbeeld via magnetische opsluitingsfusie, al het vermogen moeten leveren dat nodig is voor het opgang brengen van de traagheidsfusie, en is het maximale vermogen van de stuwmotoren daardoor aanzienlijk gelimiteerd. Project Daedalus was bedoeld om met een tweetraps raket een nuttige lading van 500 ton een snelheid van 12% van de lichtsnelheid te geven, met 50000 ton aan helium3+deuterium. Dit zou mogelijk zijn door de hoge effectieve uitstootsnelheid van 10500 km/s. Een generatieschip hoeft niet zo'n hoge snelheid te halen, en zou bijvoorbeeld kunnen volstaan met een effectieve uitstootsnelheid van 500 km/s. Dit kan bereikt worden door het plasma dat bij de kernfusie ontstaat, te verdunnen met reactiemassa in de vorm van waterstof. Dit zou overigens technisch complex kunnen zijn om dat bij dit type kernfusie voor elkaar te krijgen. In totaal is dan 74 miljard ton aan reactiemassa nodig, 40 voor de versnellingsfase en 34 voor de remfase (voor een Δv van $2 \times 79 \text{ km/s}$). Het meeste van de deze reactiemassa is waterstof, de rest helium3+deuterium. De hoeveelheid helium3+deuterium kan berekend worden met de volgende aannamen. 325 TJ per kg He3D (92%) komt vrij ten behoeve van de voortstuwing en ruim 17% van de fusiebrandstof wordt daadwerkelijk gefuseerd de rest gaat verloren in de uitlaatgassen (dit is een tamelijk laag percentage en daarmee ook één van de nadelen van dit type nucleaire puls propulsie). De duur van de versnellingsfase is gesteld op 7 miljard seconden (bijna 222 jaar) zodat de versnelling uitkomt rond de 10^{-5} m/sec^2 . In totaal is dan 100 miljoen ton helium-3 nodig en 67 miljoen ton deuterium. Het effectieve vermogen bedraagt 761 TW voor de versnellingsfase en 611 TW voor de remfase (versus 40 TW voor de eerste trap in project Daedalus) en een stuwkracht van 2 à 3 GigaNewton. Het kleine generatieschip dat versnelt tot 1000 km/s zal ongeveer de zelfde grootte

orde aan massa helium-3+deuterium nodig hebben als het grote generatieschip, hoewel dat ook hier enigszins afhankelijk van de te kiezen effectieve uitstoetsnelheid.

Een bezwaar van helium-3 als brandstof zou kunnen zijn dat het lastig is om dit in grote hoeveelheden te verzamelen uit bijvoorbeeld de atmosfeer van Uranus. Deuterium is minder zeldzaam en eenvoudiger te verzamelen op of relatief dicht bij de aarde bijvoorbeeld in de planetoïdengordel. Het nadeel van deuteriumfusie is dat maar 34% van de energie overgedragen wordt aan geladen deeltjes die gebruikt kunnen worden voor de voortstuwing, de rest gaat zitten in neutronenstraling. Het vrijkomen van neutronen maakt het gebruik van een stralingsafscherming en koeling met radiatoren noodzakelijk. In het ontwerp van project Daedalus was dit niet nodig omdat aangenomen was dat het kleine beetje van de fusie-energie dat vrijkomt als neutronen geabsorbeerd zou worden door het plasma. Ook zou de röntgenstraling maar beperkt blijven, zodat er maar een klein deel (minder dan 1%) van het vermogen dat bij de fusie vrijkomt, als stralingsvermogen zou weglekken richting het ruimteschip. De reactiekamer zelf zou daarom al voldoende zijn om als radiator te functioneren, en de warmtestraling van de reactiekamer zou met een eenvoudige spiegel kunnen worden weerkaatst om de rest van de raket hiertegen te beschermen. Bij een ruimteschip dat wordt aangedreven met D-D fusie, zou daarentegen meer dan de helft van het vermogen dat vrijkomt bij de fusie als reststraling in alle richtingen verspreid worden. Voor de voorgestelde generatieschepen zou het kunnen gaan om honderden terawatts. Niet al dit vermogen wordt gestraald richting het ruimteschip, maar toch nog voldoende om een vervelend probleem te vormen. Neutronenstraling kan geabsorbeerd worden met lichte elementen zoals waterstof en lithium. Röntgenstraling en gammastraling kunnen geabsorbeerd worden met een stralingsscherm gemaakt van wolfram. De warmte die daarbij ontstaat kan vervolgens afgevoerd worden met radiatoren waarin een speciale koelvloeistof wordt gecirculeerd. In het geval dat het plasma wordt verdund met waterstof om voor het zelfde vermogen meer stuwkracht te genereren, zou het misschien mogelijk zijn om het grootste deel van de neutronen al in het plasma te absorberen. Voor nu zal aangenomen worden dat in een generatieschip de benodigde stralingsafscherming en koeling wel geregeld kan worden omdat er in de grote massa van de niet roterende beschermhuls nog wel een flinke marge zit om voor dit doel te gebruiken, zie <http://www.icarusinterstellar.org/starship-radiators> voor wat meer achtergrondinformatie.

Een ruimteschip dat deuterium gebruikt als brandstof is eerder wel eens voorgesteld. Een voorbeeld van zo'n ontwerp is het Enzmann schip dat ook nucleaire puls propulsie gebruikt en daarvoor drie miljoen ton bevroren deuterium als fusiebrandstof ter beschikking heeft. Een meer moderne variant daarvan is het Ghost-schip dat voorgesteld is in Project Icarus: <https://www.nextbigfuture.com/2014/04/ghost-ship-nuclear-fusion-spaceship.html> . Eén van de innovaties toegepast in het ontwerp van het Ghost-schip is het gebruik van de neutronenstraling die vrij komt bij de D-D fusie voor het aandrijven van de lasers die nodig zijn voor het opwekken van de fusiereactie. Toegepast op het voorgestelde generatieschip van 200 miljard ton droge massa en bij de zelfde effectieve uitstoetsnelheid (500 km/s) en totale hoeveelheid reactiemassa (74,3 miljard ton) zou de brandstof bestaan uit 668 miljoen ton deuterium, de rest van de reactiemassa zou gewoon waterstof zijn, voor wederom een Δv van 2×79 km/s. Er is nu 4 keer zo veel deuterium nodig als helium-3/deuterium omdat de nuttige energie per kg brandstof vier keer zo laag is (aangenomen dat de efficiëntie van de traagheidsfusie gelijk is aan die van helium-3 met deuterium).

Aangezien deuterium niet zo zeldzaam is als helium-3 zou overwogen kunnen worden om te kiezen voor een hoog percentage deuterium in de totale reactiemassa of om zelfs alle reactiemassa te laten bestaan uit deuterium bij een gelijkblijvende totale hoeveelheid reactiemassa, zodat de effectieve uitstoetsnelheid aanzienlijk hoger wordt. Op deze manier zou het grote generatieschip een veel

hogere snelheid kunnen halen dan 100 km/s. De versnelling en stuwkracht worden gelijk gehouden, zodat de hogere snelheid gehaald wordt door een langere versnellingsfase en een hogere effectieve uitstootsnelheid. Als de effectieve uitstootsnelheid wordt verhoogd met een factor 4 tot 2000 km/s nemen de duur van de versnellingsfase en het vermogen ook met een factor 4 toe. De benodigde energie neemt dan met een factor 16 toe. 16 keer meer energie wordt dan geleverd door 10,7 miljard ton deuterium. De overige 63,6 miljard ton reactiemassa is gewoon waterstof. De Δv bedraagt dan 316 km/s ($2000 \cdot \ln(274,3/234,2)$) en de maximale snelheid 343 km/s. Indien alleen maar deuterium gebruikt wordt (in totaal 74,3 miljard ton), bedraagt de effectieve uitstootsnelheid de helft van de effectieve uitstootsnelheid van de He3/D reactie (want deze is evenredig aan de vierkantswortel uit de energiedichtheid), ofwel 5250 km/s. De Δv komt dan uit op 829,5 km/s ($5250 \cdot \ln(274,3/234,2)$) en de maximale snelheid 858 km/s. Daarmee nemen zowel het vermogen als de duur van de versnellingsfase toe met een factor 10,5. Vooral de toename van het vermogen tot 7580 TW zou een probleem kunnen worden, want ongeveer een zelfde vermogen gaat als grotendeels niet nuttige straling alle richtingen op. Dit zou tot serieuze koelingsproblemen kunnen leiden, ook al omdat er nu geen extra waterstof aan het plasma is toegevoegd, dat neutronen zou kunnen absorberen. Het vermogen zou nog wel wat verlaagd kunnen worden zodat de versnelling kleiner wordt en de versnellingsduur toeneemt. Veel marge zit daar echter niet in want de versnelling is met 10^{-5} m/sec² al behoorlijk laag gekozen.

Vanwege de mogelijke koelingsproblemen die bij D-D fusie kunnen ontstaan, is het misschien toch het overwegen waard om He3/D fusie te gebruiken om het grote generatieschip een aanzienlijk hogere snelheid dan 100 km/s te geven. Helium-3 is weliswaar lastiger te verzamelen, maar er is op zich genoeg helium-3 in de gasreuzen. Eén van de voordelen van deuterium zou zijn dat het in de planetoïdengordel gewonnen kan worden, en dat het extractieproces relatief eenvoudig is. Maar zoveel deuterium is er nu ook weer niet in de planetoïdengordel. Ceres zou voor 20% uit water bestaan. Geschat kan worden dat Ceres dan ongeveer 7000 miljard ton deuterium bevat. De rest van het waterrijke deel van de planetoïdengordel zou ongeveer evenveel deuterium kunnen bevatten. Deuterium zou vooral als fusiebrandstof in aanmerking komen als er haast is met de missie die men voor ogen heeft, omdat het makkelijk op en nabij de aarde te verzamelen is. De winning van grote hoeveelheden helium-3 vereist eerst een verregaande industrialisatie van ook de verder weggelegen delen van het zonnestelsel. Voor een generatieschip is er echter niet zo veel haast. Voordat een generatieschip vertrekt moet eerst de bestemmingsplaneet bekend zijn. Om de bestemmingsplaneet te selecteren zijn eerst onbemande missies nodig om voldoende details te achterhalen van planeten die in aanmerking komen. Deze missies zouden al snel enkele millennia in beslag nemen. Ook het tot stand brengen van stabiel ecosysteem in een generatieschip zou een lange ontwikkelingstijd kunnen hebben. De winning van miljarden tonnen helium-3 uit de atmosfeer van Uranus en Neptunus, is over een tijdsbestek van duizenden jaren, misschien niet eens zo heel erg hoog gegrepen. Wel zal de verleiding groot zijn, om het gewonnen helium-3 in de tussentijd voor andere doelen te gebruiken. De discipline die nodig is om heel veel helium-3 te bewaren voor een project in een verre toekomst, is groot. Een soortgelijk fenomeen is bespeurbaar op de aarde met de niet al te grote helium-4 voorraad. Helium is belangrijk als koelmiddel voor krachtige supergeleiders. Deze krachtige supergeleiders kunnen later van groot belang zijn voor de werking van kernfusiecentrales. Veel helium wordt nu echter tegen een lage prijs verkocht voor gebruik in feestballonnen. Het helium dat eenmaal ontsnapt is in de atmosfeer ben je ook echt kwijt, want het ontsnapt dan ook aan de zwaartekracht van de aarde. Om te voorkomen dat zulk onzorgvuldig gebruik van zeldzame grondstoffen ook ten deel zal vallen aan helium-3, zouden van te voren bepaalde afspraken gemaakt kunnen worden. Zo zou je Uranus kunnen reserveren voor korte termijn gas-mijnbouw voor

(commerciële) toepassingen vooral binnen het zonnestelsel, en Neptunus alleen voor gas-mijnbouw voor mondiaal goedgekeurde lange termijnprojecten die vooral interstellair zullen zijn.

Er is minimaal 10,5 miljard ton He3/D nodig om het grote generatieschip een snelheid van 1000 km/s te geven (en ook om weer af te remmen), als uitgegaan wordt van de eerder genoemde rendement van deze vorm van nucleaire puls propulsie. Er dient dan echter een onpraktisch grote hoeveelheid reactiemassa gebruikt te worden van 784 miljard ton. Als gebruik gemaakt wordt van 74,3 miljard ton reactiemassa (zoals in de eerder gegeven voorbeelden) loopt de benodigde hoeveelheid He3/D om 1000 km/s te halen op, tot 25,3 miljard ton. Het nuttig vermogen van de stuwmotoren stijgt dan tot 10840 TW in de versnellingsfase. Als alleen maar He3/D pellets gebruikt worden, zonder enige latere verdunning van het plasma (bijvoorbeeld omdat dat technologisch te lastig is) zou in totaal 40,3 miljard ton He3/D nodig zijn, ofwel 24,2 miljard ton He3 en 16,1 miljard ton D. Het nuttig vermogen van de stuwmotoren heeft daarbij een waarde gekregen van 16758 TW in de versnellingsfase. Voor dit soort hoge vermogens zal het waarschijnlijk wel nodig zijn dat de traagheidsfusie zelf het overgrote deel van het vermogen levert voor de lasers die de fusiereacties opwekken. Het zou al redelijk geslaagd zijn indien de traagheidsfusie 100 keer meer vermogen oplevert dan er aan laservermogen ingestopt wordt, maar eigenlijk zou je dat liever nog een orde hoger hebben. In het concept van het Ghost-schip worden de lasers gevoed met neutronen die bij de D-D fusie ontsnappen aan het plasma, maar dat kan niet bij He3/D fusie. Misschien is het wel mogelijk om met een paar traagheidsfusie-eenheden die draaien op lasers die gevoed worden met de interne elektriciteitsvoorziening alleen stroom op te wekken, en die stroom te gebruiken voor de overige lasers die de traagheidsfusie-eenheden aandrijven ten behoeve van de voortstuwing. Anders wordt het maximale vermogen van de stuwmotoren sterk gelimiteerd door het maximale vermogen van een aparte elektriciteitscentrale die werkt met magnetische opsluitingsfusie (waarbij men dan wel eens aangewezen zou kunnen zijn op deuterium en tritium) zoals bijvoorbeeld ook voor de interne elektriciteitsvoorziening gebruikt zou kunnen worden. Als het überhaupt al mogelijk is om de vereiste hoge vermogens te halen zal met het gebruik van de geschetste enorme hoeveelheden nucleaire brandstof vermoedelijk wel de grens bereikt zijn, van wat voor een groot generatieschip haalbaar is. De actieradius van het grote generatieschip zou daarbij opgelopen zijn tot 333 lichtjaar bij een reistijd van honderdduizend jaar, zodat ook voor het grote generatieschip dan ongeveer 50000 K/G sterren binnen bereik zouden liggen. Er is behalve het gebruik van veel fusiebrandstof en hoge vermogens nog één andere manier waarop het grote generatieschip zijn actieradius kan verlengen tot 333 lichtjaar, namelijk de verlenging van de reistijd bij een snelheid veel lager dan 1000 km/s. In een extreem geval zou dit een snelheid van 100 km/s zijn bij een reistijd van een miljoen jaar. Omdat de maximale reistijd vertienvoudigd is, is ook tien keer zo veel energie nodig voor de interne elektriciteitsproductie. Het zou dan gaan om 14 miljoen ton He3D of 38 miljoen ton LiD en daarnaast 167 miljoen ton He3/D als fusiebrandstof voor versnellen en afremmen. De minimale hoeveelheid fusiebrandstof voor versnellen tot 100 km/s en afremmen is 70 miljoen ton He3/D, maar daar is wel 771 miljard ton reactiemassa voor nodig in plaats van maar ongeveer 10% daarvan. Dat is een behoorlijke besparing aan fusiebrandstof die zal moeten worden afgezet tegen de nadelen van een aanzienlijke verlenging van de reistijd. Uiteraard is het de vraag of de geschetste kernfusie voor elektriciteitsproductie en voortstuwing van een ruimteschip, überhaupt wel mogelijk is. Misschien blijft kernfusie toch te weerbarstig om hiervoor voldoende gecontroleerd te kunnen gebruiken. Het zou ook kunnen dat nucleaire puls propulsie volgens de methode Daedalus of Icarus toch niet de juiste weg is, en dat er meer toekomst is voor magnetische opsluitingsfusie of een hybridevorm van beide soorten kernfusie.

5. Conclusie.

Supersterke op koolstof gebaseerde materialen kunnen de basis vormen van grote koepels als toevluchtsoord voor mensen zowel op de aarde als op de Maan of Mars, maar zij hebben nogal wat beperkingen en kwetsbaarheden. Als je dan toch niet voor de eeuwigheid op de aarde vastgeklonken wil zitten, zou dit zelfde supersterke materiaal de basis kunnen vormen van een 'kleine' roterende ruimtehabitat met een rotatiestraal van 11,5 km. Zo'n ruimtehabitat zou de sleutel voor de toekomst van de mensheid buiten de aarde kunnen zijn, omdat het de opmaat kan zijn tot de totstandkoming van middelgrote ruimtehabitats die ongeveer drie keer zo groot zijn als Nederland, of eventueel zelfs groter. Als dat niet mogelijk blijkt, zou zo'n kleine roterende ruimtehabitat nog wel aan de basis kunnen staan van een generatieschip. Zo'n groot generatieschip van ongeveer 200 miljard ton zou een actieradius kunnen hebben tussen de 33 en 333 lichtjaar binnen een reistijd van honderdduizend jaar, oplopend (als het tegen zit) tot een miljoen jaar. Het leven in zo'n generatieschip zal zo comfortabel kunnen zijn dat het voor de bemanning van een paar duizend mensen niet veel uitmaakt of ze onderweg zijn naar een andere ster of gewoon in het zonnestelsel blijven. Ook zou er in het schip per inwoner meer ruimte zijn dan voor de meeste mensen in hun huidige woonregio op de aarde. Zo'n generatieschip zou eerder gemaakt worden omdat het kan dan omdat het moet. Maar als het moet en je moet er dan nog aan beginnen dan kan het vermoedelijk niet meer. Alternatieven voor deze activiteiten zijn terravorming van Mars en snelle interstellaire ruimtevaart bijvoorbeeld met laser-voortgestuwde ruimteschepen. Deze alternatieven stuiten echter volgens de huidige inzichten op grote bezwaren en beperkingen.

Mark Copijn, 21-03-2020