

Rapport

Auteur
Jos Houben

Versie
1.0

Aanmaakdatum
10.03.2014

Laatste wijziging
29.03.2016

MAXergy

IMDEP

*Innovatieve (materiaal-)concepten voor
duurzame en energieleverende producten
in de gebouwde omgeving van morgen*

"De gebouwschil van de toekomst"

Activiteit 2.1

2.1.12 MAXergy berekeningen SWB5G
t.o.v. hout, staal en aluminium

Balken uit Hout-Bamboe-Staal-Aluminium

Voorwoord

Aan onderliggend rapport hebben een aantal IMDEP¹ deelstudies ten grondslag gelegen. Daar dit rapport openbaar gemaakt zal worden, zijn voor de volledigheid delen van voornoemde studies hier, letterlijk dan wel enigszins aangepast, wederom opgenomen.

In voornoemde deelstudies is de MAXergy versie 0.9 gebruikt. Onderliggend onderzoek is hoofdzakelijk gebaseerd op een doorontwikkeling van versie 1.1.2. Inmiddels is al versie 2.0 verschenen met een iets andere insteek. Voor onderliggend onderzoek geeft dit geen verschil.

¹ IMDEP = Innovatieve (Materiaal-)concepten voor Duurzame en Energieleverende Producten in de gebouwde omgeving van morgen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Inhoudsopgave	4
Figurenlijst	6
Tabellenlijst	7
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doelstelling	10
1.3 Afbakening	11
1.4 Leeswijzer	11
2 Embodied Land	12
2.1 Inleiding	12
2.2 Principe berekening	13
3 Conversion factor f	15
3.1 Afleiding formules	15
3.2 Orde of niveau	19
3.3 f -waarden	19
4 Basiswaarden voor EL_{Direct} & EE	21
4.1 Transport	21
4.2 Aardolie	21
4.3 Aardgas	22
4.4 Fenol-Formaldehyde (PF)	22
4.5 Melamine-Ureumformaldehyde (MUF)	23
4.6 Bio-olie, gas, lijmen en harsen	24
5 EL_{Direct} & EE - Materialen	27
5.1 Houten balk	27
5.2 Gelamineerde houten balk	29
5.3 <i>Strand Woven Bamboo</i> van de 5 ^{de} generatie (SWB5G)	31
5.4 Gelamineerde SWB5G (LSWB5G)	33
5.5 Staal	34
5.6 Aluminium	36
5.7 Samenvatting EL per kg materiaal	39

6	Balkberekeningen	40
6.1	Inleiding	40
6.2	Algemene informatie	40
6.3	Geometrie Luifel	41
6.4	Resultaten statische berekeningen	42
6.5	<i>Embodied Land</i> per balk	43
7	Conclusies en aanbevelingen	46
8	Slotopmerking	47
9	Referenties	48
 BIJLAGEN		 51
I.	Afschatting operationeel landgebruik Biomassa centrales	52
II.	<i>Estimation of raw materials for Phenol-Formaldehyde</i>	53
III.	<i>Estimation of raw materials for Melamine-UreumFormaldehyde</i>	55
IV.	<i>Strand Woven Bamboo of the 5th Generation</i>	56
IV.1	EL _{Direct}	56
IV.2	EL _{Indirect}	57
V.	Glulam – volumeverlies & benodigde lijm	59
VI.	Gelamineerde SWB5G – volumeverlies & benodigde lijm	61
VII.	Mechanische eigenschappen SWB5G	62
VIII.	Doorbuiging Houten Liggers Eurocode 5 versus NB	65
IX.	Afschuifvervorming	69
X.	Beams in canopy Econnect	70
X.1	Information, Geometry, Loads and Deflections	70
X.2	Glulam	72
X.3	LSWB5G (without creep)	76
X.4	LSWB5G (with creep)	78
X.5	Steel	80
X.6	Aluminium	82
X.7	Embodied Land	84
X.8	Conclusions	87
XI.	Selectie staalprofielen met minimaal materiaalgebruik	88

Figurenlijst

Figuur 2-1: Schematisch overzicht van de elementen waar de <i>Embodied Land</i> uit bestaat.	12
Figuur 2-2: Opbouw berekening <i>Embodied Land</i> indicator voor onderliggend onderzoek.	13
Figuur 6-1: Normale verdelingen van de EL-waarden voor de balken van Econnect bestaande uit Hout (fictief), Glulam _{Bio} en LSWB5G _{Bio} , Levensduur 50 jaar.....	45
Figure II-1: On-site (gate-to-gate) system boundary for resin production.....	53
Figuur II-2: Cracking, isomerisation and reforming of crude oil.....	53
Figuur V-1: Geometrie vingerlas.....	59
Figuur VII-1: Buigsterkte en elasticiteitsmodulus van 20 mm dikke vlonderdelen SWB5G (EN310), met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³ (opgave BUCO-Import).	62
Figuur VII-2: Hoogtefactoren voor hout en gelamineerd hout uit [26] en voor LVL uit [30], zie ook [33], tabel 2.11.	63
Figuur VII-3: Hoogtefactor voor LSWB5G.....	64
Figuur X-1: Normal distributions of the EL for the beams at Econnect for Wood, Glulam _{Bio} and LSWB5G _{Bio} , Lifespan 50 years.	86
Figuur XI-1: Traagheidsmoment (I_y) en weerstandsmomenten (W_y) in relatie tot het oppervlak (A) voor 304 Europese staalprofielen.	88
Figuur XI-2: I_y/A en W_y/A voor 95 gunstige Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.	89
Figuur XI-3: Lijst met 95 gunstige Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.....	89
Figuur XI-4: I_y/A en W_y/A voor de 49 gunstigste Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.	90
Figuur XI-5: De 49 gunstigste Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.....	91

Tabellenlijst

Tabel 4-1: $EE_{Transportation\ Energy}$	21
Tabel 4-2: Overzicht EL waarden voor Fenol-formaldehyde (PF).....	23
Tabel 4-3: Overzicht EL waarden voor Melamine-ureumformaldehyde (MUF).	24
Tabel 4-4: EL_{Direct} voor pyrolyse bio-olie uit populieren.	25
Tabel 4-5: EL_{Direct} voor biogas uit populieren.	25
Tabel 4-6: EL_{Direct} (fictief) voor PF en MUF gebaseerd op biomassa.	26
Tabel 4-7: $EE_{Production\ Energy}$ voor pyrolyse bio-olie uit populieren.	26
Tabel 4-8: $EE_{Production\ Energy}$ (fictief) voor PF en MUF gebaseerd op biomassa.....	26
Tabel 5-1: EL_{Direct} voor Europees en Nederlands vuren, sterkteklasse C18.....	27
Tabel 5-2: EL_{Direct} voor vuren hout, kwaliteit C18.	28
Tabel 5-3: EE voor gezaagd hout volgens de ICE database.	28
Tabel 5-4: $EE_{Production\ Energy}$ voor vuren hout, kwaliteit C18.	28
Tabel 5-5: EL_{Direct} voor Glulam met MUF, kwaliteit GL2oh.....	29
Tabel 5-6: EL_{Direct} voor Glulam met Bio-MUF, kwaliteit GL2oh.....	29
Tabel 5-7: EE voor Glulam volgens de ICE database.	29
Tabel 5-8: $EE_{Production\ Energy}$ voor Glulam, kwaliteit GL2oh.	30
Tabel 5-9: $EE_{Production\ Energy}$ voor Glulam met Bio-MUF, kwaliteit GL2oh.....	30
Tabel 5-10: $EE_{Production\ Energy}$ voor het vingerlassen, lamineren en productie van de lijmen bij Glulam met MUF.....	30
Tabel 5-11: $EE_{Production\ Energy}$ voor het vingerlassen, lamineren en productie van de lijmen bij Glulam met Bio-MUF.	30
Tabel 5-12: EL_{Direct} van SWB5G uit 40 mm dikke platen met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	31
Tabel 5-13: EL_{Direct} van SWB5G voor gelamineerde balken uit 45 mm dikke platen met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	32
Tabel 5-14: $EL_{Indirect}$ van SWB5G platen met PF inclusief transport naar België, 40 mm dik en voor gelamineerde balken 45 mm dik.	33
Tabel 5-15: $EL_{Indirect}$ van SWB5G platen met Bio-PF inclusief transport naar België, 40 mm dik en voor gelamineerde balken 45 mm dik.	33
Tabel 5-16: EL_{Direct} voor LSWB5G met PF en MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	34
Tabel 5-17: EL_{Direct} voor LSWB5G met Bio-PF en Bio-MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	34
Tabel 5-18: $EE_{Production\ Energy}$ voor LSWB5G met PF en MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	34
Tabel 5-19: $EE_{Production\ Energy}$ voor LSWB5G met Bio-PF en Bio-MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m ³	34
Tabel 5-20: EL_{Direct} voor staal	35
Tabel 5-21: EL_{Direct} voor stalen balken.....	35

Tabel 5-22: EE voor staal, algemeen en voor profielen of <i>sections</i> (ICE)	35
Tabel 5-23: $EE_{Production\ Energy}$ voor stalen balken	36
Tabel 5-24: $EE_{Compensation\ Energy}$ voor stalen balken	36
Tabel 5-25: EL_{Direct} voor aluminium productie.....	37
Tabel 5-26: EL_{Direct} voor aluminium balken	37
Tabel 5-27: EE voor aluminium, algemeen en voor geëxtrudeerde profielen (ICE)	37
Tabel 5-28: $EE_{Production\ Energy}$ voor aluminium balken	38
Tabel 5-29: $EE_{Compensation\ Energy}$ voor aluminium balken.....	38
Tabel 5-30: Samenvatting EL- en EE-waarden per kg materiaal voor Glulam, LSWB5G, staal en aluminium.....	39
Tabel 6-1: Resultaten berekeningen luifelbalken van Glulam, LSBW5G, staal en aluminium.	42
Tabel 6-2: $EL_{Indirect}$ per kg materiaal op de bouwplaats.	43
Tabel 6-3: EL per balk.	44
Tabel 6-4: EL voor een houten balk C18, levensduur 50 jaar (geen reële waarde, alleen om te vergelijken).	44
Table 6-5: EL [m^2] voor Hout (fictief), Glulam _{Bio} , en LSBW5G _{Bio} , Levensduur 50 jaar, Normale verdeling.	45
Tabel I-1: Operationeel landgebruik Biomassa centrales	52
Tabel IV-1: <i>Yields</i> Moso bamboe voor de productie SWB5G.....	56
Tabel IV-2: Gemiddelde, SD en COV voor de <i>yields</i> Moso bamboe voor de productie SWB5G.....	56
Tabel IV-3: Overzicht $EL_{Indirect}$ voor SWB5G platen van 40 mm dikte en transport naar België.....	57
Tabel IV-4: Calculation $EL_{Indirect}$ SWB5G, including transportation to Belgium.....	58
Table X-1: Minimum dimensions for different strength classes Glulam (precamber=10 mm).....	75
Table X-2: Minimum dimensions for different strength classes regular wood (only for comparison reasons, they have no practical value).....	75
Tabel X-3: Strength classes related to grades for British grown timber according to Porteous, et al. [33].....	75
Tabel X-4: Embodied Land - Indirect.	84
Tabel X-5: Embodied Land.	85
Tabel X-6: Embodied Land for Wood C18, lifespan 50 years (only for comparison reasons).	85
Table X-7: EL [m^2] for Wood, Glulam _{Bio} , and LSBW5G _{Bio} , Lifespan 50 years, Normal distribution.	86

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van IMDEP zijn materiaalconcepten ontwikkeld voor de gebouwschil in Nederland van 2020 met geïntegreerde PV modules en duurzame producten. Na een aantal deelstudies is de behoefte ontstaan voor een gefundeerdere vergelijking tussen de verschillende materialen welke gebruikt kunnen worden voor dragende elementen in de gebouwschil.

Selectie tussen de verschillende materialen vindt plaats middels de *Embodied Land* (EL^{2,3}) indicator volgens de MAXergy⁴ methodologie, zie Rovers [34]. In Rovers [36] is de aanzet gegeven voor MAXergy met uitleg over de principes en de uitgangspunten, een gedetailleerde beschrijving van de berekeningen, eerste aannames en gebruikte gegevens. In de vervolgstudies zijn een aantal aannames en gebruikte gegevens verder aangescherpt.

Zo is in Houben [7] een aantal mogelijke materialen voor de dragende elementen in de gebouwschil met elkaar vergeleken. Voor een dakbalk is dit gedaan voor hout, gelamineerde bamboe (Moso⁵) en *Strand Woven Bamboo* (SWB⁶), zowel de eerste generatie als de laatste 5^{de} generatie (SWB5G⁷). Voor een nokbalk is hier tevens staal aan toegevoegd. Aluminium balken zijn in die studie niet berekend en zullen in onderliggend rapport wel meegenomen worden. Uit [7] blijkt dat voor eenzelfde constructieve functie in de gebouwschil hout als ook SWB5G de minste EL nodig hebben. Bij die studie zijn de gevolgen van de gebruikte harsen en lijmen op de EL nog niet meegenomen.

² *Embodied Land* = gezamenlijke indicator waarin zowel het land nodig voor het produceren van bouwproducten als ook de benodigde energie hiervoor is uitgedrukt in jaar oppervlak land per bouwproduct totaal in [m²·jaar of ha·jaar] voor het vervullen van een bepaalde functie of omgerekend per kg bouwproduct in [m²·jaar/kg of ha·jaar/kg].

³ EL bestaat uit EL_{Direct} en EL_{Indirect}. EL_{Direct} is het directe landgebruik wat nodig is voor bijv. het groeien van bomen voor de houten balken of de ijzerertsmin voor stalen balken. EL_{Indirect} is de benodigde energie omgerekend naar landgebruik. In de praktijk zijn dit cijfers voor de *Embodied Energy* bestaande uit *Production Energy*, *Compensation Energy* (energie nodig om metaal ionen uit zeewater te halen), *Recycling Energy* en *Transportation Energy*. In plaats van de term *Compensation Energy* is in het verleden ook wel de term *Return Energy* gebruikt.

⁴ <http://www.sustainablebuilding.info/maxergy/>

⁵ Moso = *Phyllostachys heterocycla pubescens* AKA *Phyllostachys edulis*.

⁶ SWB wordt in China gemaakt door Moso latjes iets te verbrijzelen, met hars in een mal te persen en te bakken.

⁷ Bij SWB5G worden niet eerst latjes gezaagd uit de ronde bamboe halmen met als gevolg veel materiaalverlies, maar wordt de gehele halm in een keer gebruikt.

Dit is voor de gebruikte hars in SWB5G (Fenol-Formaldehyde) voor diverse gradaties verder onderzocht in Zindel-Manders, et al. [41]. Tevens is hier de invloed van het transport op de EL bekeken en is getracht de bestaande grote bandbreedte bij met name hout in kaart te brengen dan wel te verkleinen.

Uit [41] blijkt dat wanneer lijmen of harsen gebaseerd op aardolie gebruikt worden de EL aanzienlijk omhoog schiet en binnen de MAXergy gedachte alleen bio-lijmen of bio-harsen reële alternatieven zijn. De lijmen gebruikt bij gelamineerd hout zijn in die studie nog niet meegenomen wat wel in onderliggend rapport zal gebeuren. Meer algemeen blijkt uit [41] dat wanneer er sprake is van *Compensation Energy* (zoals bij metalen als staal en aluminium e.d.) de EL zo groot wordt dat alle andere bijdragen in de totale EL verwaarloosbaar worden. Verder blijkt dat transport maximaal 10% bedraagt van de energie nodig voor de totale productie.

Met betrekking tot het onderzoek naar de bandbreedtes bij hout kan gemeld worden dat de hoeveelheid beschikbare bronnen op het moment nog zeer beperkt is en dat de bestaande bronnen een grote spreiding vertonen. De EL voor hout is hoofdzakelijk afhankelijk van EL_{Direct} welke per lokale leverancier sterk kunnen verschillen. De reden ook waarom in Rovers [34] wordt gesteld dat de EL cijfers lokaal bepaald dienen te worden. In een toekomstige ideale situatie zou per product de EL cijfers door de leverancier verstrekt moeten worden.

Zoals al gemeld bestond de behoefte om voornoemde deelstudies aan te vullen. Zo zullen constructieve balken gemaakt van de materialen hout, SWB5G, staal en aluminium in onderliggend rapport dieper onderzocht worden. Voor hout en SWB5G geldt nog dat deze in gelamineerde vorm uitgevoerd kunnen worden.

Tevens zullen nieuwe gegevens met betrekking tot de EL verwerkt worden. Zo zijn nieuwe gegevens bekend van SWB5G en bij gelamineerd hout worden nu ook het materiaalverlies bij de productie en de invloeden van de gebruikte lijm betrokken.

Voor de mechanische eigenschappen van SWB5G is in onderliggende studie gebruik gemaakt van de gegevens van de importeur, BUCO-Import te België. Inmiddels zijn o.a. in het MAL (*Materials Application Lab*) van Zuyd meerdere testen uitgevoerd (Houben [9]). De waarden daar zijn voor de stijfheid gelijk maar voor de sterkte ongeveer 5% lager. Daar het hier voorlopige tussenresultaten betreft en de LSWB5G op stijfheid (doorbuiging) gedimensioneerd zullen worden, zijn deze waarden in onderliggende studie niet meer aangepast.

1.2 Doelstelling

Doel van onderliggend onderzoek is voor dragende balken gemaakt van hout, *Strand Woven Bamboo* van de 5^{de} Generatie, staal en aluminium in kaart te brengen wat de

gevolgen zijn op de *Embodied Land* van die balken en daarmee de beste materiaalkeuze mogelijk te maken volgens MAXergy.

De dimensionering van balken gemaakt van de verschillende materialen heeft geen directe relatie met de EL van de gebruikte materialen, alleen met de mechanische eigenschappen van het materialen en de te hanteren constructieve normen (Eurocodes). De EL van de verschillende materialen liggen op dit moment nog niet eenduidig vast en zullen in de toekomst zeker nog bijgesteld gaan worden. Zeker wanneer rekening wordt gehouden met verschil in locaties en leveranciers. Er is daarom besloten om deze twee berekening van elkaar te scheiden. Hierdoor wordt het in de toekomst mogelijk om voor eenzelfde constructieve situatie en een andere of vernieuwde EL voor het materiaal, vrij vlug de verbeterde EL van het constructief element te bepalen.

1.3 Afbakening

Ook al worden in de desbetreffende hoofdstukken de grenzen aangegeven, toch is het verduidelijkend om hier al iets te zeggen over het toepassingsgebied van onderliggend onderzoek.

Er worden alleen liggers op 2 steunpunten beschouwd voor de Nederlandse situatie, dus wordt bij de constructieve berekeningen alleen rekening gehouden met de Nederlandse Nationale Bijlagen. Voor andere landen kunnen de resultaten afwijken.

Tevens zullen gemiddelde cijfers voor de EL gebruikt worden, aangevuld met mogelijke bandbreedtes indien bekend.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 komt het principe van de *Embodied Land* berekening aan de orde. Een belangrijke grootte hierbij is de *conversion factor* f welke in hoofdstuk 3 wordt behandeld. Verder komen in hoofdstuk 4 de basiswaarden aan de orde en waar deze vandaan komen of hoe ze berekend zijn. En uit deze basiswaarden volgen de waarden voor de diverse materialen in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 zijn voor de diverse balken de daadwerkelijke EL berekeningen te vinden. Vervolgens de conclusies in hoofdstuk 7, slotopmerkingen in hoofdstuk 8 en de referenties in hoofdstuk 9.

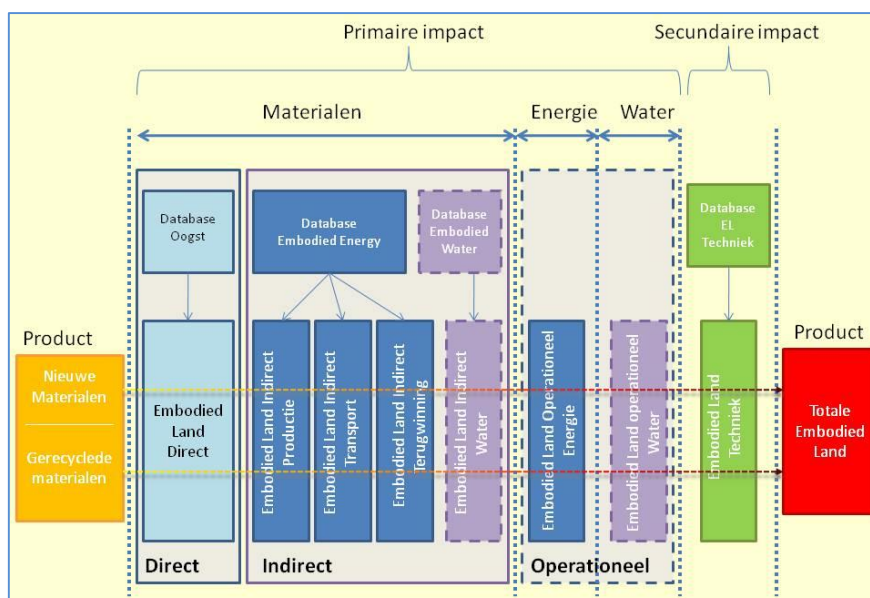
Als laatste zijn de bijlagen opgenomen. In bijlage X zijn de gehele berekeningen voor de balken bestaande uit de 4 materialen opgenomen voor een luifelbalk bij het gebouw Econnect op DWvM⁸.

⁸ DWvM = De Wijk van Morgen, European Science and Business Park Avantis te Heerlen/Aken

2 Embodied Land

2.1 Inleiding

Een MAXergy berekening resulteert in één cijfer voor energie- en materiaalverbruik samen bij het vervullen van een bepaalde functie waardoor het mogelijk wordt verschillende producten (of groepen producten) voor die functie met elkaar te vergelijken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de *Embodied Land* indicator wat een rekengrootheid is waar het direct benodigde landoppervlak voor materialen en dus producten, als ook de omgerekende energievraag bij de productie en transport maar ook het gebruik hiervan, is meegenomen. De functie van de indicator is het kunnen vergelijken, hij kan niet worden gebruikt om het werkelijk benodigde landoppervlak te bepalen. De uiteindelijke dimensie van de EL is [ha]: het oppervlak aan land wat men nodig heeft voor een product (of groep van producten) zodat de natuur, gedurende de levensduur van dat product, zich kan herstellen. Door het onafhankelijk maken van de levensduur volgt voor de dimensie [ha-year]. Per kg materiaal is dat dan [ha-year/kg] of [m²·year/kg]. Uiteindelijk kan het per functie worden uitgedrukt: bijv. per m² vloer [ha-year/m² vloer]. De *Embodied Land* indicator is als volgt opgebouwd (Rovers [36]):

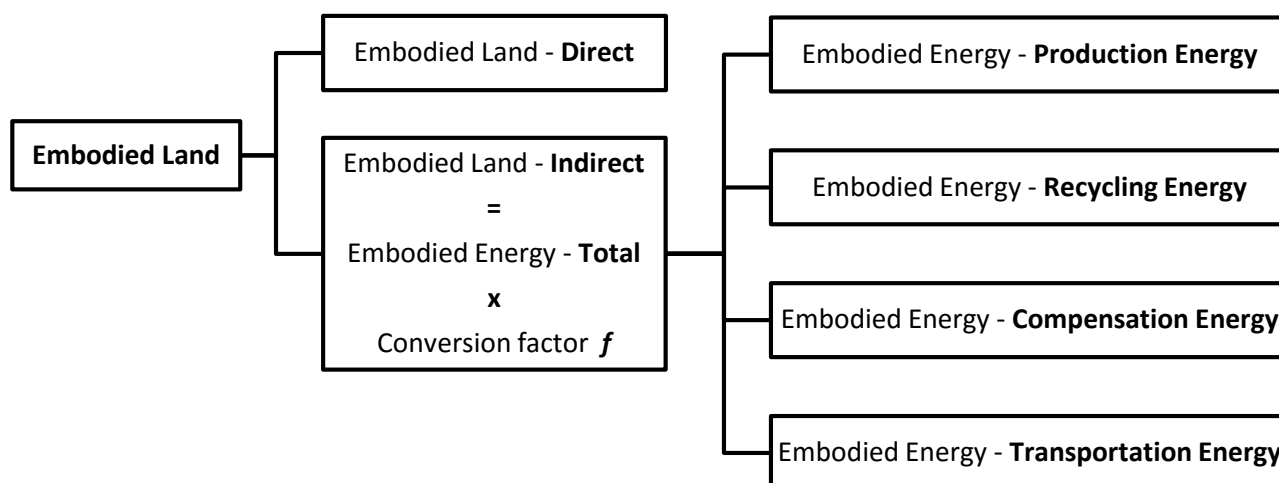


Figuur 2-1: Schematisch overzicht van de elementen waar de *Embodied Land* uit bestaat.

De invloed van water op de EL is momenteel nog niet binnen MAXergy meegenomen. Verder valt het operationeel deel buiten het kader van onderliggend onderzoek.

2.2 Principe berekening

Zonder het operationele bestaat de EL in hoofdlijnen uit twee delen, de EL_{Direct} en de $EL_{Indirect}$. De EL_{Direct} is de hoeveelheid landoppervlak dat nodig is om de materialen voor een bepaald product te winnen of te laten groeien zoals een mijn of een bos, uitgedrukt in $[m^2 \cdot year/kg]$. De $EL_{Indirect}$ is afkomstig van de energie die men nodig heeft voor de productie, transport, recycling⁹ en terugwinning van grondstoffen, in eerste instantie uitgedrukt als energie in $[MJ/kg]$. Voor het verkrijgen van deze energie in de juiste vorm is een energieomvormer nodig of een *converter*. En voor deze energieomvormer zelf is niet alleen een operationeel oppervlak nodig maar zijn ook weer producten en grondstoffen nodig, bijvoorbeeld fossiele brandstoffen met hun mijnen en energiecentrales of PV-modulen met hun eigen productie en operationeel oppervlak. Voor elke omvormer is het mogelijk een omrekenfactor f te definiëren, in $[m^2 \cdot year/MJ]$, waardoor de $EL_{Indirect}$ uit te drukken is in $[m^2 \cdot year/kg]$, de gezamenlijke dimensie. Voor dit onderzoek volgt nu onderstaand overzicht:



Figuur 2-2: Opbouw berekening *Embodied Land* indicator voor onderliggend onderzoek¹⁰.

Voor het bepalen van de benodigde *Embodied Energy* wordt hoofdzakelijk gebruikgemaakt van de ICE¹¹-database [6], eventueel aangevuld met andere LCA¹² en LCI¹³ studies. In deze database en studies is het transport naar de fabriek meestal meegenomen,

⁹ In MAXergy 2.0 is deze komen te vervallen en wordt recyclen uitgedrukt als verlengde levensuur waardoor de *Recycling Energy* onderdeel wordt van de *Production Energy*.

¹⁰ In vorige versies van MAXergy is *Compensation Energy* ook wel aangeduid als *Return Energy* of als *Terugwinning*.

¹¹ *Inventory of Carbon & Energy*.

¹² *Life Cycle Assessment of Life Cycle Analysis*.

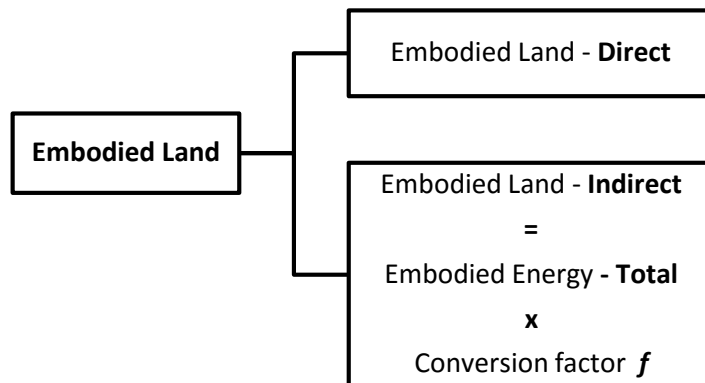
¹³ *Life Cycle Inventory*.

*Cradle-to-Gate*¹⁴. In de $EE_{\text{Transportation Energy}}$ zit nu alleen nog het transport van de fabriek naar de bouwplaats zelf. Zoals in § 1.3 al is vermeld, valt dit buiten het algemeen kader van onderliggend onderzoek, behalve voor de bamboe waar het transport van China naar de Rotterdamse haven wel wordt verdisconteerd. In bijlage X: *Beams in canopy Econnect* zijn EL-berekeningen opgenomen inclusief het transport naar de bouwplaats zelf.

Als laatste kan nog gemeld worden dat de beschikbare bronnen voor *Embodied Land* berekeningen op het moment nog beperkt zijn, weliswaar is de belangstelling hiervoor groeiende. Hiermee samenhangend ontstaat het probleem van het bepalen van de bandbreedtes. In onderliggende studie is steeds van een normale verdeling uitgegaan en zijn de standaard afwijkingen bepaald aan de hand van maar enkele cijfers. Voor de ontwikkeling van de *Embodied Land* indicator betekent dit dat deze waarschijnlijk de komende jaren nog flink aangescherpt kan (en moet) worden naarmate meer studies naar buiten komen.

¹⁴ In de toekomst is het de bedoeling om binnen MAXergy ook dit deel van het transport expliciet te maken zodat de totale invloed van verschillende transportmogelijkheden in kaart gebracht kan worden.

3 Conversion factor f



3.1 Afleiding formules

3.1.1 Algemeen

Het bepalen van de conversie factor voor het vertalen van de energie naar landgebruik (EL_{Indirect}) kan op verschillende manieren gebeuren. Het eenvoudigste is om alleen te kijken naar het oppervlak wat een bepaalde energieomvormer inneemt. Als 1 m² energieomvormer x MJ per jaar produceert, dan volgt voor de omrekenfactor:

$$f = \frac{1}{x} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{MJ}/\text{year}} = \text{m}^2\text{year}/\text{MJ} \right]$$

Bijvoorbeeld voor een PV-paneel met een jaarlijkse netto¹⁵ opbrengst van 432 MJ per m² volgt $f = 0.002315 \text{ m}^2\text{year}/\text{MJ}$. Echter is nu alleen rekening gehouden met het operationele oppervlak van de energieomvormer, niet met het oppervlak nodig voor de productie van de omvormer zelf dus de EL van de energieomvormer zelf.

Ook is nog geen rekening gehouden met de energiedrager. Voor energie van de zon klopt het verhaal, daar hoeft geen extra *effort* voor te gebeuren. Maar voor energie uit aardolie of uit bio-olie zal nog de *embodied land* van de drager zelf in rekening moeten worden gebracht.

3.1.2 Inclusief EL energieomvormer

Stel de EL van 1 m² energieomvormer is y (wordt dus uitgedrukt in [m²year/m²]) en de levensduur van die energieomvormer is z jaar, dan volgt voor de omrekenfactor waarbij rekening wordt gehouden met de EL van de energieomvormer zelf:

$$f = \frac{1 + \frac{y}{z}}{x} \left[\frac{1 + \frac{\text{m}^2\text{year}/\text{m}^2}{\text{year}}}{\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{year}}} = \text{m}^2\text{year}/\text{MJ} \right]$$

¹⁵ Het spreekt voor zich dat in geval een bepaalde omvormer nog operationele energie nodig heeft, deze in mindering moet worden gebracht op de bruto opbrengst.

Bijvoorbeeld voor een PV-paneel met een totale EL^{16} van 29 $m^2\text{year}$ voor 1 m^2 paneel en een levensduur¹⁷ van 25 jaar, volgt:

$$f = \frac{1 + \frac{29}{25}}{432} = \frac{1 + 1.16}{432} = \frac{2.16}{432} = 0.005 \text{ } m^2\text{year/MJ}$$

In de EL van de energieomvormer zelf zit nu een deel EL_{Direct} en een deel EL_{Indirect} , dus energie. En deze energie moet weer door een energieomvormer¹⁸ gemaakt worden. Stel het deel EL_{Direct} voor 1 m^2 energieomvormer is y_1 [$m^2\text{year}/m^2$] en voor het indirecte deel $f \cdot e_1$, waarin $EE_{\text{Total}} = e_1$ [MJ/m^2], dan volgt onderstaande omrekenfactor:

$$f = \frac{1 + \frac{y_1 + f \cdot e_1}{z}}{x} \left[\frac{1 + \frac{\frac{m^2\text{year}}{m^2} + \frac{m^2\text{year} \cdot \text{MJ}}{\text{MJ}} \cdot \frac{\text{MJ}}{m^2}}{\text{year}}}{\frac{\text{MJ}}{m^2\text{year}}} = m^2\text{year/MJ} \right]$$

En uiteindelijk volgt:

$$f = \frac{1 + y_1/z}{x - e_1/z} \quad [m^2\text{year/MJ}]$$

In deze laatste formule is duidelijk het verschil te zien met de eerste formule waar de EL van de energieomvormer zelf niet in meegenomen was. Als voorbeeld, met voor de directe *embodied land* $y_1 = 14 \text{ } m^2\text{year}$ en voor de totale *embodied energy* $e_1 = 3000 \text{ MJ}$ volgt:

$$f = \frac{1 + 14/25}{432 - 3000/25} = \frac{1 + 0.56}{432 - 120} = \frac{1.56}{312} = 0.005 \text{ } m^2\text{year/MJ}$$

En in geval de PV-panelen na 10 jaar worden vervangen, volgt:

$$f = \frac{1 + 14/10}{432 - 3000/10} = \frac{1 + 1.4}{432 - 300} = \frac{2.4}{132} = 0.018 \text{ } m^2\text{year/MJ}$$

Een waarde ongeveer $3\frac{1}{2}$ keer zo groot! Het mag duidelijk zijn dat e_1/z het liefste veel kleiner moet zijn dan x . Indien deze gelijk zouden zijn, wil dat zeggen dat gedurende de beschouwde levensduur de energieomvormer enkel en alleen de energie kan leveren voor zijn eigen productie, er blijft niets meer over.

¹⁶ De waarde van 29 $m^2\text{year}$ is een fictieve waarde om de berekening te demonstreren.

¹⁷ De levensduur van PV-panelen is momenteel 25 jaar. Echter komt het voor dat bijvoorbeeld na 10 jaar deze door nieuw effectievere panelen worden vervangen. Dan zou men eigenlijk met die 10 jaar rekening moeten houden maar dat is van te voren niet bekend!

¹⁸ Nu hoeft niet per definitie dezelfde energieomvormer gebruikt te zijn bij de productie van de functie vervuller en de energieomvormer zelf. Echter zou dit te complex, zelfs onhandelbaar worden. Er wordt daarom van dezelfde energieomvormer uitgegaan.

3.1.3 Inclusief EL energiedrager

De insteek nu is niet per m² energieomvormer, maar per MJ opgewekte energie. Uitgangspunt is weer de algemene formule:

$$f = \frac{1}{x} \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

Hier staat dat men voor het opwekken van 1 MJ aan energie 1/x aan (operationeel) oppervlak nodig heeft, dus aan EL nodig heeft. Bijvoorbeeld een biomassa elektriciteitscentrale in Nederland heeft een gemiddelde “opbrengst” van 25 000 MJ per jaar per m² terrein waar die centrale op staat (zie bijlage I: *Afschatting operationeel landgebruik Biomassa centrales*). De omrekenfactor wordt hiermee 1/25000 = 0.040·10⁻³ m²year/MJ.

Nu hebben sommige energiedragers zelf ook EL nodig om bruikbaar te worden voor de bijbehorende energieomvormer. Stel, voor het opwekken van 1 MJ aan energie met een bepaalde energieomvormer heeft men een hoeveelheid brandstof nodig (de energiedrager) en om die te produceren of te winnen heeft men een hoeveelheid directe EL nodig van y₂ dus uitgedrukt in [m²year/MJ] en EE_{Total} van e₂ uitgedrukt in [MJ/MJ]. Dan volgt voor de omrekenfactor:

$$f = \frac{1}{x} + y_2 + f \cdot e_2 \quad \left[\frac{\text{m}^2\text{year}}{\text{MJ}} + \frac{\text{m}^2\text{year}}{\text{MJ}} + \frac{\text{m}^2\text{year}}{\text{MJ}} \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{MJ}} = \text{m}^2\text{year/MJ} \right]$$

En na herschrijven volgt:

$$f = \frac{1 + y_2 \cdot x}{x - e_2 \cdot x} \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

Bijvoorbeeld, voor het jaarlijks opwekken van 1 MJ aan energie uit pyrolysis bio-olie gemaakt van populieren heeft men een bos nodig van 0.090 m² (zie § 4.6 *Bio-olie, gas, lijmen en harsen*). Dus y₂ is dan 0.090 m²year per MJ op te wekken energie. Tevens heeft men nu nog 0.072045 MJ aan externe energie nodig voor het pyrolysis proces, e₂ = 0.072045 MJ per MJ op te wekken energie. Er volgt dan onderstaande omrekenfactor:

$$f = \frac{1 + 0.090 \cdot 25\,000}{25\,000 - 0.072045 \cdot 25\,000} = \frac{2\,251}{23\,199} = 0.097 \text{ m}^2\text{year/MJ}$$

Ook nu mag het duidelijk zijn dat e₂ nooit groter dan 1 mag worden en zelfs zo klein mogelijk moet zijn. Indien deze 1 zou worden, wil dat zeggen dat men evenveel energie bij de productie van de energiedrager erin moet stoppen als er ooit uit zal komen!

3.1.4 Inclusief EL energievormer & EL energiedrager

De combinatie uit voorgaande paragrafen geeft voor de totale conversie factor:

$$f = \frac{1 + \frac{y_1 + f \cdot e_1}{z}}{x} + y_2 + f \cdot e_2 \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

En uiteindelijk volgt:

$$f = \frac{1 + y_1/z + y_2 \cdot x}{x - e_1/z - e_2 \cdot x} \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

- x Jaarlijkse netto opbrengst van de energievormer per m^2 terrein in $[\text{MJ}/\text{m}^2\text{year}]$
- z De verwachte levensduur van de energievormer in [year]
- y_1 De totale $\text{EL}_{\text{Direct}}$ van de energievormer zelf per m^2 terrein in $[\text{m}^2\text{year}/\text{m}^2]$
- e_1 De totale EE_{Total} van de energievormer zelf per m^2 terrein in $[\text{MJ}/\text{m}^2]$
- y_2 De $\text{EL}_{\text{Direct}}$ van de energiedrager per produceerbare MJ in $[\text{m}^2\text{year/MJ}]$
- e_2 De EE_{Total} van de energiedrager per produceerbare MJ in $[\text{MJ}/\text{MJ}]$

Als voorbeeld, dezelfde biomassa centrale uit de vorige paragraaf met een y_1 van 500 m^2year , een e_1 van 100 000 MJ en een verwachte levensduur van 100 jaar volgt¹⁹:

$$f = \frac{1 + 500/100 + 0.090 \cdot 25\,000}{25\,000 - 100\,000/100 - 0.072045 \cdot 25\,000}$$

$$= \frac{1 + 5 + 2\,250}{25\,000 - 1\,000 - 1\,801} = \frac{2\,256}{22\,199} = 0.1016 \text{ m}^2\text{year/MJ}$$

¹⁹ Ook nu zijn de waarden van y_1 en e_1 fictieve waarden om alleen de berekening te demonstreren.

3.2 Orde of niveau

Zoals al gemeld wordt bij de meest eenvoudige bepaling van de conversie factor alleen gekeken naar de jaarlijkse opbrengst en het directe land wat de energieomvormer inneemt, gebruikt. Dit wordt aangegeven met de 1^{ste} orde of het primaire niveau:

$$f_1 = \frac{1}{\text{Yield}} = \frac{1}{x} \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

Gaat men een niveau dieper, dus het secundaire niveau of de 2^{de} orde, dan worden de *embodied lands* van de energieomvormer zelf (uitgesmeerd over zijn levensjaren) en van de energiedrager meegenomen:

$$f_2 = \frac{1 + EL_{\text{Omvormer}}}{\text{Yield}} + EL_{\text{Drager}} = \frac{1 + \frac{y_1 + f \cdot e_1}{z}}{x} + y_2 + f \cdot e_2 \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

En dus uiteindelijk weer:

$$f_2 = \frac{1 + y_1/z + y_2 \cdot x}{x - e_1/z - e_2 \cdot x} \quad [\text{m}^2\text{year/MJ}]$$

Gaat men nog een niveau dieper, het tertiaire niveau of de 3^{de} orde, dan dienen de *embodied lands* van het gereedschap waar de omvormer mee gemaakt wordt en van machines voor de energiedrager meegenomen te worden. Aan de formule voor f_2 verandert niets. Alleen de waarden voor y_1 , e_1 , y_2 en e_2 worden groter.

3.3 f -waarden

In onderliggend onderzoek wordt alleen het directe of operationele landgebruik van de energieomvormer in rekening gebracht, nog geen eigen EL van de omvormers zelf. Dit kan in toekomstige vervolgonderzoeken gebeuren. Dus in dit onderzoek wordt voor de conversie factor de 1^{ste} orde beschouwd, f_1 .

3.3.1 Multikristallijn PV

De jaarlijkse opbrengst van mc-Si PV-panelen wordt conform § 4.3.1 van [36] gesteld op 120 kWh/m² (Sinke [38]). Met de omrekenfactor van 3.6 voor kWh naar MJ, volgt:

$$f_{1,\text{mc-Si PV}} = \frac{1}{x} = \frac{1}{3.6 \cdot 120} = \frac{1}{432} = 0.002315 \text{ m}^2\text{year/MJ}$$

Hier zit nog geen operationeel oppervlak (landgebruik) voor opslag in wat een onderdeel van het systeem is.

3.3.2 Bio brandstoffen

Energieopwekking door fossiele brandstoffen valt buiten het kader van dit onderzoek²⁰. Met een geschat direct landgebruik van de Biomassa centrale van 25 000 MJ per jaar per m² terrein (zie bijlage I) volgt²¹:

$$f_{1,\text{Bio-olie}} = \frac{1}{x} = \frac{1}{25\,000} = 0.000040 \text{ m}^2\text{year/MJ}$$

Er dient bij deze wel opgemerkt te worden dat om de energiedrager geschikt te maken eigenlijk nog EL nodig is (zie § 3.1.3). Wil men consequent zijn, zou men dan ook de EL van de installatie moeten meenemen, dus eigenlijk moeten rekenen met f_2 .

3.3.3 Wind

Puur ter indicatie en vergelijk, volgens bijlage 3 van Gommans [5]:

- 2 windmolens met 2.5 MW per jaar elk, project “De Locht” te Kerkrade;
- diameter = 90 m en om elkaar niet teveel te beïnvloeden een onderlinge afstand van 7 keer de diameter geeft ongeveer 40 ha operationeel landgebruik per windmolen;
- rendement elektriciteitscentrale van 39%,

resulteert in een besparing op de primaire energie van 1150 GJ/ha. Aldus volgt:

$$f_{1,\text{Wind}} = \frac{1}{1\,150\,000 / 10\,000} = 0.008696 \text{ m}^2\text{year/MJ}$$

Ook hier zit nog geen operationeel oppervlak voor opslag in.

3.3.4 Conclusie & Keuze

Er is in onderliggend onderzoek gekozen voor multikristallijne PV-panelen omdat dit op het moment de meest directe manier is om zonnestraling, als externe bron, om te zetten naar bruikbare energie. Welliswaar volgt bij deze niet de kleinste 1^{ste} orde conversie factor. De verwachting is wel dat wanneer het secundair niveau wordt meegenomen deze de kleinste is. Een en ander aan te tonen in een vervolg onderzoek.

²⁰ De focus van IMDEP is 2020, de verwachting is dat dan nog weinig energie wordt opgewekt met fossiele brandstoffen.

²¹ RiBuiT (*Research Institute for the Built Environment of Tomorrow*) heeft een aantal principes afgeleid, waaronder “massa voor massa”: bio-massa dient eerst voor andere producten ingezet te worden en pas op het einde van hun levensduur (eventueel) te gebruiken voor energieopwekking.

4 Basiswaarden voor EL_{Direct} & EE

In dit hoofdstuk worden de basiswaarden voor de directe *Embodied Land* en de *Embodied Energy* bepaald welke nodig zijn om de totale EL waarden voor de balken van de Econnect luifel te kunnen bepalen.

4.1 Transport

In de gebruikte waarden voor de *Embodied Energy* is het transport van materialen naar de fabriek al opgenomen (*Cradle-to-Gate*). Voor het transport van de producten van de fabriek naar de bouwplaats dient dit nog in rekening te worden gebracht. Hiervoor worden de gemiddelde cijfers gehanteerd volgens Arup [1] (§ 9.2.4):

Tabel 4-1: EE_{Transportation Energy}

		Energieverbruik [MJ/kg·km]
Over Land	Afstand < 50 km	0.0027
	Afstand > 50 km	0.0010
Over Zee	Deepsea	0.0002

4.2 Aardolie

Olie is door de aarde geproduceerd zonder inmenging van menselijk handelen. Derhalve dient olie ook als een “hergroeibare” grondstof gezien te worden, alleen duurt dit miljoenen jaren. Volgens Rovers, et al. [35] is een eerste afschatting van de olieproductie 0.0001 liter per ha·jaar. Met een gemiddelde volumieke massa van 869 kg/m³ voor aardolie²² volgt:

$$EL_{Direct} = \frac{10^4 \cdot 10^3}{0.0001 \cdot 869} = 115.04 \cdot 10^6 \quad [m^2 \cdot year/kg \text{ aardolie}]$$

De *Embodied Energy* van aardolie is verder in onderliggend onderzoek niet van belang.

²² Zie http://www.engineeringtoolbox.com/liquids-densities-d_743.html, gemiddelde van 790-825-847-862-915-973-873.

4.3 Aardgas

Ook voor aardgas geldt dat dit door de aarde zelf is geproduceerd en als een “hergroeibare” grondstof moet worden gezien. Volgens Rovers, et al. [35] is een eerste afschatting van de gasproductie 0.000082 m^3 per *ha*-jaar. Met een gemiddelde volumieke massa van 0.833 kg/m^3 voor aardgas volgt:

$$EL_{\text{Direct}} = \frac{10^4}{0.000082 \cdot 0.833} = 146.40 \cdot 10^6 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{year/kg aardgas}]$$

De *Embodied Energy* van aardgas is verder in onderliggend onderzoek niet van belang.

4.4 Fenol-Formaldehyde (PF)

In *Strand Woven Bamboo* wordt op het moment Fenol-Formaldehyde als hars gebruikt. Volgens tabel 5 uit Wilson [40] heeft men bij de productie van 1 kg PF met 47% *non-volatile solids* de stoffen Fenol (0.244 kg), Methanol (0.209 kg) en Sodium hydroxide (0.061 kg) nodig. De benodigde energie puur voor de productie van PF uit deze chemicaliën is 0.443 MJ/kg ([40], tabel 6). Volgens tabel 11 is de totale *Embodied Energy* 40.35 MJ/kg met de grootste aandelen voor aardgas (50.9%), aardolie (37.2%) en kolen (9.6%). Het is echter onduidelijk welk deel bij aardgas en aardolie voor energieopwekking wordt gebruikt en welk deel voor de productie van voornoemde chemicaliën. Van de benodigde energie neemt de productie van Fenol 68.8% voor zijn rekening, Methanol 23.0% en Sodium hydroxide 5.63 % (tabel 12). Omgerekend naar 100% *solids* resulteert een *Embodied Energy* van $40.35/47\% = 85.85 \text{ MJ/kg}$.

In bijlage I-Afschatting operationeel landgebruik Biomassa centrales is getracht af te schatten wat de belangrijkste primaire grondstoffen zijn voor de productie van de chemicaliën. Van de drie gevonden alternatieven wordt verder in deze studie gebruikt²³:

$$1 \text{ kg PF (100\% solids)} = 0.864 \text{ kg aardolie} + 2.2 \text{ kg zeewater}$$

Rekening houdend met een HHV²⁴ voor aardolie van 45.5 MJ/kg ([40], onderschrift bij tabel 11) volgt een reductie op de totale *Embodied Energy* van $0.864 \cdot 45.5 = 39.32 \text{ MJ/kg PF}$ en volgt voor de totale productie (Cradle-to-Gate) $EE_{\text{Production Energy}} = 85.85 - 39.32 = 46.53 \text{ MJ/kg}$.

Voor aardolie wordt verwezen naar § 4.2:

$$EL_{\text{Direct}} = 0.864 \cdot 115.04 \cdot 10^6 = 99.40 \cdot 10^6 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{year/kg}]$$

²³ De in bijlage I gevonden waarden voor zoutwinning zijn iets hoger dan die in tabel 8 uit Wilson, omgerekend naar 100% solids en 94% uit sodium chloride + 6% uit zeewater.

²⁴ HHV = Higher Heating Value

De benodigde oppervlak voor boorplatformen, productiefabrieken e.d. valt in het niet en is hier niet meer meegenomen. Er volgt onderstaand overzicht voor PF:

Tabel 4-2: Overzicht EL waarden voor Fenol-formaldehyde (PF).

EL_{Direct}	$99.40 \cdot 10^6$	$m^2 \cdot year/kg$
$EL_{Indirect}$ $EE_{Production Energy}$	46.53	MJ/kg

Er wordt hier nog opgemerkt dat bij aardolie (en ook aardgas) geen sprake is van *Compensation Energy*. De aarde heeft een bepaald oppervlak over een bepaalde tijdsperiode nodig om de grondstof (hier dus aardolie of aardgas) te produceren en dit zit al in EL_{Direct} . Wanneer een soort aardolie uit bio-olie wordt gemaakt, hebben we te maken met de bio-variant!

4.5 Melamine-Ureumformaldehyde (MUF)

Bij de vingerlassen in gelamineerd hout (of bamboe) en tussen de lamellen hiervan kunnen verschillende lijmsorten gebruikt worden. In onderliggende studie wordt uitgegaan van Melamine-UreumFormaldehyde lijm (MUF). Volgens tabel 5 uit [40] heeft men bij de productie van 1 kg MUF met 60,0% *non-volatile solids* de belangrijkste stoffen Urea (0.397 kg), Methanol (0.304 kg) en Melamine (0.081 kg) nodig. De benodigde energie puur voor de productie van MUF uit deze chemicaliën is 0.643 MJ/kg ([40], tabel 6). Volgens tabel 11 is de totale *Embodied Energy* 31.66 MJ/kg met de grootste aandelen voor aardgas (69.9%), aardolie (22.7%) en kolen (6.7%). Wederom is het onduidelijk welk deel bij aardgas en aardolie voor energieopwekking wordt gebruikt en welk deel voor de productie van voornoemde chemicaliën. Van de benodigde energie neemt de productie van Urea 46.1% voor zijn rekening, Methanol 34.1% en Melamine 14.9 % (tabel 12). Omgerekend naar 100% solids resulteert een *Embodied Energy* van $31.66/60\% = 52.77$ MJ/kg.

In bijlage III-*Estimation of raw materials for Melamine-UreumFormaldehyde* is getracht af te schatten wat de belangrijkste primaire grondstoffen zijn voor de productie van de chemicaliën, met als resultaat:

$$1 \text{ kg MUF} = 0.625 \text{ kg aardgas} + 0.098 \text{ kg aardolie} + 18.014 \text{ kg zwavel}$$

Rekening houdend met een HHV voor aardgas van 54.4 MJ/kg en voor aardolie van 45.5 MJ/kg ([40], onderschriften bij tabel 6 en tabel 11) volgt een reductie op de totale *Embodied Energy* van 38.46 MJ/kg en volgt voor de totale productie (Cradle-to-Gate) $EE_{Production Energy} = 52.77 - 38.46 = 14.31$ MJ/kg.

Voor aardgas wordt verwezen naar § 4.3:

$$EL_{Direct} = 0.625 \cdot 146.40 \cdot 10^6 = 91.52 \cdot 10^6 \quad [m^2 \cdot year/kg]$$

Voor aardolie wordt verwezen naar § 4.2:

$$EL_{\text{Direct}} = 0.098 \cdot 115.04 \cdot 10^6 = 11.25 \cdot 10^6 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{year}/\text{kg}]$$

Met betrekking tot de zwavel wordt op het moment getwijfeld of dergelijk grote hoeveelheden nodig zijn. Zie ook tabel 8 in Wilson [40] waar voor MUF helemaal geen zwavel is opgenomen. MUF en de bijbehorende verharder kan op verschillende manieren gemaakt worden en is het proces waar Wilson vanuit is gegaan wellicht anders als die in bijlage III. Ook kan zwavel ontstaan bij de gas- en olieproductie en zou dit in het overzicht van Wilson geen extra grondstof hoeven te zijn. Vooralsnog wordt in onderliggend onderzoek zwavel als grondstof niet meegenomen. Ook hier wordt het oppervlak nodig voor aardolie en aardgas winning en de productiefabrieken verwaarloosd. Totaal volgt voor 1 kg MUF:

$$EL_{\text{Direct}} = 91.52 \cdot 10^6 + 11.25 \cdot 10^6 = 102.77 \cdot 10^6 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{year}/\text{kg}]$$

Er volgt onderstaand overzicht voor MUF:

Tabel 4-3: Overzicht EL waarden voor Melamine-ureumformaldehyde (MUF).

EL_{Direct}		$102.77 \cdot 10^6$	$\text{m}^2 \cdot \text{year}/\text{kg}$
EL_{Indirect}	$EE_{\text{Production Energy}}$	14.31	MJ/kg

4.6 Bio-olie, gas, lijmen en harsen

De ontwikkelingen met betrekking tot bio-olie en gas zijn, vanwege de vraag naar groene energie, volop aan de gang. Echter is dit niet zo voor lijmen en harsen gebaseerd op biomassa. Het is zelfs zo dat op dit moment een 100% bio variant voor de op aardolie gebaseerde lijmen en harsen nog niet voorhanden is. De verwachting is wel dat dit binnen enkele jaren zal gebeuren.

Vooralsnog wordt in dit document daarom uitgegaan van bio-lijmen en harsen gemaakt uit bio-olie/gas en dat de productie van de lijmen en harsen op nagenoeg dezelfde manier kan gebeuren als die op aardolie/gas basis.

Bio-olie kan uit een groot aantal verschillende planten en bomen gewonnen worden. Hier is gekozen voor winning uit populieren door middel van snelle pyrolyse.

4.6.1 EL_{Direct}

Volgens [4] (bijschrift onder tabel 4) komt uit één *acre*²⁵ elk jaar 6.02 ton populieren, omgerekend geeft dit 0.672 m²·year/kg populierenhout. Voor 1 MJ aan pyrolysis bio-olie uit populieren heeft men volgens tabel 5 uit [4] 0.080 kg droog populieren nodig, met een vochtigheid van 40 gewichtsprocenten volgt 0.133 kg vers gekapt hout en dus 0.090 m²·year/MJ aan pyrolysis bio-olie. De verwarmingswaarde van bio-olie uit normale²⁶ pyrolyse is volgens tabel 7 uit [14] 16-19 MJ/kg bio-olie. Wanneer ervan wordt uitgegaan dat deze waarden de 5% en 95% fractielwaarden voor een normale verdeling zijn, dan volgen onderstaande waarden voor het gemiddelde en de standaardafwijking:

Tabel 4-4: EL_{Direct} voor pyrolyse bio-olie uit populieren.

$EL_{Direct,5\%}$	$0.090 \cdot 16 = 1.434 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$
$EL_{Direct,95\%}$	$0.090 \cdot 19 = 1.703 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$
$EL_{Direct,mean}$	1.569 m ² ·year/kg
$EL_{Direct,SD}$ ²⁷	0.082 m ² ·year/kg

Volgens bijlage I heeft men voor 0.0437 kg methanol 0.0957 kg wilgenhout nodig, dit is een verhouding van 2.19. Wanneer wordt aangenomen dat dezelfde verhouding geldt tussen populierenhout en biogas, dan volgt voor biogas uit populieren:

Tabel 4-5: EL_{Direct} voor biogas uit populieren.

$$EL_{Direct} \mid 2.19 \cdot 0.672 = 1.472 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$$

Volgens § 4.4 heeft men voor de productie van 1 kg PF hars 0.864 kg aardolie nodig en volgens § 4.5 voor de productie van MUF 0.625 kg aardgas met 0.098 kg aardolie. Het gelijkstellen van aardolie/gas aan de bio-olie/gas zou kunnen aan de hand van de massa of aan de hand van de verbrandingswaarde. De eerste geeft een gunstiger resultaat (minder grondstoffen nodig). In onderliggende verkennende studie wordt van de verbrandingswaarde uitgegaan. Volgens [3] heeft bio-gas een LHV²⁸ van 20 MJ/m³ en Gronings aardgas 32 MJ/m³, wat resulteert in een verhouding van 1.60. De gemiddelde verbrandingswaarde voor pyrolysis bio-olie is 17.5 MJ/kg en met een HHV voor aardolie van 45.5 MJ/kg volgt de verhouding van 2.6. Met deze verhoudingen volgt onderstaand (fictief) overzicht voor PF en MUF gebaseerd op 100% biomassa.

²⁵ 1 acre = 0.404687 ha = 4046.87 m².

²⁶ Via katalyse kan de pyrolyse bio-olie opgewaardeerd worden zodat verbrandingswaarden van 34 MJ/kg en meer haalbaar zijn.

http://www.utwente.nl/greenenergy/news/STW_Demonstrator_juni2013_GEI_CTW/

De gebruikte getallen hebben betrekking op pyrolyse zonder een extra katalysatie stap.

²⁷ Standard Deviation: $SD = \frac{1.703 - 1.434}{2 \cdot 1.645} = 0.082 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$.

²⁸ LHV = Lower Heating Value

Tabel 4-6: EL_{Direct} (fictief) voor PF en MUF gebaseerd op biomassa.

	PF_{Bio}	MUF_{Bio}
$EL_{Direct,mean}$	$2.6 \cdot 0.864 \cdot 1.569 = 3.524 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$	$1.6 \cdot 0.625 \cdot 1.472 + 2.6 \cdot 0.098 \cdot 1.569 = 1.871 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$
$EL^{29}_{Direct,SD}$	$2.6 \cdot 0.864 \cdot 0.082 = 0.184 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$	$1.871 \cdot 0.184 / 3.524 = 0.098 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$

4.6.2 $EL_{Indirect}$

Voor 1 MJ aan pyrolysis bio-olie uit populieren heeft men volgens tabel 5 uit [4] 0.072 MJ aan elektriciteit, $4.5 \cdot 10^{-5}$ MJ aan gas en 1 MJ aan houtskool nodig, geeft een totaal van 1.072045 MJ aan energie. De houtskool is een bijproduct van het pyrolysis proces zelf zodat voor de benodigde externe energie overblijft 0.072045 MJ. Op gelijke wijze als bij EL_{Direct} , volgt voor het gemiddelde en de standaardafwijking:

Tabel 4-7: $EE_{Production Energy}$ voor pyrolyse bio-olie uit populieren.

$EE_{Production Energy,5\%}$	$0.072045 \cdot 16 = 1.15 \text{ MJ/kg}$
$EE_{Production Energy,95\%}$	$0.072045 \cdot 19 = 1.37 \text{ MJ/kg}$
$EE_{Production Energy,mean}$	1.26 MJ/kg
$EE_{Production Energy,SD}^{30}$	0.07 MJ/kg

Biogas kan op verschillende manieren gemaakt worden, bijvoorbeeld direct uit de biomassa zelf of indirect uit de bio-olie in aparte fabrieken of in een gecombineerde raffinaderij. De route via bio-olie zou een hogere *Embodied Energy* geven dan in Tabel 4-7 is opgenomen. Voor nu wordt ervan uitgegaan dat de *Embodied Energy* voor biogas gelijk is aan die voor bio-olie.

Met de eerder afgeleide verhoudingen volgt onderstaand (fictief) overzicht voor PF en MUF gebaseerd op 100% biomassa.

Tabel 4-8: $EE_{Production Energy}$ (fictief) voor PF en MUF gebaseerd op biomassa.

	PF_{Bio}	MUF_{Bio}
$EE_{Production Energy,mean}$	$2.6 \cdot 0.864 \cdot 1.26 = 2.83 \text{ MJ/kg}$	$1.6 \cdot 0.625 \cdot 1.26 + 2.6 \cdot 0.098 \cdot 1.26 = 1.58 \text{ MJ/kg}$
$EE_{Production Energy,SD}$	$2.6 \cdot 0.864 \cdot 0.07 = 0.15 \text{ MJ/kg}$	$1.58 \cdot 0.15 / 2.83 = 0.08 \text{ MJ/kg}$

²⁹ Voor MUF is een gelijke variatiecoëfficiënt aangehouden als voor PF.

³⁰Standard Deviation: $SD = \frac{1.37 - 1.15}{2 \cdot 1.645} = 0.07 \text{ MJ/kg}$.

5 EL_{Direct} & EE - Materialen

5.1 Houten balk

Voor de houten balk wordt uitgegaan van vuren met een sterkteklasse van C18, het oude standaard bouw hout³¹.

5.1.1 EL_{Direct}

Vurenhout uit Europa heeft een jaarlijkse bijgroei van 4 tot 16 m³/ha-jaar met een gemiddelde van 10 m³/ha-jaar³². Voor Nederland geldt een gemiddelde jaarlijkse bijgroei van 11.5 m³/ha-jaar ([32], tabel 4.9, EFISCEN 2005-2025 – fijnspar). Vanwege duurzaam bosbeheer wordt aanbevolen niet meer dan 80% van de bijgroei te oogsten³³. Voor ruw zaaghout wordt uitgegaan van een zaagverlies van 48% (zie [39] § 3.4 - *Conifer - Sawnwood dry rough - Average* → $1-1/1.91 = 48\%$)³⁴. Met een gemiddelde volumieke massa van 380 kg/m³ voor C18 [10] volgt³⁵:

Tabel 5-1: EL_{Direct} voor Europees en Nederlands vuren, sterkteklasse C18.

	Bijgroei [m ³ /ha·year]	Oogst [m ³ /ha·year]	Zaaghout [m ³ /ha·year] [kg/ha·year]		EL _{Direct} [m ² ·year/kg]
EU EL _{low}	16.00	12.80	6.66	2 529.28	3.954
EU EL _{mean}	10.00	8.00	4.16	1 580.80	6.326
EU EL _{high}	4.00	3.20	1.66	632.32	15.815
Du EL _{mean}	11.50	9.20	4.78	1 817.92	5.501

In hoeverre de gevraagde kwaliteit C18 volledig uit de geoogste boomstammen gehaald kan worden, is op dit moment nog onbekend. Bij hogere kwaliteiten is maar een deel van de oogst bruikbaar, hoe hoger de kwaliteit – hoe kleiner dit deel en hoe hoger de *Embodied Land*. De reden waarom met hogere sterkteklassen verder geen rekening wordt gehouden. Ook wordt alleen van de Europese waarden uitgegaan.

³¹ De verwachting is dat in de toekomst voor dezelfde sortering de sterkteklasse naar beneden wordt bijgesteld, bijvoorbeeld naar C16 of misschien nog lager. Zie ook Tabel X-3 in bijlage X.2.

³² <http://www.matbase.com/material/wood/class4-5-10-years/european-spruce/properties>, laatst geraadpleegd in 2012.

³³ Het oogst regime kan lager zijn dan 80%, toch wordt hier uitgegaan van de hoogst mogelijke oogst wat resulteert in de laagst mogelijke EL_{Direct}.

³⁴ Voor geschaafd hout volgt een verlies van $1-1/2.21 = 55\%$.

³⁵ Hier is gerekend met 380 kg/m³. Na de constructieve berekening volgt de benodigde afmeting voor C18 en met 380 kg/m³ ook het benodigd aantal kg en dus een EL_{Direct} in [m²·year]. Het maakt geen verschil welke volumieke massa hier gebruikt wordt, zolang dit maar in beide berekeningen hetzelfde is.

Kijkend naar de drie Europese waarden voor de EL in Tabel 5-1, dan kan de standaard afwijking niet meer benaderd worden door van een normale verdeling uit te gaan (deze lijkt meer op een log-normale verdeling). Om straks op eenvoudige wijze diverse statistische grootheden met elkaar te kunnen combineren, is hier toch ervoor gekozen om de normale verdeling te gebruiken en uit te gaan van EL_{mean} met EL_{low} . Er volgt:

Tabel 5-2: EL_{Direct} voor vuren hout, kwaliteit C18.

$EL_{Direct,mean}$	6.326 m ² ·year/kg
$EL_{Direct,SD}^{36}$	1.442 m ² ·year/kg

5.1.2 $EL_{Indirect}$

In de ICE database worden waarden gegeven voor de benodigde *Embodied Energy* in [MJ/kg] voor zachthout in de UK (zie *Timber-Softwood/Virgin* en *Sawn Softwood* in het tabblad *Timber* [6]).

Tabel 5-3: EE voor gezaagd hout volgens de ICE database.

	Mean EE [MJ/kg]	SD EE [MJ/kg]	Min EE [MJ/kg]	Max EE [MJ/kg]
<i>Main Material</i>				
<i>Timber, Softwood</i>	5.55	3.26	0.30	13.00
<i>Unspecified</i>	5.42	3.43	0.30	13.00
<i>Virgin</i>	5.88	2.92	2.80	9.70
<i>Material</i>				
<i>Sawn Softwood</i>	7.40		0.72	13.00

In [41] zijn meerdere waarden voor de gemiddelde *Embodied Energy* verzameld. Al deze waarde zijn hoger dan 5.88 en de gevonden maximum waarde is 10.22 MJ/kg. Er wordt daarom in onderliggende studie uitgegaan van een gemiddelde van 7.40 MJ/kg en een standaardafwijking van 2.92 MJ/kg. Er volgt:

Tabel 5-4: $EE_{Production Energy}$ voor vuren hout, kwaliteit C18.

$EE_{Production Energy,mean}$	7.40 MJ/kg
$EE_{Production Energy,SD}$	2.92 MJ/kg
$EE_{Production Energy,5\%}$	$7.40 - 1.645 \cdot 2.92 = 2.60$ MJ/kg
$EE_{Production Energy,95\%}$	$7.40 + 1.645 \cdot 2.92 = 12.20$ MJ/kg

³⁶Standard Deviation: $SD = \frac{6.326 - 3.954}{1.1645} = 1.442 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$. Hiermee volgt voor de 5% en 95% fractielwaarden een EL van 3.954 respectievelijk 8.698 m²·year/kg. Voor de bovengrens is dit een gunstigere waarde. Wordt daarentegen uitgegaan van EL_{high} met EL_{low} dan zou een SD volgen van 3.605 en voor de fractielwaarden 0.395 en 12.256 m²·year/kg, een onrealistische lage waarde voor de ondergrens.

5.2 Gelamineerde houten balk

5.2.1 EL_{Direct}

Voor de gelamineerde houten balk wordt uitgegaan van de sterkteklasse GL20h met als basismateriaal C18 volgens de vorige paragraaf. Daar hiervoor een volumieke massa geldt van 370 kg/m^3 ([29]) dienen de waarden uit de vorige paragraaf gecorrigeerd te worden met een factor $380/370$ (zie ook voetnoot 35). Tevens dient bij gelamineerd hout rekening gehouden te worden met schaafter verliezen bij de productie. Hier wordt 25% voor in rekening gebracht (zie bijlage *V-Glulam – volumeverlies & benodigde lijm*). En dient volgens die bijlage rekening gehouden te worden met $0.0156 \text{ kg MUF per kg Glulam}$.

Tabel 5-5: EL_{Direct} voor Glulam met MUF, kwaliteit GL20h.

$$EL_{Direct,mean} \mid 1.25 \cdot 6.326 \cdot 380/370 + 0.0156 \cdot 102.77 \cdot 10^6 = 160.06 \cdot 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$$

Voor de variant met bio-lijm volgt:

Tabel 5-6: EL_{Direct} voor Glulam met Bio-MUF, kwaliteit GL20h.

$$\begin{array}{l|l} EL_{Direct,mean} & 1.25 \cdot 6.326 \cdot 380/370 + 0.0156 \cdot 1.871 = 8.150 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg} \\ EL_{Direct,SD} & \sqrt{(1.25 \cdot 1.442 \cdot 380/370)^2 + (0.0156 \cdot 0.098)^2} = 1.851 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg} \end{array}$$

5.2.2 $EL_{Indirect}$

In de ICE database worden de waarden gegeven voor de benodigde *Embodied Energy* in [MJ/kg], tabblad *Timber* [6].

Tabel 5-7: EE voor Glulam volgens de ICE database.

	Mean EE [MJ/kg]	SD EE [MJ/kg]	Min EE [MJ/kg]	Max EE [MJ/kg]
<i>Main Material</i>				
<i>Timber, Glulam</i>	12.06	1.74	9.00	14.20
<i>Unspecified</i>	11.10	2.15	9.00	13.30
<i>Virgin</i>	12.64	1.37	11.00	14.20
<i>Material</i>				
<i>Glue Laminated timber</i>	12.00		8.00	14.00

Er wordt verondersteld dat de productie van de lijmen in deze waarden zijn opgenomen en wordt voor Glulam in deze studie verder uitgegaan van *Virgin*.

Tabel 5-8: $EE_{Production Energy}$ voor Glulam, kwaliteit GL20h.

$EE_{Production Energy, mean}$	12.64 MJ/kg
$EE_{Production Energy, SD}$	1.37 MJ/kg
$EE_{Production Energy, 5\%}$	$12.64 - 1.645 \cdot 1.37 = 10.39$ MJ/kg
$EE_{Production Energy, 95\%}$	$12.64 + 1.645 \cdot 1.37 = 14.89$ MJ/kg

Vergelijking van de $EL_{Indirect}$ voor MUF en Bio-MUF leert dat deze voor de bio-variant een factor $1.58/14.31 = 0.11$ kleiner is. De waarden uit Tabel 5-8 dienen verlaagd te worden met $(1 - 0.11) \cdot 0.0156 \cdot 14.31 = 0.198$ MJ/kg.

Tabel 5-9: $EE_{Production Energy}$ voor Glulam met Bio-MUF, kwaliteit GL20h.

$EE_{Production Energy, mean}$	12.44 MJ/kg
$EE_{Production Energy, SD}$	1.37 MJ/kg
$EE_{Production Energy, 5\%}$	$12.44 - 1.645 \cdot 1.37 = 10.19$ MJ/kg
$EE_{Production Energy, 95\%}$	$12.44 + 1.645 \cdot 1.37 = 14.70$ MJ/kg

Door het aftrekken van de waarden voor gezaagd hout, volgt de *Embodied Energy* voor alleen het laminatie proces, inclusief de productie van de lijm.

Tabel 5-10: $EE_{Production Energy}$ voor het vingerlassen, lamineren en productie van de lijmen bij Glulam met MUF.

$EE_{Production Energy, mean}$	$12.64 - 7.40 = 5.24$ MJ/kg
$EE_{Production Energy, SD}$	$\sqrt{1.37^2 + 2.92^2} = 3.23$ MJ/kg

Tabel 5-11: $EE_{Production Energy}$ voor het vingerlassen, lamineren en productie van de lijmen bij Glulam met Bio-MUF.

$EE_{Production Energy, mean}$	$12.44 - 7.40 = 5.04$ MJ/kg
$EE_{Production Energy, SD}$	$\sqrt{1.37^2 + 2.92^2} = 3.23$ MJ/kg

5.3 Strand Woven Bamboo van de 5^{de} generatie (SWB5G)

5.3.1 EL_{Direct}

Bij de productie van *Strand Woven Bamboo* van de 5^{de} generatie kan bijna de gehele halm gebruikt worden, alle diameters vanaf 40 mm en ook kromme halmen³⁷. Dit resulteert in een gemiddelde jaarlijkse opbrengst van 18 333 kg/ha Moso halmen met een variatie coëfficiënt van 8.33% (zie bijlage IV.1).

Hieruit worden SWB5G platen gemaakt van 1250-2500 mm² met dikten van 20, 30 en 40 mm en voor buiten toepassingen 13 tot 17 gewichtsprocenten hars (in de huidige platen is dit Fenol-Formaldehyde) en voor binnen toepassingen 7 tot 10%. In onderliggend onderzoek wordt alleen van de 40 mm dikke platen met 17% hars uitgegaan. Na persen en bakken van de platen worden de zijkanten recht gezaagd en de boven en onderzijde gescheurd. De bruto afmetingen van de platen is 1300-2600 mm² met een dikte³⁸ van 45 mm. Verder is er een algemeen productie verlies van 1% op de Moso. Er volgt onderstaand overzicht voor de normale 40 mm dikke platen.

Tabel 5-12: EL_{Direct} van SWB5G uit 40 mm dikke platen met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

	<i>t</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>ℓ</i> [mm]	<i>V</i> [mm ³]	ρ_{netto} [kg/m ³]	ρ_{bruto} [kg/m ³]	Yield [m ³ /ha·year]	EL _{Direct} ³⁹ [m ² ·year/kg]
Bruto	45	1300	2600	0.1521				
Netto	40	1250	2500	0.1250				
Verlies hars				17.82%				
Extra verlies Moso				1.00%				
Verlies Moso				18.82%				
Moso (83%) ⁴⁰					996.00	1226.86	14.94	0.558
PF-Hars (17%) ⁴¹					204.00	248.23		20.56·10 ⁶
SWB5G					1200.00			20.56·10 ⁶
Moso (83%)					996.00	1226.86	14.94	0.558
Bio-Hars (17%) ⁴²					204.00	248.23		0.729
SWB5G _{Bio-PF}	Mean				1200.00			1.287
	SD				$\sqrt{(0.0833 \cdot 0.558)^2 + 0.038^2} =$			0.060

³⁷ Daar bij de eerdere generaties eerst latjes van de halmen gemaakt worden kunnen kromme en te dunne halmen niet gebruikt worden.

³⁸ Voor de 30 mm dikke platen is de bruto dikte 33.5 mm en voor de 20 mm is dit 22.5 mm.

³⁹ m²year per kg eindproduct.

⁴⁰ $18\,333 / 1\,226.86 = 14.94$

⁴¹ $99.40 \cdot 10^6 \cdot 248.23 / 1200 = 20.56 \cdot 10^6$

⁴² $3.524 \cdot 248.23 / 1200 = 0.729$

Bij gelamineerde SWB5G dienen de planken, net zoals bij Glulam, na het vingerlassen geschaafd te worden voor ze op elkaar te lijmen. Het is daarom niet nodig, zelfs onwenselijk met betrekking tot materiaalverlies, de platen te schuren. Er volgt onderstaand overzicht voor 45 mm dikke platen ten behoeve van de productie van gelamineerde balken.

Tabel 5-13: EL_{Direct} van SWB5G voor gelamineerde balken uit 45 mm dikke platen met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

	t [mm]	b [mm]	ℓ [mm]	V [mm ³]	ρ_{netto} [kg/m ³]	ρ_{bruto} [kg/m ³]	Yield [m ³ /ha·year]	EL_{Direct}^{43} [m ² ·year/kg]
Bruto	45	1300	2600	0.1521				
Netto	45	1250	2500	0.1406				
Verlies hars				7.54%				
Extra verlies Moso				1.00%				
Verlies Moso				8.54%				
Moso (83%) ⁴⁴					996.00	1089.05	16.83	0.495
PF-Hars (17%) ⁴⁵					204.00	220.65		18.28·10 ⁶
SWB5G _{PF}					1200.00			18.28·10 ⁶
Moso (83%)					996.00	1089.05	16.83	0.495
Bio-Hars (17%) ⁴⁶					204.00	220.65		0.648
SWB5G _{Bio}	Mean				1200.00			1.143
	SD						$\sqrt{(0.0833 \cdot 0.495)^2 + 0.034^2} =$	0.053

5.3.2 $EL_{Indirect}$

In bijlage IV is de berekening opgenomen voor $EL_{Indirect}$ voor de 40 mm dikke platen met transport naar België. Voor het verzagen van de platen dient nog de *Embodied Energy* in rekening gebracht te worden. Wanneer het materiaal gebruikt gaat worden voor gelamineerde balken, dient het schuren in mindering gebracht te worden (9.041 MJ/kg). Er resulteert het volgende overzicht.

⁴³ m²year per kg eindproduct.

⁴⁴ $18333 / 1089.05 = 16.83$

⁴⁵ $99.40 \cdot 10^6 \cdot 220.65 / 1200 = 18.28 \cdot 10^6$

⁴⁶ $3.524 \cdot 220.65 / 1200 = 0.648$

Tabel 5-14: EL_{Indirect} van SWB5G platen met PF inclusief transport naar België, 40 mm dik en voor gelamineerde balken 45 mm dik.

		40 mm dik	45 mm dik	
EL_{Indirect}	$EE_{\text{Production Energy}}$	23.084 MJ/kg	14.043 MJ/kg	
	$EE_{\text{Transportation Energy}}$	4.288 MJ/kg	4.288 MJ/kg	
	EE_{Total}	27.371 MJ/kg	18.330 MJ/kg	
	$EE^{47}_{\text{Production Energy}}$	23.882 MJ/kg	14.841 MJ/kg	105 mm brede strippen

In geval van Bio-PF volgt:

Tabel 5-15: EL_{Indirect} van SWB5G platen met Bio-PF inclusief transport naar België, 40 mm dik en voor gelamineerde balken 45 mm dik.

		40 mm dik	45 mm dik	
EL_{Indirect}	$EE_{\text{Production Energy}}$	15.048 MJ/kg	6.007 MJ/kg	
	$EE_{\text{Transportation Energy}}$	4.288 MJ/kg	4.288 MJ/kg	
	EE_{Total}	19.336 MJ/kg	10.295 MJ/kg	
	$EE^{48}_{\text{Production Energy}}$	15.846 MJ/kg	6.805 MJ/kg	105 mm brede strippen

5.4 Gelamineerde SWB5G (LSWB5G)

5.4.1 EL_{Direct}

Volgens bijlage VI-Gelamineerde SWB5G – volumeverlies & benodigde lijm is het volumeverlies 20% en is de benodigde lijm 0.00481 kg MUF per kg LSWB5G⁴⁹. Samen met Tabel 5-13 en Tabel 4-3 volgt:

⁴⁷ $EE_{\text{Production Energy}} = 0.200/7.5 = 0.0266$ MJ/kg per m zaagsnede (zie bijlage IV).

Bij 11 strippen van 105 mm breed, inclusief het bijzagen van de zijkanten, volgt:

$(11+1) \cdot 2.500 \cdot 0.0266 + 23.084 = 23.882$ MJ/kg bij 40 mm dikte en

$(11+1) \cdot 2.500 \cdot 0.0266 + 14.043 = 14.841$ MJ/kg bij 45 mm dikte.

⁴⁸ Voor de Bio-variant volgt:

$(11+1) \cdot 2.500 \cdot 0.0266 + 15.048 = 15.846$ MJ/kg bij 40 mm dikte en

$(11+1) \cdot 2.500 \cdot 0.0266 + 6.007 = 6.805$ MJ/kg bij 45 mm dikte.

⁴⁹ LWSB5G = Laminated Strand Woven Bamboo of the 5th Generation.

Tabel 5-16: EL_{Direct} voor LSWB5G met PF en MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

$$EL_{Direct,mean} \mid 1.20 \cdot 18.28 \cdot 10^6 + 0.00481 \cdot 102.77 \cdot 10^6 = 22.43 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$$

En met Tabel 4-6 volgt de variant met bio-lijm:

Tabel 5-17: EL_{Direct} voor LSWB5G met Bio-PF en Bio-MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

$$\frac{EL_{Direct,mean}}{EL_{Direct,SD}} \mid \frac{1.20 \cdot 1.143 + 0.00481 \cdot 1.871 = 1.381 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}}{\sqrt{(1.20 \cdot 0.053)^2 + (0.00481 \cdot 0.098)^2} = 0.064 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}}$$

5.4.2 $EL_{Indirect}$

Daar 20% meer materiaal nodig is, volgt voor het transport in en uit China ook een verhoging van 20%. Aldus volgt voor $EE_{Transport Energy}$ een waarde van $1.20 \cdot 4.288 = 5.145$ MJ/kg. Verder dienen de waarden van SWB5G (Tabel 5-14 en Tabel 5-15) en het laminatieproces (Tabel 5-10 en Tabel 5-11) gecombineerd te worden.

Tabel 5-18: $EE_{Production Energy}$ voor LSWB5G met PF en MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

$$\frac{EE_{Production Energy,mean}}{EE_{Production Energy,SD}} \mid \frac{1.20 \cdot 14.841 + 5.240 = 23.049 \text{ MJ/kg}}{\sqrt{(1.20 \cdot 0.000)^2 + (3.225)^2} = 3.225 \text{ MJ/kg}}$$

Voor de variant met bio-lijm volgt:

Tabel 5-19: $EE_{Production Energy}$ voor LSWB5G met Bio-PF en Bio-MUF, met een volumieke massa van 1 200 kg/m³.

$$\frac{EE_{Production Energy,mean}}{EE_{Production Energy,SD}} \mid \frac{1.20 \cdot 6.805 + 5.042 = 13.208 \text{ MJ/kg}}{\sqrt{(1.20 \cdot 0.000)^2 + (3.225)^2} = 3.225 \text{ MJ/kg}}$$

5.5 Staal

5.5.1 EL_{Direct}

Voor het bepalen van de directe *Embodied Land* voor staal zijn de volgende cijfers gebruikt:

Tabel 5-20: EL_{Direct} voor staal

Bron	Staal [m ² ·jaar/kg]
Frischknecht (1994) uit RWS [37]	0.00010
Universität Stuttgart ⁵⁰	0.00092

Wanneer ervan wordt uitgegaan dat deze waarden de 5% en 95% fractielwaarden voor een normale verdeling zijn, dan volgen onderstaande waarden voor het gemiddelde en de standaardafwijking:

Tabel 5-21: EL_{Direct} voor stalen balken

$EL_{Direct,mean}$	0.000510 m ² ·year/kg
$EL_{Direct,SD}$ ⁵¹	0.000249 m ² ·year/kg

5.5.2 $EL_{Indirect}$ - $EE_{Production}$ Energy

Voor stalen balken zijn onderstaande *Embodied Energy* waarden in [6] opgenomen:

Tabel 5-22: EE voor staal, algemeen en voor profielen of *sections* (ICE)

		Gemiddeld [MJ/kg]	Standaard afwijking [MJ/kg]	Minimum [MJ/kg]	Maximum [MJ/kg]
Algemeen					
Primair (<i>virgin</i>)	n=57	37.48	12.07	32.20%	12.00
50% gerecycled ⁵²	n=2	32.75	20.86	63.69%	18.00
≈ 100% gerecycled	n=33	13.60	4.86	35.74%	6.00
Sections					
Typisch UK (59% rec.)		21.50		30.0%	
Typisch <i>World</i> (39% rec.)		27.10		30.0%	
Primair		38.00		30.0%	
Secundair		10.00		30.0%	

⁵⁰ Universität Stuttgart, *Documentation of land use indicators values in GaBi4* (2011), van: www.gabisoftware.com.

⁵¹Standard Deviation: $SD = \frac{0.00092 - 0.00010}{2 \cdot 1.645} = 0.000247 \text{ m}^2 \cdot \text{year/kg}$.

⁵² De algemene waarden voor 50% gerecycled zijn gebaseerd op een 2-tal documenten, deze waarden worden niet als representatief beschouwd.

Voor stalen balken van primair staal wordt uitgegaan van 38.00 MJ/kg en bij secundaire staal van 10.00 MJ/kg. De grenzen voor stalen profielen zijn $\pm 30\%$, echter is dit gebaseerd op een gemiddelde en niet specifiek voor stalen profielen. Er wordt voor de primaire stalen balken een variatiecoëfficiënt van 32.20% en voor secundair staal 35.70% aangehouden. Er resulteert onderstaand overzicht:

Tabel 5-23: $EE_{Production Energy}$ voor stalen balken

Gerecycled	$EE_{Production Energy, mean}$ [MJ/kg]	$EE_{Production Energy, SD}$ [%] [MJ/kg]
0%	38.00	32.20% 12.24
50% ⁵³	24.00	6.37
100%	10.00	35.74% 3.57

5.5.3 $EL_{Indirect} - EE_{Compensation Energy}$

In de huidige MAXergy-berekening is gekozen voor winning van metalen uit zeewater. Volgens [2] is het energiegebruik om 1 ton water te filteren vergelijkbaar met de huidige ontziltingsinstallaties, namelijk 2.5 kWh/ton zeewater. In 2007 kwam er $2.26 \cdot 10^9$ ton ijzer in het zeewater terecht en zou men daar $6.65 \cdot 10^{17}$ ton zeewater voor moeten filteren. Er volgt onderstaand overzicht voor de *Compensation Energy* van een stalen balk.

Tabel 5-24: $EE_{Compensation Energy}$ voor stalen balken

	Massa te filteren zeewater [$t_{zeewater}/t_{ijzer}$]	Energie te filteren zeewater [kWh/ t_{ijzer}]	$EE_{Compensation Energy}$ [MJ/kg]
Ijzer	$\frac{6.65 \cdot 10^{17}}{2.26 \cdot 10^9} = 294.25 \cdot 10^6$	$735.62 \cdot 10^6$	2648230

5.6 Aluminium

5.6.1 EL_{Direct}

Voor het bepalen van de directe *Embodied Land* voor aluminium zijn de volgende cijfers gebruikt:

⁵³ De waarden voor 50% gerecycled is het gemiddelde tussen 0% en 100%. De standaardafwijking (standard deviation, SD) is berekend volgens:

$$SD_{\alpha} = \sqrt{(1 - \alpha)^2 SD_{0\%}^2 + \alpha^2 SD_{100\%}^2} \rightarrow SD_{50\%} = \sqrt{(1 - 0.5)^2 SD_{0\%}^2 + 0.5^2 SD_{100\%}^2}$$

Tabel 5-25: EL_{Direct} voor aluminium productie

Bron	Bauxiet [m ² ·jaar/kg]	Aluminium [m ² ·jaar/kg]	
Beck (2000) uit RWS [37]		0.00041	In 1991
Beck (2000) uit RWS [37]		0.00039	In 1998
Sliwka & Bauer (2000) RWS [37]	0.000180	0.00040	Brazilië
Wirtz & Schäfer (1999) uit RWS [37]		0.00016	Jamaica
Universität Stuttgart ^{54,55}	0.000185	0.00041	Australië
Universität Stuttgart	0.000130	0.00029	Brazilië
Hausberg (2003) uit CRC525 [12]		0.00025	Wereldwijd

Bij de productie van aluinaarde (*alumina*) uit bauxiet wordt tevens caustic soda en gebrande kalk gebruikt (bauxiet 95% - caustic soda 3% - gebrande kalk 2%) [11]. In hoeverre deze kleine percentages meegenomen zijn in bovenstaande cijfers is onbekend. Ook de invloed van de directe *Embodied Land* voor de productie van de anode, nodig voor het smelten van aluminium uit aluinaarde, is op dit moment nog onbekend.

Het gemiddelde en de standaard afwijking van de waarden uit Tabel 5-25 zijn:

Tabel 5-26: EL_{Direct} voor aluminium balken

$EL_{Direct,mean}$	0.00033 m ² ·year/kg
$EL_{Direct,SD}$	0.00010 m ² ·year/kg

5.6.2 $EL_{Indirect}$ - $EE_{Production}$ Energy

Voor aluminium balken zijn onderstaande *Embodied Energy* waarden in [6] opgenomen:

Tabel 5-27: EE voor aluminium, algemeen en voor geëxtrudeerde profielen (ICE)

	Gemiddeld [MJ/kg]	Standaard afwijking [MJ/kg]	Minimum [MJ/kg]	Maximum [MJ/kg]	
Algemeen					
Primair (<i>virgin</i>) n=62	224.07	68.47	30.56%	39.15	382.73
50% gerecycled ⁵⁶ n=4	108.60	53.42	49.19%	58.00	184.00
≈ 100% gerecycled n=28	17.94	8.73	48.64%	8.00	42.90

⁵⁴ Universität Stuttgart, *Documentation of land use indicators values in GaBi4* (2011), van: www.gabisoftware.com.

⁵⁵ De waarden voor aluminium zijn berekend met de waarde van bauxiet met een factor 2.22, dezelfde als bij Sliwka & Bauer (2000).

⁵⁶ De algemene waarden voor 50% gerecycled zijn gebaseerd op een 4-tal documenten, deze waarden worden niet als representatief beschouwd.

Geëxtrudeerd		
Typisch (33% gerecycled)	154.0	20.00%
Primair	213.5	20.00%
Secundair	34.0	20.00%

Voor het gemiddelde van geëxtrudeerde aluminium balken wordt uitgegaan van 213.50 MJ/kg bij primair aluminium en van 34.00 MJ/kg in geval van 100% gerecycled aluminium. De grenzen voor geëxtrudeerde aluminium balken zijn $\pm 20.00\%$, echter is dit gebaseerd op een gemiddelde en niet specifiek voor geëxtrudeerd aluminium. Daar de ICE meldt dat de algemene waarden op een groot aantal hoogwaardige documenten zijn gebaseerd wordt hier voor de primaire aluminium balken een variatiecoëfficiënt van 30.56% en voor secundair aluminium 48.64% aangehouden. Er resulteert onderstaand overzicht:

Tabel 5-28: $EE_{Production\ Energy}$ voor aluminium balken

Gerecycled	$EE_{Production\ Energy, mean}$ [MJ/kg]	$EE_{Production\ Energy, SD}$ [%]	$EE_{Production\ Energy, SD}$ [MJ/kg]
0%	213.50	30.56%	65.24
50% ⁵⁷	123.75		33.65
100%	34.00	48.64%	16.54

5.6.3 $EL_{Indirect}$ - $EE_{Compensation\ Energy}$

Volgens [2] kwam in 2007 $3.80 \cdot 10^7$ ton aluminium in het zeewater en zou men daar $3.80 \cdot 10^{16}$ ton zeewater voor moeten filteren. Met de benodigde energie van 2.5 kWh/ton te zuiveren zeewater volgt onderstaand overzicht voor de *Compensation Energy* van aluminium.

Tabel 5-29: $EE_{Compensation\ Energy}$ voor aluminium balken

	Massa te filteren zeewater [$t_{zeewater}/t_{aluminium}$]	Energie te filteren zeewater [kWh/ $t_{aluminium}$]	$EE_{Compensation\ Energy}$ [MJ/kg]
Aluminium	$\frac{3.80 \cdot 10^{16}}{3.80 \cdot 10^7} = 1\,000.00 \cdot 10^6$	$2\,500.00 \cdot 10^6$	9 000 000

⁵⁷ De waarden voor 50% gerecycled is het gemiddelde tussen 0% en 100%. De standaardafwijking (standard deviation, SD) is berekend volgens:

$$SD_{\alpha} = \sqrt{(1 - \alpha)^2 SD_{0\%}^2 + \alpha^2 SD_{100\%}^2} \rightarrow SD_{50\%} = \sqrt{(1 - 0.5)^2 SD_{0\%}^2 + 0.5^2 SD_{100\%}^2}$$

5.7 Samenvatting EL per kg materiaal

Onderstaand wordt het overzicht gegeven van de berekende waarden uit de voorgaande paragrafen.

Tabel 5-30: Samenvatting EL- en EE-waarden per kg materiaal voor Glulam, LSWB5G, staal en aluminium⁵⁸.

	EL _{Direct} [m ² ·year/kg]	EL _{Indirect}				
		EE _{PE} [MJ/kg]	EE _{PE+RE} [MJ/kg]	EE _{RE} [MJ/kg]	EE _{CE} [MJ/kg]	EE _{TE} [MJ/kg]
Hout	6.326 (1.442)	7.40 (2.92)	-	-	-	-
Glulam _{MUF}	1600 619 -	12.64 (1.37)	-	-	-	-
Glulam _{Bio}	8.150 (1.851)	12.44 (1.37)	-	-	-	-
SWB5G _{PF}	20 562 068 -	23.88 (0.00)	-	-	-	4.29
SWB5G _{Bio}	1.287 (0.060)	15.85 (0.00)	-	-	-	4.29
LSWB5G _{PF+MUF}	22 247 204 -	23.05 (3.23)	-	-	-	5.15
LSWB5G _{Bio}	1.381 (0.064)	22.22 (3.23)	-	-	-	5.15
Staal	0.000 510 (0.000 249)	38.00 (12.24)	24.00 (6.37)	10.00 (3.57)	2 648 230 -	-
Aluminium	0.000 330 (0.000 099)	213.50 (65.24)	123.75 (33.65)	34.00 (16.55)	9 000 000 -	-
Land < 50 km						0.0027
Land > 50 km						0.0010
Zee						0.0002
Energie PV- multikristallijn → EE _{Total} vermenigvuldigen met 0.002315 [m ² ·year/MJ]						
EE _{PE} = Embodied Energy – Production Energy						
EE _{PE+RE} = 50% virgin + 50% gerecycled						
EE _{RE} = Embodied Energy – Recycled Energy						
EE _{CE} = Embodied Energy – Compensation Energy						
EE _{TE} = Embodied Energy – Transportation Energy						
MUF = Met Melamine-UreumFormaldehyde lijm voor de vingerlassen en tussen de lamellen						
PF = Met Fenol-Formaldehyde als hars						
Bio = Met lijmen en/of harsen voor 100% gemaakt van biomassa						

⁵⁸ Het eerste getal is het gemiddelde, het getal tussen haakjes is de standaard afwijking.

6 Balkberekeningen

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de berekeningen besproken voor de dragende luifelbalken van het gebouw *Econnect* op *De Wijk van Morgen*. De daadwerkelijke berekeningen zijn opgenomen in bijlage X: *Beams in canopy Econnect* op blz. 70.

Constructieve onderdelen dienen getoetst te worden aan de *Uiterste Grenstoestand* (UGT) en aan de *Bruikbaarheidsgrenstoestand* (BGT). Bij de UGT wordt de benodigde sterkte getoetst aan de sterkte van het materiaal. Bij de BGT wordt naar de vervormingen gekeken en is de stijfheid van het materiaal van belang. Voor de materialen hout (en gelamineerd hout), staal en aluminium zijn deze materiaal eigenschappen voldoende nauwkeurig bekend. Voor SWB5G worden deze bepaald in bijlage VII: *Mechanische eigenschappen SWB5G* op blz. 62. Voor de bamboe balken worden de hout normen gehanteerd.

De doorbuigingseisen in Nederland, volgens de Nationale Bijlagen, wijken iets af van de doorbuigingseisen algemeen binnen Europa, volgens de Eurocodes. Over dit verschil en hetgeen in onderliggend rapport wordt aangehouden, wordt in bijlage VIII: *Doorbuiging Houten Liggers Eurocode 5 versus NB* op blz. 65 nader ingegaan.

Een ander aspect met betrekking tot de doorbuiging is de doorbuiging als gevolg van afschuifvervorming. Vaak wordt deze niet meegenomen, echter kan deze bij hout⁵⁹ wel 5 tot 20% bedragen van de normale doorbuigvervorming (zie Porteous, et al. [33]). De extra doorbuiging als gevolg van afschuifvervorming wordt in de berekeningen voor hout en bamboe meegenomen, zie bijlage IX: *Afschuifvervorming* op blz. 69.

Een laatste punt van aandacht is de kruip. De luifel is geheel buiten gelegen en heeft men te maken met klimaatklasse 2. Dit heeft tot gevolg dat bij hout en bamboe de vervormingen door kruip waar men rekening mee moet houden aanzienlijk kunnen zijn, orde grootte van 50% van de normale doorbuiging. Zeker voor die balken waarbij de BGT maatgevend is kan dit een doorslaggevende factor zijn. Bamboe kruipt weinig tot niets. Echter hoeveel SWB5G daadwerkelijk kruipt is op dit moment onbekend. Ter vergelijking zijn de SWB5G balken tevens een keer doorgerekend zonder de kruip invloeden.

6.2 Algemene informatie

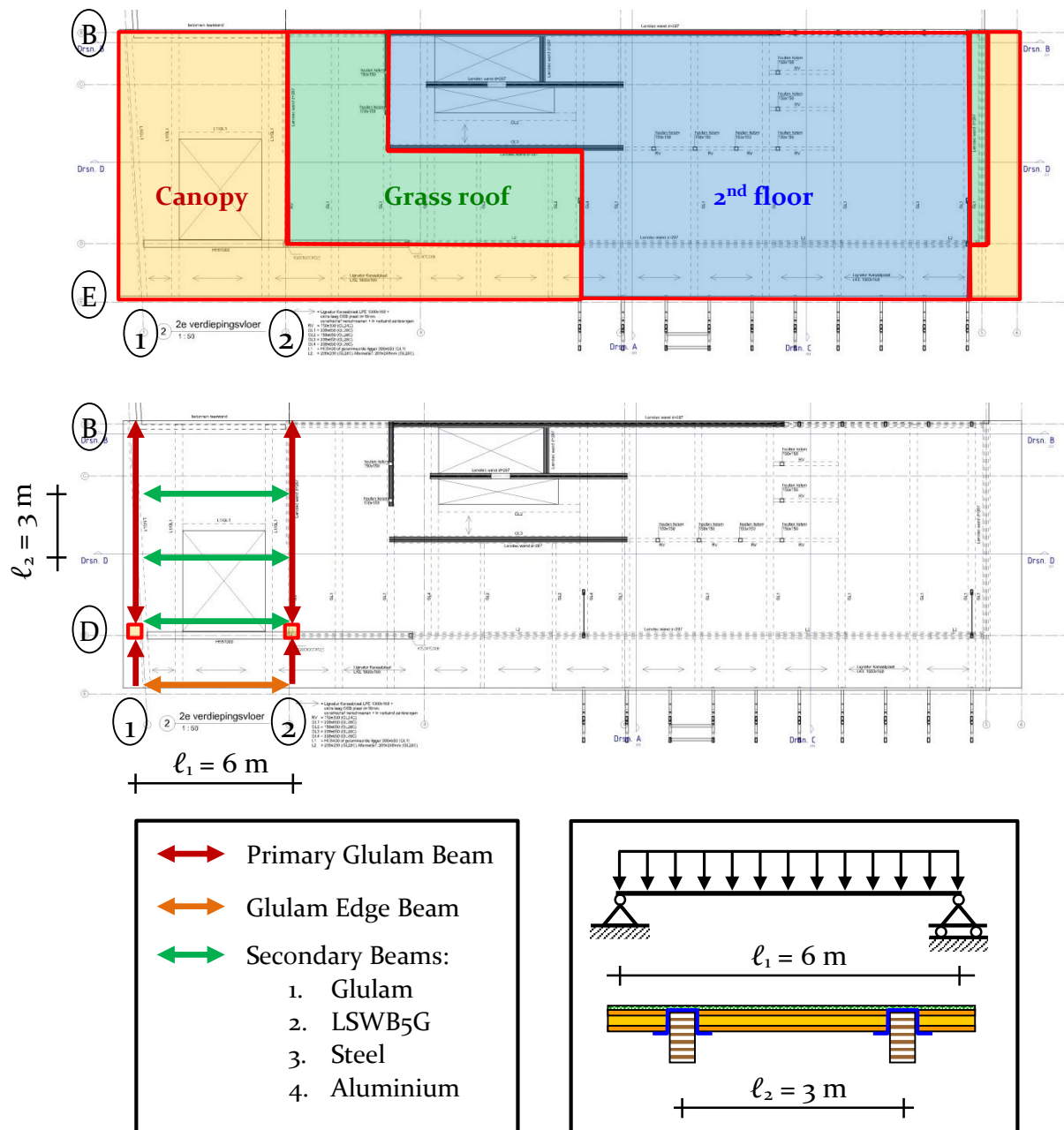
Het gebouw *Econnect* betreft een kantoorgebouw en ligt op het grensoverschrijdend bedrijventerrein Avantis, te Heerlen/Aken. De luifel is openbaar toegankelijk dak en er kunnen zich grote mensenmassa's op verzamelen.

⁵⁹ En bij Glulam en kan dus ook van belang zijn bij SWB5G en LSWB5G.

6.3 Geometrie Luifel



Geometry



Zijdelings uitknikken wordt voorkomen.
Klimaatklasse 2.

6.4 Resultaten statische berekeningen

Zoals al gemeld, zijn de daadwerkelijke berekeningen opgenomen in bijlage X. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 6-1: Resultaten berekeningen luifelbalken van Glulam, LSWB5G, staal en aluminium.

		b [mm]	h [mm]	ρ [kg/m³]	m [kg]
Glulam	GL20h	170	685	370	258.52
LSWB5G		135	545	1 200	529.74
Staal	S235	IPE 330		7 850	294.89
Aluminium	6082-T6	RHS 450x250x8		2 700	176.58
Alleen ter vergelijking, fictief zonder waarde!					
Hout	C18	180	718	380	294.22
LSWB5G	Zonder kruip	120	450	1 200	388.80

Bovenstaande resultaten, met name de massa's van de benodigde balken, zijn in de volgende paragraaf gebruikt voor de bepaling van de EL.

Voor andere sterkteklassen Glulam wordt verwezen naar Table X-1: *Minimum dimensions for different strength classes Glulam (precamber=10 mm)*. Voor andere sterkteklassen (fictieve) houten balken wordt verwezen naar Table X-2: *Minimum dimensions for different strength classes regular wood (only for comparison reasons, they have no practical value)*. Uit beide tabellen komt naar voren dat hoe hoger de sterkteklasse, hoe minder massa men nodig heeft. Dit zou kunnen suggereren dat men zou moeten streven naar deze hogere sterkteklassen. Niets is minder waar. Bij deze is de EL_{Direct} veel hoger zodat de totale EL, ondanks de iets kleinere massa, toch ongunstiger zal zijn.

6.5 Embodied Land per balk

In de *Embodied Energy* voor de materialen moet nog het transport van de fabriek naar de bouwplaats meegenomen worden, de *Transportation Energy*. Voor de afstanden over land wordt in overeenstemming met Arup [1]⁶⁰ 0.001 MJ/kg·km in rekening gebracht en worden onderstaande afstanden gehanteerd:

- Glulam komt van DeGrootVroomshoop, de afstand over land is 260 km.
- LSWB5G komt eerst van China naar BUCO-Import, Emblem in België, en vervolgens van BUCO-Import naar de bouwplaats, 120 km over land. Voor het transport vanuit China dient een EE_{TE} van 5.15 MJ/kg in rekening te worden gebracht (zie).
- De stalen balken komen van Tata Steel⁶¹ in IJmuiden, 250 km over land.
- De aluminium balken komen van Aleris in Duffel, België, 130 km over land.

Er volgt voor de *Transportation Energy* van Glulam, LSWB5G, staal en aluminium respectievelijk 0.26, 5.27, 0.25 en 0.13 MJ/kg. Per kg materiaal volgen onderstaand *Embodied Energy* waarden geleverd op de bouwplaats.

Tabel 6-2: $EL_{Indirect}$ per kg materiaal op de bouwplaats⁶².

		Glulam	Glulam _{Bio}	LSWB5G	LSWB5G _{Bio}	Staal	Aluminium
EE_{Total} [MJ/kg]	EE_{PE}	12.64 (1.37)	12.44 (1.37)	23.05 (3.23)	13.21 (3.23)	38.00 (12.24)	213.50 (65.24)
	EE_{CE}					2 648 230	9 000 000
	EE_{TE}	0.26	0.26	5.27	5.27	0.25	0.13
EE_{Total} [MJ/kg]	Som	12.90 (1.37)	12.70 (1.37)	28.31 (3.23)	18.47 (3.23)	2 648 268	9 000 214
Energie door mc-Si PV → vermenigvuldigen met 0.002315 [m ² ·year/MJ]							
$EL_{Indirect}$ [m ² ·year/kg]		29.86·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	29.40·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	65.54·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	42.76·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	6 130	20 834
EE_{PE} = Embodied Energy – Production Energy				Glulam met MUF			
EE_{RE} = Embodied Energy – Recycling Energy				Glulam _{Bio} met Bio-MUF			
EE_{CE} = Embodied Energy – Compensation Energy				LSWB5G met PF en MUF			
EE_{TE} = Embodied Energy – Transportation Energy				LSWB5G _{Bio} met Bio-PF en Bio-MUF			

⁶⁰ § 9.2.4, transportation by land, distance > 50 km, energy use for transportation = 0.001 MJ/kg·km.

⁶¹ Voorheen Corus, Hoogovens IJmuiden.

⁶² Het eerste getal is het gemiddelde en het getal tussen haakjes is de standard afwijking.

Samen met de *Embodied Land*_{Direct} volgen de totale EL waarden. Vermenigvuldigen met de massa's geeft de EL per balk en delen door de levensduur van het gebouw resulteert in m²-waarden:

Tabel 6-3: EL per balk.

	Glulam	Glulam _{Bio}	LSWB5G	LSWB5G _{Bio}	Steel	Aluminium
EL _{Direct} [m ² ·year/kg]	1600 619	8.150 (1.851)	22 247 204	1.381 (0.064)	0.51·10 ⁻³ (0.25·10 ⁻³)	0.33·10 ⁻³ (0.10·10 ⁻³)
EL _{Indirect} [m ² ·year/kg]	29.86·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	29.40·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	65.54·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	42.76·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	6130	20834
EL [m ² ·year/kg]	1600 619	8.180 (1.851)	22 247 204	1.423 (0.064)	6130	20834
Massa	258.52 kg	258.52 kg	529.74 kg	529.74 kg	294.89 kg	176.58 kg
EL [m ² ·year]	0.414·10 ⁹	2 114.60 (478.60)	11.881·10 ⁹	754.00 (34.11)	1.808·10 ⁶	3.679·10 ⁶
Levensduur = 50 jaar						
EL [m ²]	8.276·10 ⁶	42.29 (9.57)	237.612·10 ⁶	15.08 (0.68)	36155	73577
Glulam met MUF Glulam _{Bio} met Bio-MUF			LSWB5G met PF en MUF LSWB5G _{Bio} met Bio-PF en Bio-MUF			

Voor één stalen balk of één aluminium balk is gedurende 50 jaar 3.6 ha respectievelijk 7.4 ha aan land nodig! Dit zijn onrealistisch hoge waarden welke afkomstig zijn van de hoge waarden voor de *Compensation Energy*. Dit geldt eigenlijk voor alle metalen.

Nog erger is het gesteld met de gelamineerde bamboe balk waarbij de hars en de lijm beiden gemaakt zijn uit aardolie. Oorzaak hierbij is de gigantisch hoge waarden voor EL_{Direct} bij aardolie en aardgas. Het zelfde geldt in iets mindere mate voor de Glulam balk, ook hier loopt de EL in de miljoenen. En meer algemeen kan gesteld worden dat dit het geval zal zijn bij alle producten met lijmen gemaakt van aardolie en/of aardgas, zoals triplex platen, MDF, spaanplaten etc. De enige realistische waarden worden gevonden bij toepassing van lijmen en harsen voor 100% gemaakt uit bio-massa, zoals 42.29 m² voor de Glulam_{Bio} balk en 15.08 m² voor de LSBW5G_{Bio} balk. Of, zoals uit onderstaande tabel mag blijken, wanneer een normale houten balk toegepast kan worden.

Tabel 6-4: EL voor een houten balk C18, levensduur 50 jaar (geen reële waarde, alleen om te vergelijken).

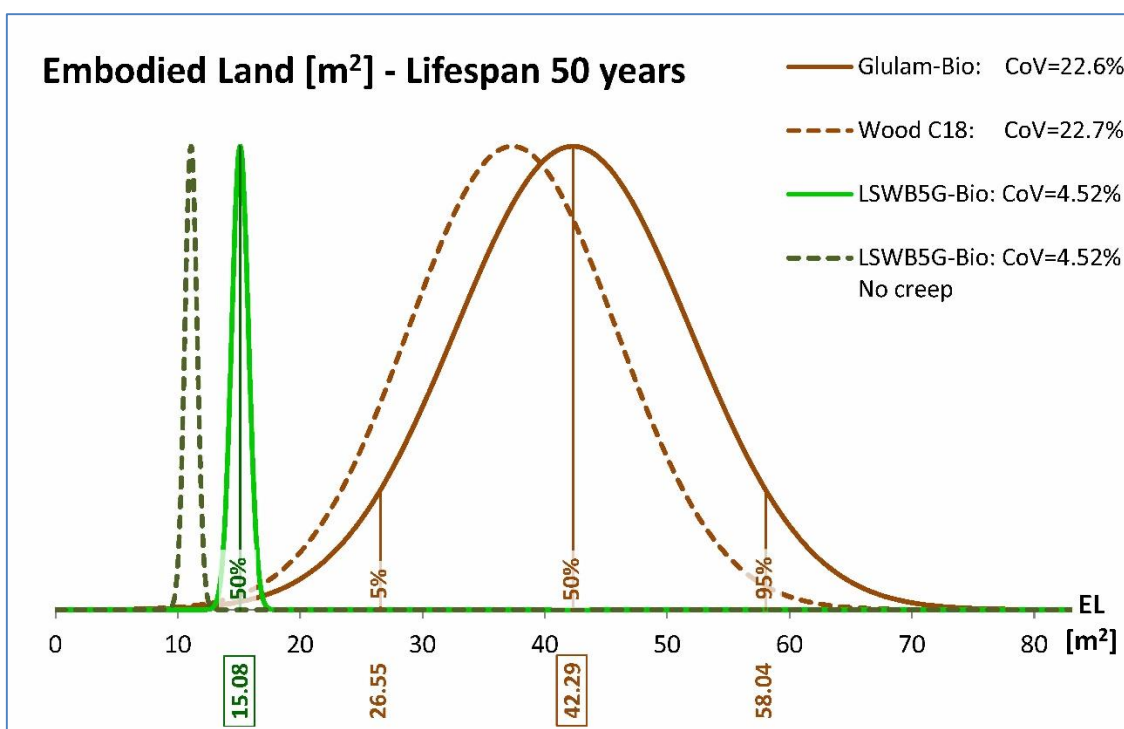
EL _{Direct} [m ² ·year/kg]	EE _{PE} [MJ/kg]	EE _{TE} [MJ/kg]	EE _{Total} [MJ/kg]	EL _{Indirect} [m ² ·year/kg]	EL [m ² ·year/kg]	Mass [kg]	EL [m ² ·year]	EL [m ²]
6.33 (1.44)	7.40 (2.92)	0.26	7.66 (2.92)	17.73·10 ⁻³ (6.76·10 ⁻³)	6.34 (1.44)	294.22	1866.43 (424.29)	37.33 (8.49)

Voor de LSWB5G balk zonder kruip dienen de EL waarden vermenigvuldigd te worden met 388.80/529.74.

Table 6-5: EL [m²] voor Hout (fictief), Glulam_{Bio}, en LSWB5G_{Bio}, Levensduur 50 jaar, Normale verdeling.

	EL [m ²]			Fractiel		Massa
	Mean	SD	CoV ⁶³	5%	95%	
Glulam _{Bio} GL20h	42.29	9.57	22.63%	26.55	58.04	529.74 kg 388.80 kg
Hout C18	37.33	8.49	22.73%	23.37	51.29	
LSWB5G _{Bio}	15.08	0.68	4.52%	13.96	16.20	
Zonder Kruip	11.07	0.50	4.52%	10.24	11.89	

De EL voor Glulam_{Bio} is iets hoger dan die voor Hout wat hoofdzakelijk komt door het schaafverlies bij het laminatie proces (EL_{Direct} is ongeveer 99.6% van de totale EL). Duidelijk is te zien dat een gelamineerde balk van SWB5G met bio harsen en lijmen een factor 3 keer kleinere EL heeft dan een Glulam balk met Bio lijmen. Indien kruip niet meegenomen hoeft te worden, dan wordt dit ongeveer een factor 4. Of LSWB5G veel of weinig kruipt, dient een apart onderzoek nader onderzocht te worden.



Figuur 6-1: Normale verdelingen van de EL-waarden voor de balken van Econnect bestaande uit Hout (fictief), Glulam_{Bio} en LSWB5G_{Bio}, Levensduur 50 jaar.

⁶³ CoV = Coefficient of Variation.

7 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies uit Zindel-Manders, et al. [41] worden in onderliggend allen onderzoek bevestigd dan wel aangevuld.

De benodigde balken voor de luifel van *Econnect* hebben allemaal extreem hoge EL-waarden. Bij LSWB5G door het gebruik van harsen (PF) en lijmen (MUF) die gemaakt zijn van aardolie en/of aardgas en daarmee gigantisch hoge waarden voor de EL_{Direct} hebben. Hetzelfde geldt voor de Glulam balk en meer algemeen voor alle houtachtige producten waarbij lijmen gebruikt worden. En deze lijmen zijn op het moment allemaal in meer of mindere mate gemaakt van aardolie en/of aardgas.

De hoge EL waarden (ook hier extreem hoog) bij de stalen balk en aluminium balk komen door de hoge waarden voor de *Compensation Energy*. Eigenlijk geldt dit voor alle metalen.

De enige reële oplossingen zijn de Glulam balk en LSWB5G balk met de 100% lijmen en harsen gemaakt van biomassa. Helaas bestaan deze op het moment nog niet. De verwachting is wel dat ze binnen enkele jaren ontwikkeld zullen worden. De LSWB5G balk is dan ongeveer 3 keer gunstiger als de Glulam balk. Wanneer kruip buiten beschouwing mag worden gelaten, wordt dit zelfs 4 keer gunstiger. Echter, in hoeverre kruip meegenomen moet worden zal middels aanvullend onderzoek aangetoond moeten worden.

In het algemeen is volgens de MAXergy methodologie alleen een normale houten balk een reële oplossing als materiaal voor dragende elementen. Echter de afmetingen hiervan zijn beperkt. Zolang 100% bio-lijmen en harsen nog niet ontwikkeld zijn, vergt dit voorlopig een andere manier van ontwerpen! Grote overspanningen zijn voorlopig niet meer mogelijk.

Uit de statische berekeningen komt naar voren dat de sterkte/stijfheid verhouding⁶⁴ van de LSWB5G balk ongunstig is. Dit heeft tot gevolg dat vlugger op de vervormingen gedimensioneerd zal moeten worden. Het versoepelen van de eisen voor deze vervormingen zal een gunstig effect hebben, met name voor de grotere overspanningen. Echter heeft dit met de normen te maken welke niet zo eenvoudig te veranderen zijn. Het voornoemde onderzoek naar kruip kan wel een positieve bijdrage hierin leveren.

In hoofdstuk 3 is de nodige aandacht besteed aan de conversie factor f waarmee de benodigde *Embodied Energy* omgerekend wordt naar *Embodied Land*. In onderliggend onderzoek is voor deze conversie factor het primaire niveau of de 1^{ste} orde gehanteerd.

⁶⁴ Stijve vezels omgeven door flexibele parenchyma cellen ingebed in PF. De hoofdcomponent voor de relatieve lage elasticiteitsmodulus zijn de parenchyma cellen. Een andere hars zal vermoedelijk hierin geen verandering geven.

Meer in overeenstemming met de andere berekeningen binnen MAXergy zou het secundaire niveau of de 2^{de} orde meer op zijn plaats zijn. Bij het secundaire niveau dienen de EL van de materialen in de energieomvormer zelf en van de energiedrager ook meegenomen te worden. Gelijk hier gevonden is voor de balken, zal het gebruik van metalen in de energieomvormer of het gebruik van aardolie of aardgas voor de energiedrager leiden tot grote waarden voor de factor f . Dit kan zelfs leiden tot een foute negatieve waarde. Bij een negatieve waarde heeft men meer energie nodig om de drager geschikt te maken of de energieomvormer te maken dan deze ooit zullen opwekken. Gezocht dient dus te worden naar een energieomvormer zonder metalen en het liefste naar een drager die geen aanpassing behoeft (zoals zon, wind of getijden).

Uit de EL berekeningen komt ook naar voren dat de *Transport Energy* weinig invloed heeft, zeker lokaal transport binnen Europa. Hierbij is wel dezelfde factor f gebruikt wat wil zeggen dat voor het transporteren de energie opgewekt is met mc-Si zonnecellen. Variatie van de diverse bronnen voor *Transport Energy* is in onderliggend onderzoek niet gedaan en dient in een aanvullend onderzoek te gebeuren. Van belang daarbij is wel dat de energie voor al het transport, ook voor de grondstoffen, expliciet gemaakt dient te worden. Bijvoorbeeld in de ICE database is de *Transportation Energy* vaak samen genomen met de *Production Energy*.

Misschien nog ten overvloede, bij het gebruik⁶⁵ van aardolie en/of aardgas is de EL_{Direct} zo groot dat dit alles overschaduwet. De invloeden van al de andere materialen komen niet meer naar voren.

Idem, bij het gebruik van metalen is de $EL_{Indirect}$ zo groot dat ook deze alles overschaduwet en de andere materialen niet meer zichtbaar zijn.

8 Slotopmerking

In bijlage XI: *Selectie staalprofielen met minimaal materiaalgebruik* op blz. 88 is nog een kleine studie opgenomen met qua materiaal gebruik en dus qua *Embodied Land* de 95 en 49 meest gunstigste Europese stalen profielen.

⁶⁵ En dus ook producten gemaakt van aardolie en aardgas.

9 Referenties

1. **Arup**, *Consultancy Study on Life Cycle Energy Analysis of Building Construction*, 2006, Ove Arup & Partners Hong Kong Ltd, Electrical and Mechanical Services Department Hong Kong.
2. **Bardi, U.**, *Extracting Minerals from Seawater: An Energy Analysis*. Sustainability 2010, 2010. 2: p. 980-992.
3. **E_kwadraat_advies**, *Biogas in de mobiliteit - Lokale productie, transportsystemen en afzet in de mobiliteit*, 2011, In opdracht van AgentschapNL.
4. **Fan, J., et al.**, *Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil*. Renewable Energy, 2011. 36: p. 632-641.
5. **Gommans, L.**, *Gebiedsgerichte Energetische Systeemoptimalisatie*, 2012.
6. **Hammond, G., et al.**, *ICE (Inventory of Carbon & Energy) v2.0*, 2011.
7. **Houben, J.J.M.**, *IMDEP A1.1.2 Rapport met inventarisatie duurzame materialen voor de gebouwschil en voor substitutie van onderdelen in PV modules - Mechanische sterkte & Duurzame materialen*, 2011, Zuyd University of Applied Sciences.
8. **Houben, J.J.M.**, *IMDEP A2.1.2 Rapport voor ontwikkeling van duurzame materialen voor de gebouwschil en duurzame onderdelen in PV modules - Dimensionering Testbalken*, 2012, Zuyd University of Applied Sciences.
9. **Houben, J.J.M.**, *IMDEP 2.1.9 Mechanische testen op StrandWoven Bamboe van de 5de Generatie (SWB5G)*, 2016, Zuyd University of Applied Sciences.
10. **Houtwijzer**, *Sterkte gegevens van Hout*, 2014, Centrum Hout.
11. **IAI**, *Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminium Industry*, 2003, International Aluminium Institute.
12. **Kuckshinrichs, W., et al.**, *Resource-orientated Analysis of Metallic Raw Materials - Findings of CRC 525 for Aluminium*, in *Matter and Materials* 2003, Forschungszentrum Jülich, RWTH-Aachen.
13. **Lugt, P.v.d., et al.**, *Bamboo, a Sustainable Solution for Western Europe Design Cases, LCAs and Land-use*, 2009, INBAR Technical Report No. 30 (draft version).
14. **Mohan, D., et al.**, *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review*. Energy & Fuels, 2006. 20: p. 848-889.
15. **NEN-EN_1990+A1+A1/C2-NA_Dutch**, *Eurocode 0: Basis of structural design*, 2011, Eurocode.
16. **NEN-EN_1990+A1+A1/C2**, *Eurocode 0: Basis of structural design*, 2011, Eurocode.
17. **NEN-EN_1991-1-1+C1-NA_Dutch**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, 2011, Eurocode.
18. **NEN-EN_1991-1-1+C1**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, 2011, Eurocode.
19. **NEN-EN_1991-1-3+C1-NA_Dutch**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads + Dutch NA (2007)*, 2011, Eurocode.

20. **NEN-EN_1991-1-3+C1**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads + Dutch NA* (2007), 2011, Eurocode.
21. **NEN-EN_1991-1-4+A1+C2-NA_Dutch**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions + Dutch NA* (2007), 2011, Eurocode.
22. **NEN-EN_1991-1-4+A1+C2**, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions + Dutch NA* (2007), 2011, Eurocode.
23. **NEN-EN_1993-1-1+C2-NA_Dutch**, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2011, Eurocode.
24. **NEN-EN_1993-1-1+C2**, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2011, Eurocode.
25. **NEN-EN_1995+C1+A1-NA_Dutch**, *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, 2013, Eurocode.
26. **NEN-EN_1995+C1+A1**, *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, 2011, Eurocode.
27. **NEN-EN_1999-1-1+A1-NA_Dutch**, *Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules*, 2011, Eurocode.
28. **NEN-EN_1999-1-1+A1**, *Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules*, 2011, Eurocode.
29. **NEN-EN_14080**, *Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*, 2013, Eurocode.
30. **NEN-EN_14374**, *Timber structures - Structural laminated veneer lumber - Requirements*, 2004, Eurocode.
31. **NEN-EN_15497_(2nd_draft)**, *Structural finger jointed solid timber - Performance requirements and minimum production requirements*, 2011, Eurocode.
32. **Oosterbaan, A., et al.**, *Ontwikkeling van vraag en aanbod van rondhout in Nederland en aangrenzend gebied en mogelijke knelpunten en kansen voor de bos- en houtsector voor de periode 2005-2025*, 2007, Alterra 1510, Wageningen UR.
33. **Porteous, J., et al.**, *Structural Timber Design to Eurocode 5*. 2007.
34. **Rovers, R.**, *MAXergy - De Embodied Land indicator - Achtergrond en onderbouwing*, 2013, RiBuiLT - Zuyd University of Applied Sciences.
35. **Rovers, R., et al.**, *o-material building: space time analyses*, in *Towards o-impact buildings and environments*, SBio Western Europe 2010: Maastricht-Hasselt-Liège-Aachen.
36. **Rovers, V.**, *1.1.2 MAXergy - Duurzaamheidsberekening op basis van landgebruik*, 2011, Zuyd University of Applied Sciences.
37. **RWS**, *Improving and testing a land use methodology for LCA (draft 2)*, 2002, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
38. **Sinke, W.C.**, *Introduction to photovoltaic solar energy*, 2010, ECN Solar Energy, Utrecht University & EU PV Technology Platform: Presentation at Zuyd University on December 14th, 2010.
39. **UNECE/FAO**, *Forest Product Conversion Factors for the UNECE Region*, in *Geneva Timber And Forest Discussion Paper 49 - 2010*, Food and Agriculture Organization, United Nations Economic Commission for Europe.

- 40. **Wilson, J.B.**, *Life-Cycle Inventory of Formaldehyde-Based Resins used in Wood Composites in Terms of Resources, Emissions, Energy and Carbon*. Wood and Fiber Science, 2010. **42** (CORRIM Special Issue): p. 125–143.
- 41. **Zindel-Manders, H., et al.**, *IMDEP_A2.1.4a - Balken-Transport-Bandbreedtes bij Hout-Bamboe-Staal-Aluminium - v2.0*, 2014, Zuyd University of Applied Sciences.

Rapport

Auteur
Jos Houben

Versie
1.0

Aanmaakdatum
10.03.2014

Laatste wijziging
29.03.2016

MAXergy

BIJLAGEN

Balken uit
Hout-Bamboe-Staal-Aluminium

I. Afschatting operationeel landgebruik Biomassa centrales

In deze bijlage wordt een grove afschatting gemaakt van het direct landgebruik van een gemiddelde Biomassa elektriciteitscentrale. “Grove”: daar geen onderscheid is gemaakt naar de aard van de gebruikte biomassa, voor de geproduceerde energie gebruik is gemaakt van de gegevens op Wikipedia en het oppervlak van het terrein waar de centrales op staan opgemeten is met Google Maps. Voor een eerste indicatie wordt dit als voldoende nauwkeurig beschouwd.

Tabel I-1: Operationeel landgebruik Biomassa centrales

Centrale	A m ²	Vermogen MW ⁶⁶	MJ/h	Energie MJ/year	MJ/m ² year	m ² year/MJ
Biomassacentrale Twente B.V. Goor	3 105	1.75	6 300	55.19·10 ⁶	17 774	56.26·10 ⁻⁶
Biomassa Energiecentrale Sittard	11 545	1.20	4 320	37.84·10 ⁶	3 278	305.07·10 ⁻⁶
BMC Moerdijk	45 010	36.00	129 600	1 135.30·10 ⁶	25 223	39.65·10 ⁻⁶
Bio-energiecentrale Cuijk	31 855	25.00	90 000	788.40·10 ⁶	24 750	40.40·10 ⁻⁶
				Gemiddelde	17 756	

Bij de onderste twee is gebruik gemaakt van een wervelbedketel. Alleen kijkend naar deze laatste twee is een waarde van 25 000 MJ/m²year een goede eerste indicatie voor de opbrengst van een biomassa centrale per jaar per m² grond waar die centrale op staat.

⁶⁶ https://nl.wikipedia.org/wiki/Lijst_van_elektriciteitscentrales_in_Nederland, voor het laatst geraadpleegd op 15 maart 2016.

II. Estimation of raw materials for Phenol-Formaldehyde

Wilson [40]⁶⁷, figure 2:

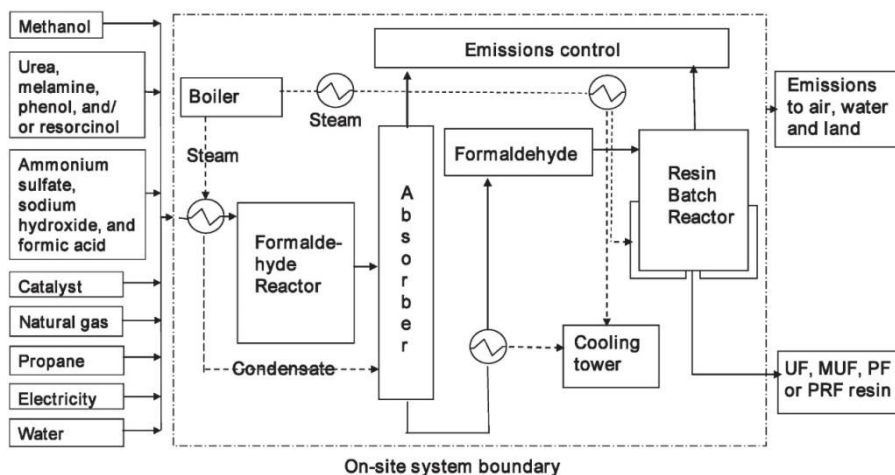


Figure II-1: On-site (gate-to-gate) system boundary for resin production.

Wilson [40], table 5:

1 kg PF (47% solids) = 0.244 kg Phenol + 0.209 kg Methanol + 0.061 kg Sodium hydroxide

1 kg PF (100% solids) = 0.519 kg Phenol + 0.445 kg Methanol + 0.130 kg Sodium hydroxide

<http://www.essentialchemicalindustry.org/processes/cracking-isomerisation-and-reforming.html>:

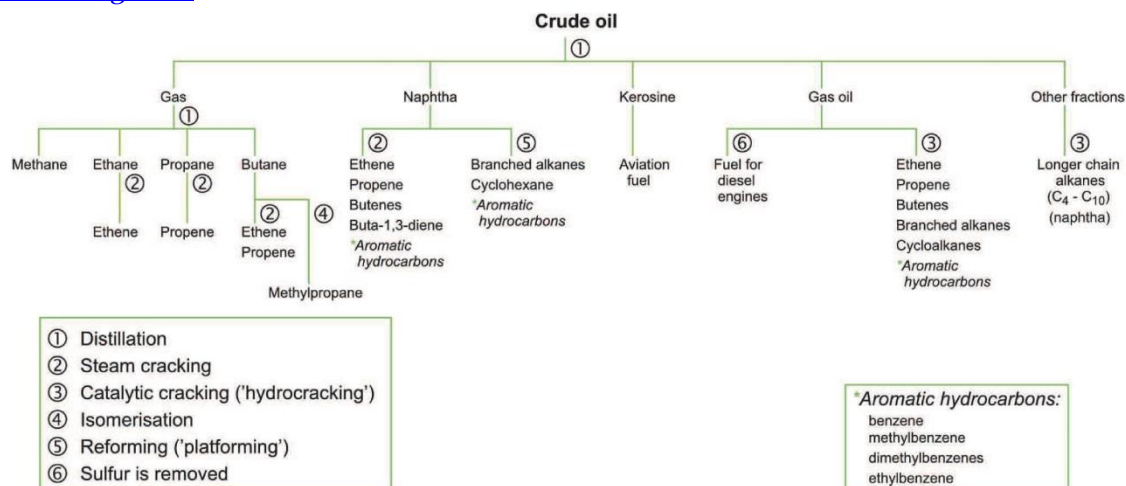


Figure II-2: Cracking, isomerisation and reforming of crude oil.

⁶⁷ Wilson, J.B., Life-Cycle Inventory of Formaldehyde-Based Resins used in Wood Composites in Terms of Resources, Emissions, Energy and Carbon. Wood and Fiber Science, 2010. 42 (CORRIM Special Issue): p. 125-143.

Phenol

<http://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/phenol.html>:

Product yield phenol is 85-87%, based on benzene, mean = 86%.

0.519 kg Phenol = 0.603 kg Benzene (1-methylbenzene or cumene)

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=unknown01-20010917-85>:

1.000 kg Benzene = 0.672 kg Crude Oil

0.519 kg Phenol = 0.406 kg Crude Oil

Methanol

<http://www.essentialchemicalindustry.org/methanol.html>:

The feedstock, over the last 40 or more years, has been oil or natural gas but recently also coal (China) and more often bio-mass.

<http://www.essentialchemicalindustry.org/processes/distillation.html>:

Max 2% gas out of crude oil.

<http://www.essentialchemicalindustry.org/methanol.html>:

Eventually achieved a 97% conversion of the reactants.

0.445 kg Methanol = 0.458 kg Crude Oil

Alternatively with bio-mass

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=CPMCTHXXX1998-03-24875>:

2 MJ of Willow is needed for 1 MJ of Methanol and

http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf and Wilson [40] caption table 11:

HHV⁶⁸_{Methanol} = 22.884 MJ/kg and HHV_{Wood} = 20.9 MJ/kg.

0.0957 kg Willow is needed for 0.0437 kg Methanol.

0.519 kg Methanol = 0.974 kg Willow

Sodium hydroxide

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=ABBCR000115702>:

0.59 kg Sodium chloride is needed for 1 kg of Sodium hydroxide.

0.130 kg Sodium hydroxide = 0.077 kg purified Sodium chloride

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=ABBCR000115699>:

1.07 kg Sodium chloride from mining is needed for 1 kg of purified Sodium chloride.

0.130 kg Sodium hydroxide = 0.082 kg Sodium chloride from mining

Or with approximately 3.5% salt in seawater:

0.130 kg Sodium hydroxide ≈ 2.2 kg Seawater

Results

1 kg PF (100% solids) = 0.864 kg Crude Oil + 0.082 kg Sodium chloride from mining

Or 1 kg PF (100% solids) = 0.406 kg Crude Oil + 0.974 kg Willow + 2.2 kg Seawater

Or 1 kg PF (100% solids) = 0.864 kg Crude Oil + 2.2 kg Seawater

⁶⁸ HHV = Higher Heating Value.

III. Estimation of raw materials for Melamine-Ureum-Formaldehyde

Wilson [40], table 5:

1 kg MUF (60% solids) = 0.397 kg Urea + 0.304 kg Methanol + 0.081 kg Melamine

1 kg MUF (100% solids) = 0.662 kg Urea + 0.507 kg Methanol + 0.135 kg Melamine

Wilson [40], caption table 6 and table 11:

HHV_{Natural Gas} = 54.4 MJ/kg and HHV_{Crude Oil} = 45.5 MJ/kg.

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=ancpny0011411>:

1 kg MUF 1242 = 42.51 MJ of Natural Gas = 0.781 kg of Natural Gas

<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Scripts/sheet.asp?ActId=ancpny0011412>:

1 kg Hardener 2542 = 22.25 MJ of Crude Oil + 90.07 kg Sulfur *High amount of Sulfur ?*
= 0.489 kg of Crude Oil + 90.07 kg Sulfur

http://www.mrgconnections.com.au/uploads/1/5/8/7/15873982/muf_1242-2542.pdf:

80% of MUF 1242 + 20% of Hardner 2542

1 kg MUF = 0.625 kg Natural Gas + 0.098 kg Crude Oil + 18.014 kg Sulfur

Results

1 kg MUF = 0.625 kg Natural Gas + 0.098 kg Crude Oil + 18.014 kg Sulfur

IV. Strand Woven Bamboo of the 5th Generation

IV.1 EL_{Direct}

Voor de productie van SWB5G kunnen bijna alle halmen gebruikt worden dus ook kromme halmen en dunne halmen (diameters vanaf 40 mm). De opbrengst per ha is daardoor ook hoog. In 2012 zijn Moso bamboe bossen in de regio Guangde (provincie Anhui) en de fabriek voor SWB5G bezocht. De jaarlijkse opbrengst van bamboe halmen voor de productie van SWB5G was 17000 kg/ha.

Tevens is overleg gevoerd met Dr. Yahui Zhang van de *Chinese Academy of Forestry* (CAF) voor de *yields* van andere regio's specifiek voor de productie van SWB5G. Een en ander resulterend in onderstaand overzicht.

Tabel IV-1: Yields Moso bamboe voor de productie SWB5G.

Reference	Providence	Region	Annual Yield	
Dr. Yahui Zhang, CAF-Beijing (e-mail)	Zhejiang	Anji	35 000	kg/ha
	Anhui	Guangde	20 000	kg/ha
	Jiangxi	Zixi	18 000	kg/ha
Producer SWB5G (bezoek in 2012)	Anhui	Guangde	17 000	kg/ha

De waarde van 35 000 kg/ha is erg hoog en wijkt ook veel af van de andere opbrengsten. Het is op dit moment onduidelijk of hier sprake is van rooibouw/kaalslag of toch van duurzaam bosbeheer. Voorlopig wordt deze waarde buiten beschouwing gelaten. Uit de andere 3 getallen volgen onderstaande waarden voor de *yield*:

Tabel IV-2: Gemiddelde, SD en COV voor de yields Moso bamboe voor de productie SWB5G.

Gemiddelde	18 333	kg/ha·jaar
Standaard afwijking (SD)	1 528	kg/ha·jaar
Variatie coefficient (COV)	8.33%	

IV.2 EL_{Indirect}

Voor de berekening van de *Embodied Energy* heeft Lugt, et al. [13] als basis gediend. In bijlage A uit [13] wordt vanaf blz. 95 het productieproces van SWB beschreven en wordt een Eco-analyse uitgevoerd resulterend in een totaal overzicht per FU⁶⁹ (tabel A9). De FU waar de analyse van is uitgevoerd is een plank van 15 mm dik, 100 mm breed en 1.9 m lang met een volumieke massa van 1 080 kg/m³. Verder betreft dit SWB van de 3^{de} generatie, de variant waar eerst latjes van de ronde halmen worden gemaakt, met 23% aan PF hars. Voor SWB5G (platen van 1250 mm breed, 2500 mm lang en 40 mm dik met een volumieke massa van 1 200 kg/m³) worden de volgende aanpassingen doorgevoerd ten opzicht van de waarden uit [13]:

- Het volume van één FU is 0.00285 m³ en deze weegt 3.078 kg.
- (1) De bamboe wordt geoogst uit natuurbossen, door lokale boeren met een handzaagje → geen benzine bij de oogst nodig.
- (2) Deze afstand is ongeveer gelijk aan de afstand van de bamboe bossen naar de SWB5G fabriek.
- (3, 4 en 5) Er worden geen latjes (*strips*) gemaakt.
- (9) Bij SWB5G worden 5 machines gebruikt voor het splijten van de bamboe.
- (10) Voor PF volgt uit § 4.4 een $EL_{EE-PF} = 46.53$ MJ/kg met uit Tabel 5-13 het aandeel $220.65/1200 = 18.39\%$. Uit § 4.6.2 volgt voor Bio-PF 42.14 MJ/kg.
- (13) Er worden platen en geen balken gemaakt.
- (14) Bij de platen wordt ongeveer 7.5 m gezaagd (rondom), dit in tegenstelling tot ongeveer 4 m bij één FU.
- (15) Te schuren volume is $6.25 \cdot 0.005$ m³ in tegenstelling tot $0.38 \cdot 0.001$ m³.
- (16) Transport naar de haven van Shanghai is ongeveer 235 km.
- (17) Zeetransport naar de Rotterdamse haven wordt gelijk gehouden, 19 208 km.
- (18) Transport van Rotterdam naar BUCO-Import is ongeveer 130 km.
- In overeenstemming met § 4.1 wordt voor transport in rekening gebracht:
 - landtransport < 50 km → 0.0027 MJ/kg·km;
 - landtransport > 50 km → 0.0010 MJ/kg·km;
 - zeetransport → 0.0002 MJ/kg·km.
- Omreken factor van kWh naar MJ = 3.6.

De andere waarden worden gelijk gehouden. Op de volgende pagina is de berekening opgenomen, er volgt:

Tabel IV-3: Overzicht EL_{Indirect} voor SWB5G platen van 40 mm dikte en transport naar België.

EL _{Indirect}		PF	PF _{Bio}
	EE _{Production Energy}	23.084 MJ/kg	15.048 MJ/kg
	EE _{Transportatin Energy}	4.288 MJ/kg	4.288 MJ/kg
	EE _{Total}	27.371 MJ/kg	19.336 MJ/kg

⁶⁹ FU = *Functional Unit*

Tabel IV-4: Calculation EL_{Indirect} SWB_{5G}, including transportation to Belgium.

Process step	SWB _{3G} [13]	Calculation	SWB _{5G}
1. Cultivation and harvesting from plantation: Gasoline consumption	0.010 ℓ/FU	-	-
2. Transport from plantation to strip manufacturing facility	30 km/truck 492.3 FU	$30 \cdot 0.0027$	0.081 MJ/kg
3. Strip making	0.1 kWh/FU	-	-
4. Transport from strip manufacturing facility to factory	600 km/truck	-	-
5. Rough planing	0.66 kWh/FU	-	-
6. Splitting strips	0.10 kWh/FU	$\frac{0.10 \cdot 3.6}{3.078}$	0.117 MJ/kg
7. Carbonization	0.35 kWh/FU	$\frac{0.35 \cdot 3.6}{3.078}$	0.409 MJ/kg
8. Drying	2.58 kWh/FU	$\frac{2.58 \cdot 3.6}{3.078}$	3.018 MJ/kg
9. Crushing strips	0.17 kWh/FU	$5 \cdot \frac{0.17 \cdot 3.6}{3.078}$	0.994 MJ/kg
10. Glue, PF ⁷⁰	0.710 kg/FU	$46.53 \cdot 18.4\%$	8.556 MJ/kg
11. Pressing strips to beam	0.29 kWh/FU	$\frac{0.29 \cdot 3.6}{3.078}$	0.339 MJ/kg
12. Activating glue in oven	0.35 kWh/FU	$\frac{0.35 \cdot 3.6}{3.078}$	0.409 MJ/kg
13. Sawing beams	0.044 kWh/FU	-	-
14. Sawing planks	0.091 kWh/FU	$\frac{0.091}{3.078} \cdot \frac{7.5}{4} \cdot 3.6$	0.200 MJ/kg
15. Sanding planks	0.094 kWh/FU	$\frac{0.094}{3.078} \cdot \frac{6.25 \cdot 0.005}{0.38 \cdot 0.001} \cdot 3.6$	9.041 MJ/kg
16. Transport from factory to harbor	0.93 ton.km/FU	$235 \cdot 0.0010$	0.235 MJ/kg
17. Transport from harbor to harbor	59.60 ton.km/FU	$19208 \cdot 0.0002$	3.842 MJ/kg
18. Transport from harbor to warehouse	0.360 ton.km/FU	$130 \cdot 0.0010$	0.130 MJ/kg
Total			27.371 MJ/kg

⁷⁰ Voor Bio-PF volgt een waarde van $2.83 \cdot 18.39\% = 0.521$ MJ/kg en totaal 15.048 MJ/kg.

V. Glulam – volumeverlies & benodigde lijm

Volumeverlies

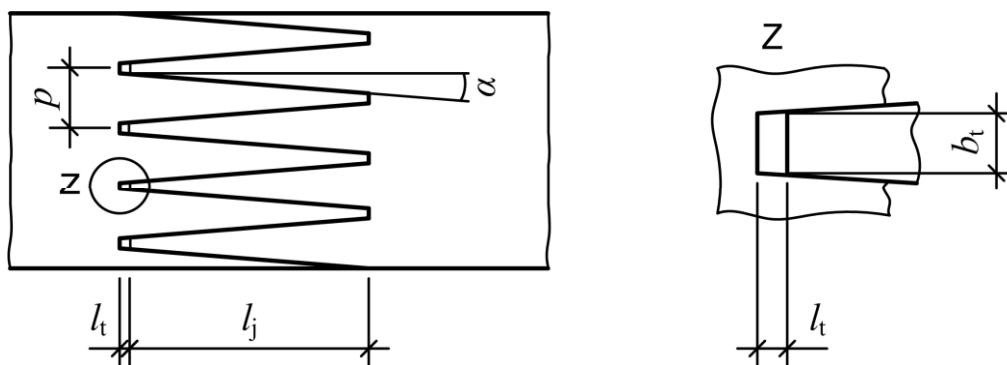
Nadat de planken van een gelamineerde balk op elkaar zijn gelijmd dient de balk aan alle zijden nog eens geschaafd te worden. Tevens dienen de planken na het vingerlassen op dikte geschaafd te worden. Bij het vingerlassen worden de slechte stukken uit het hout gehaald zodat de gevraagde kwaliteit wordt verkregen wat resulteert in een lengte verlies.

Voor het schaafverlies wordt uitgegaan van een referentiebalk met een hoogte van 600 mm, een breedte van 100 mm en 15 planken van 40 mm dikte. Per plank verliest men 5 mm aan schaafverlies na het vingerlassen en per balk nog eens 5 mm zowel in de breedte als de hoogte na het lamineren. Volgens opgave MEVO⁷¹ is het lengte verlies ongeveer 6% wanneer men uitgaat van de sterkteklasse C18 (bij C24 is dit 10% en bij foutvrij kan dit oplopen tot 40%). Er volgt onderstaand volumeverlies voor een gelamineerde balk met basismateriaal C18:

$$\text{verlies}^{72} \approx \frac{105 \cdot (15 \cdot 45)}{100 \cdot 600} \cdot 1.06 - 1.00 = 25.21\% \approx 25\%$$

Volgens opgave DeGrootVroomshoop⁷³ is het totaalverlies ongeveer 40%. Hier wordt vooralsnog niet vanuit gegaan.

Lijm



Figuur V-1: Geometrie vingerlas.

In tabel 1 van [31] worden een aantal veel gebruikte geometrieën voor vingerlassen gegeven. De hoek α van de vinger varieert hierbij tussen ongeveer 4° en 6°. Bij een

⁷¹ MEVO Houtindustrie te Helmond, mail van 25 oktober 2013.

⁷² Bij C24 wordt dit ongeveer 30% en bij foutvrij kan dit oplopen tot 65%.

⁷³ De Groot Vroomshoop Bouwsystemen B.V. te Vroomshoop, mail van 29 oktober 2013.

gemiddelde hoek van 5° , volgt voor het lijmoppervlak een toename ten opzichte van de doorsnede van:

$$A_{lijm} = \frac{1}{\sin 5^\circ} \cdot A_{doorsnede} \approx 11.5 \cdot A_{doorsnede}$$

Volgens opgave MEVO wordt voor de vingerlas ongeveer 150 gr/m^2 MUF lijm gebruikt. Wanneer ervan wordt uitgegaan dat gemiddeld om de 2 m een vingerlas zit, dan volgt voor het lijmverbruik:

$$\frac{11.5 \cdot 0.150}{2} = 0.863 \text{ kg/m}^3 \text{ hout}$$

Voor de lamellen wordt ongeveer 200 gr/m^2 MUF verbruikt. Dit resulteert voor de referentie balk met 15 lamellen:

$$\frac{(15 - 1) \cdot 0.105 \cdot 0.200}{0.100 \cdot 0.600} = 4.900 \text{ kg/m}^3 \text{ hout}$$

En totaal volgt nu $5.763 \text{ kg MUF per m}^3 \text{ hout}$. Volgens opgave DeGrootVroomshoop is het lijmverbruik ongeveer $10 \text{ kg MUF per m}^3 \text{ hout}$. Hier wordt vooralsnog niet vanuit gegaan. Met een gemiddelde volumieke massa van 370 kg/m^3 voor GL2oh [29] volgt uiteindelijk:

$$\frac{5.763}{370} = 0.0156 \text{ kg MUF/kg Glulam}$$

VI. Gelamineerde SWB5G – volumeverlies & benodigde lijm

Volumeverlies

Gelijk aan bij Glulam (bijlage V) wordt hier uitgegaan van een referentiebalk van 100·600 mm² opgebouwd uit lamellen van 40 mm netto dikte uit 45 mm bruto dikte. In tegenstelling tot hout heeft men in SWB5G geen slechte stukken zoals noesten. Rekening houdend met lamellen van 2.5 m lengte en een lengteverlies⁷⁴ door het vingerlassen van maximaal 40 mm, volgt:

$$\text{verlies} \approx \frac{105 \cdot (15 \cdot 45)}{100 \cdot 600} \cdot \frac{2500}{2460} - 1.00 = 20.05\% \approx 20\%$$

Lijm

Voor het lijmverbruik bij LSWB5G⁷⁵ wordt uitgegaan dat ook dit hetzelfde is als bij Glulam, dus 150 gr/m² MUF lijm voor de vingerlassen en 200 gr/m² MUF lijm voor het lamineren. Dit laatste geeft weer 4.90 kg/m³ bamboe voor het lamineren. Voor de vingerlassen wordt uitgegaan van een hoek α van 4° en één vingerlas per 2.5 m. Er volgt:

$$A_{\text{lijm}} = \frac{1}{\sin 4^\circ} \cdot A_{\text{doorsnede}} \approx 14.3 \cdot A_{\text{doorsnede}}$$

$$\frac{14.3 \cdot 0.150}{2.460} = 0.872 \text{ kg/m}^3 \text{ LSWB5G}$$

En totaal volgt nu 5.772 kg MUF per m³ SWB5G. Met een gemiddelde volumieke massa van 1200 kg/m³ volgt uiteindelijk:

$$\frac{5.772}{1200} = 4.81 \cdot 10^{-3} \text{ kg MUF/kg LSWB5G}$$

⁷⁴ Vingerlengte van 30 mm met 2 keer 5 mm extra zaagverlies, geeft 40 mm.

⁷⁵ LWSB5G = *Laminated Strand Woven Bamboo of the 5th Generation*.

VII. Mechanische eigenschappen SWB5G

Strand Woven Bamboo van de 5^{de} Generatie (SWB5G) is een vrij nieuw halffabricaat ontwikkeld in China als vervanger van hardhout voor buitentoepassingen. In Europa wordt SWB5G op het moment hoofdzakelijk gebruikt voor vlonderdelen. BUCO-Import EcoBam Bamboe uit België heeft deze 20 mm dikke vlonderdelen bij CTIB-TCHN⁷⁶, de Belgische tegenhanger van SHR (Stichting Hout Research), laten testen. De voor onderliggend onderzoek relevante resultaten zijn⁷⁷:

Reference sample	Bending strength [N/mm ²]	Modulus of elasticity [N/mm ²]
F20519/1	144,17	16749
F20519/2	167,74	16748
F20519/3	149,09	17196
F20519/4	175,07	20155
F20519/5	165,65	17094
F20519/6	139,68	16007
Average	156,90	17325

Figuur VII-1: Buigsterkte en elasticiteitsmodulus van 20 mm dikke vlonderdelen SWB5G (EN310), met een volumieke massa van 1 200 kg/m³ (opgave BUCO-Import).

Voor de elasticiteitsmodulus van SWB5G kan aangehouden worden⁷⁸:

$$E_{0,mean} = 17\,325 \text{ N/mm}^2$$

De karakteristieke waarde voor de buigsterkte volgt uit artikel D7.2 van [16]⁷⁹:

$$\left. \begin{aligned} s_{f_m} &= \sqrt{\frac{\sum (f_{m,i} - m_{f_m})^2}{n-1}} = 14.45 \text{ N/mm}^2 \\ V_{f_m} &= \frac{s_{f_m}}{m_{f_m}} = \frac{14.45}{156.90} = 9.21\% \\ n &= 6 \rightarrow k_n = 2.18 \end{aligned} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{aligned} f_{m,k} &= m_{f_m} (1 - k_n V_{f_m}) \\ f_{m,k} &= 156.90 \cdot (1 - 2.18 \cdot 0.0921) \\ f_{m,k} &= 125.40 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \right.$$

⁷⁶ Centre Technique de L'Industrie du Bois – Technisch Centrum der HoutNijverheid

⁷⁷ Binnenkort zullen proefstukken van 40 mm dikte in het MAL (*Materials Application Lab*) van Zuyd getest gaan worden.

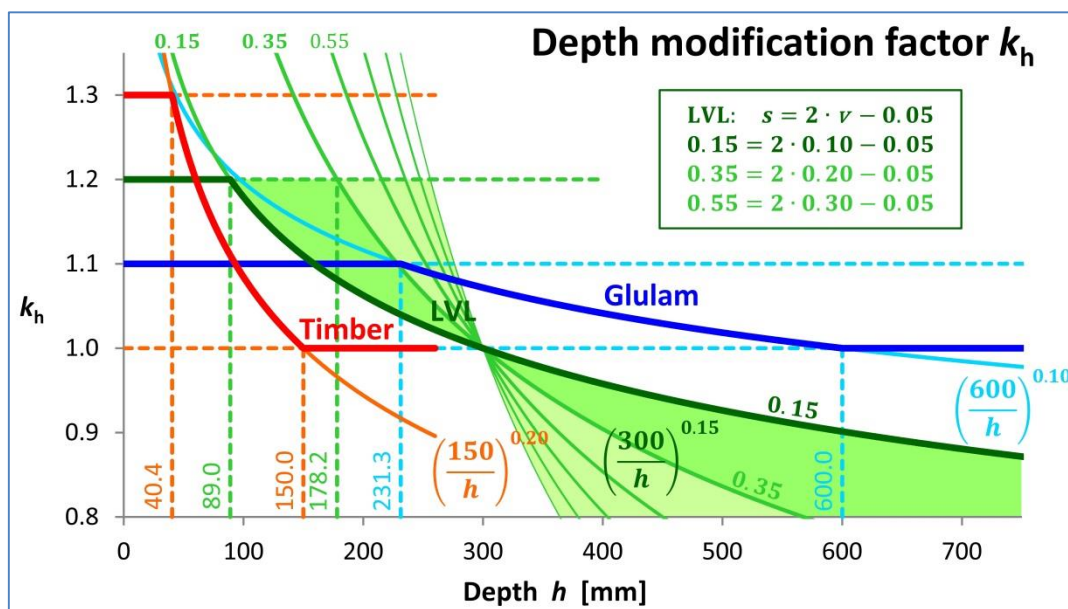
⁷⁸ F20519/6 zou als een uitschieter gezien kunnen worden. Zonder deze uitschieter is het gemiddelde voor de buigsterkte 165.65 N/mm² en voor de elasticiteitsmodulus 17 588 N/mm². Met deze iets gunstigere waarden wordt voorsnog geen rekening gehouden.

⁷⁹ s_f = geschatte waarde van de standaardafwijking, m_f = gemiddelde, V_f = variatiecoëfficiënt en k_n = karakteristieke waarde van de 5% fractiefactor bij een normale verdeling.

Deze karakteristieke waarde is geldig voor de 20 mm dikke vlonderdelen. Dit is nog geen algemene waarde welke te gebruiken is in een sterkte berekening.

Volgens de *Weakest Link Theory* of de *Weibull Theory* is de uiterst opneembare buigspanning afhankelijk van de balkafmetingen. Hoe groter de afmeting hoe meer kans op een zwakke plek in die balk, zoals bij hout de noesten. Bamboe heeft geen noesten, maar de zwakke plekken zijn de knopen van een bamboe halm. Echter om de zogenaamde *size effects* te achterhalen zouden een groot aantal testen nodig zijn.

Voor de gewone houten balk, de gelamineerde houten balk en LVL⁸⁰ geeft de Eurocode formules voor de hoogtefactor k_h , waarmee deze schaalfactoren in rekeningen worden gebracht. De referentiehoogten zijn respectievelijk 150 mm, 600 mm en 300 mm. In de formules voor de hoogtefactor is de variatie in lengte en in hoogte verwerkt. Variatie in breedte heeft doorgaans geen invloed en wordt normaliter verwaarloosd.



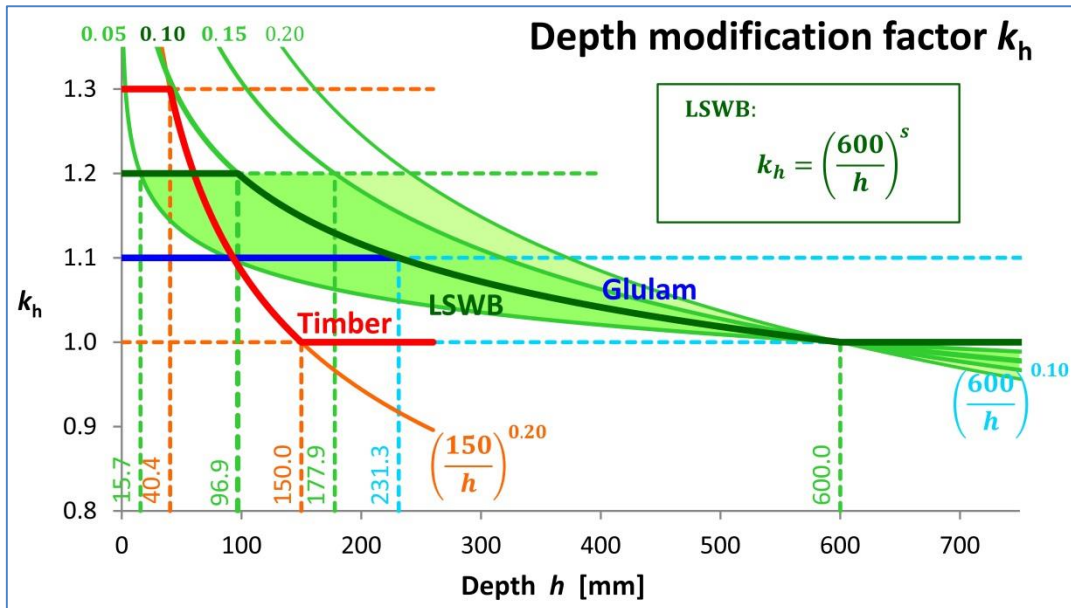
Figuur VII-2: Hoogtefactoren voor hout en gelamineerd hout uit [26] en voor LVL⁸¹ uit [30], zie ook [33], tabel 2.11.

De bovengrenzen voor de hoogtefactor is voor hout 1.3, voor LVL 1.2 en voor Glulam 1.1. Hout en Glulam hebben tevens een ondergrens van 1.0.

⁸⁰ Laminated Veneer Lumber = Gelamineerd fineerhout

⁸¹ v is de variatiecoëfficiënt en mag kleiner dan 0.10 zijn indien dit aangetoond kan worden voor een periode van minimaal 2 jaar.

In welke mate SWB5G gevoelig is voor schaalfactoren is op dit moment nog onbekend. De meest voor de hand liggende formule voor de hoogtefactor van gelamineerde SWB5G is die voor Glulam, nu wel met een bovengrens van 1.2 zodat voor de kleinere hoogtes een hogere spanning toelaatbaar is.



Figuur VII-3: Hoogtefactor voor LSWB5G.

Voor s wordt voorlopig ook dezelfde waarde aangehouden als voor Glulam, aldus:

$$1.0 \leq k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0.10} \leq 1.2$$

Uitgaande van de geteste dikte van 20 mm volgt voor de referentiehoogte van 600 mm een karakteristieke buigspanning van:

$$f_{m,k} = 125.40 \cdot \left(\frac{20}{600}\right)^{0.10} = 89.25 \text{ N/mm}^2$$

Voor de glijdingsmodulus van SWB5G zijn nog geen gegevens bekend⁸². Er wordt daarom teruggerepen op een onderzoek wat 3B-Structures uit Brussel heeft laten uitvoeren op SWB van de 3^{de} generatie.

$$G_{mean} \approx 1\,000 \text{ N/mm}^2$$

De verhouding E/G is nu 17 wat ongeveer overeenkomt met de waarde voor hout van 16.

⁸² Na voornoemd onderzoek bij het MAL van Zuyd zullen deze gegevens bekend zijn.

VIII. Doorbuiging Houten Liggers Eurocode 5 versus NB

Probleem:

In het algemeen dient voor Europa aanhouden te worden Eurocode 5: NEN-EN 1995-1-1+C1+A1 (2011) waar gewerkt wordt met w_{inst} , w_{fin} en $w_{net,fin}$ en waar aan alle drie eisen worden gesteld. In de NB (2013) van Eurocode 5 wordt verwezen naar de NB van NEN-EN 1990+A1+A1/C2 (2011) waar gewerkt wordt met w_1 , w_2 en w_3 . Er worden eisen gesteld aan w_2+w_3 en aan w_{max} .

Wat zijn de verschillen en overeenkomsten tussen beide benaderingen en hoe kan de Europese benadering aangepast worden zodat deze aan de NB (2013) voldoet?

Algemeen:

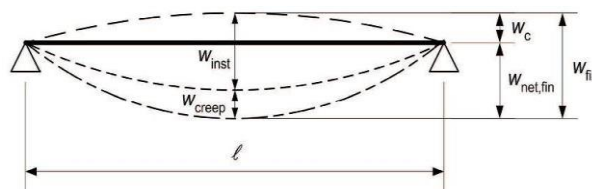
Als voorbeeld, een houten vloerligger of dakligger op 2 steunpunten⁸³, kantoorgebouw en klimaatklasse 1.

$k_{def} = 0.60$			Europa			Nederland		
			ψ_0	ψ_1	ψ_2	ψ_0	ψ_1	ψ_2
DL	= Dead Load	Sub g						
LL	= Live Load	Sub q	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
S	= Snow	Sub s	0.5	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
W	= Wind	Sub w	0.6	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0

Voor Europa:

1995 art. 2.2.3(2): De ogenblikkelijke vervorming, w_{inst} , zie figuur 7.1, behoort te zijn berekend voor de karakteristieke belastingscombinatie, zie 6.5.3(2) a) van EN 1990.

1995 art. 2.2.3(3): De uiteindelijke vervorming w_{fin} , zie figuur 7.1, behoort te zijn berekend voor de quasi-blijvende belastingscombinatie, zie 6.5.3(2) c) van EN 1990.



Figuur 7.1 — Bijdragen aan de doorbuiging

$$\begin{aligned}
 \text{Aldus: } q_{inst} &= q_g + q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b}) \\
 &= q_g + q_q + 0.5 \cdot q_s + 0.6 \cdot q_w \\
 q_{inst} &= q_g + \psi_{0,q} q_q + q_s + \psi_{0,w} q_w & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b}) \\
 &= q_g + 0.7 \cdot q_q + q_s + 0.6 \cdot q_w \\
 q_{inst} &= q_g + \psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + q_w & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b}) \\
 &= q_g + 0.7 \cdot q_q + 0.5 \cdot q_s + q_w
 \end{aligned}$$

Grootste aanhouden!

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{inst} \ell^4}{E_{0,mean} I} \leq \frac{\ell}{500} \text{ tot } \frac{\ell}{300}$$

⁸³ Alleen met lijnlasten, geen puntlasten e.d.

En met de vereenvoudiging uit 1995 art. 2.2.3(5) en naar buiten halen van k_{def} volgt:

$$\begin{aligned} q_{creep} &= k_{def} \cdot (q_g + \psi_{2,q} q_q + \psi_{2,s} q_s + \psi_{2,w} q_w) \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.16b}) \\ &= 0.60 \cdot (q_g + 0.3 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w) \\ &= 0.60 \cdot q_g + 0.18 \cdot q_q \end{aligned}$$

$$w_{creep} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{creep} \ell^4}{E_{0,mean} I}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} \leq \frac{\ell}{300} \text{ tot } \frac{\ell}{150}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c \leq \frac{\ell}{350} \text{ tot } \frac{\ell}{250}$$

Voor Nederland:



1990 NB art. A1.4.3(2): w_1 = aanvangsdeel van de doorbuiging onder de **blijvende belastingen** uit de van toepassing zijnde belastingscombinatie overeenkomstig de formules (6.14a) tot en met (6.16b) bepaald met de korte-duur eigenschappen.

$$q_1 = q_g$$

$$w_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_1 \ell^4}{E_{0,mean} I} = w_g$$

1990 NB art. A1.4.3(2): w_2 = lange-termijn deel van de doorbuiging onder de blijvende belastingen volgens de **quasi-blijvende belastingscombinatie** (formule 6.16a en 6.16b), gelijk aan de doorbuiging bij de quasi-blijvende belastingscombinatie bepaald met lange-duur eigenschappen verminderd met de doorbuiging bij de quasi-blijvende belastingscombinatie bepaald met korte-duur eigenschappen⁸⁴.

$$\begin{aligned} q_2 &= q_g + \psi_{2,s} q_q + \psi_{2,s} q_s + \psi_{2,w} q_w \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.16b}) \\ &= q_g + 0.3 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w \\ &= q_g + 0.3 \cdot q_q \end{aligned}$$

$$w_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_2 \ell^4}{E_{0,mean} I} (1 + k_{def}) - \frac{5}{384} \cdot \frac{q_2 \ell^4}{E_{0,mean} I} = \frac{5}{384} \cdot \frac{k_{def} q_2 \ell^4}{E_{0,mean} I} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{creep} \ell^4}{E_{0,mean} I}$$

⁸⁴ Merk op dat w_2 gelijk is aan w_{creep} bij de Europese benadering, ook de factoren $\psi_{2,i}$ zijn gelijk.

1990 NB art. A1.4.3(2): w_3 = bijkomend deel van de doorbuiging ten gevolge van de **veranderlijke belastingen** uit de van toepassing zijnde belastingscombinatie overeenkomstig de formules (6.14a) tot en met (6.16b) bepaald met de korte-duur eigenschappen.

$$\begin{aligned}
 q_{3,a} &= q_q + \psi_{0,s}q_s + \psi_{0,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.14b)} \\
 &= q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w = q_q \\
 q_{3,a} &= \psi_{0,q}q_q + q_s + \psi_{0,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.14b)} \\
 &= 0.5 \cdot q_q + q_s + 0.0 \cdot q_w = 0.5 \cdot q_q + q_s \\
 q_{3,a} &= \psi_{0,q}q_q + \psi_{0,s}q_s + q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.14b)} \\
 &= 0.5 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + q_w = 0.5 \cdot q_q + q_w \\
 q_{3,b} &= \psi_{1,q}q_q + \psi_{2,s}q_s + \psi_{2,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.15b)} \\
 &= 0.5 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w = 0.5 \cdot q_q \\
 q_{3,c} &= \psi_{2,q}q_q + \psi_{1,s}q_s + \psi_{2,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.15b)} \\
 &= 0.3 \cdot q_q + 0.2 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w = 0.3 \cdot q_q + 0.2 \cdot q_s \\
 q_{3,d} &= \psi_{2,q}q_q + \psi_{2,s}q_s + \psi_{1,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.15b)} \\
 &= 0.3 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.2 \cdot q_w = 0.3 \cdot q_q + 0.2 \cdot q_w \\
 q_{3,e} &= \psi_{2,s}q_q + \psi_{2,s}q_s + \psi_{2,w}q_w && \text{(NEN-EN 1990-1-1: 6.16b)} \\
 &= 0.3 \cdot q_q + 0.0 \cdot q_s + 0.0 \cdot q_w = 0.3 \cdot q_q \text{ (Nooit maatgevend!)}
 \end{aligned}$$

Voor $q_{3,a}$
grootste
aanhouden!

$$w_{3,i} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{3,i} \ell^4}{E_{0,mean} I}$$

1990 NB art. A1.4.3(3)⁸⁵: vloeren die scheurgevoelige scheidingswanden dragen $\rightarrow w_2 + w_{3,b} \leq \frac{\ell}{500}$

1990 NB art. A1.4.3(3): intensief door per personen gebruikt - vloeren $\rightarrow w_2 + w_{3,b} \leq \frac{\ell}{333}$

1990 NB art. A1.4.3(3): intensief door per personen gebruikt - daken $\rightarrow w_2 + \max\{w_{3,b}, w_{3,c}, w_{3,d}\} \leq \frac{\ell}{333}$

1990 NB art. A1.4.3(3): daken $\rightarrow w_2 + w_{3,a} \leq \frac{\ell}{250}$

1990 NB art. A1.4.3(3)⁸⁶: vloerafscheidingen bij hoogteverschil $\rightarrow w_2 + w_{3,a} \leq \frac{\ell}{150}$

1990 NB art. A1.4.3(4)⁸⁷: uiterlijk van belang, vloeren en daken $\rightarrow w_{max} = w_1 + w_2 + w_{3,a} - w_c \leq \frac{\ell}{250}$

Merk op dat bij vloeren zonder *scheurgevoelige wanden*, *intensief gebruik* en *uiterlijk belang* geen eisen worden gesteld!

⁸⁵ De doorbuiging $w_2 + w_3$ is te vergelijken met de oude *Bijkomende doorbuiging*.

⁸⁶ De doorbuiging $w_{3,a}$ is de maatgevende van alle doorbuigingen $w_{3,i}$.

⁸⁷ Merk op dat w_{max} gelijk is aan $w_{net,fin}$ bij de Europese benadering met de Nederlandse factoren voor $\psi_{0,i}$.

ψ-factoren

Tabel A1.1 - Aanbevolen waarden van ψ -factoren voor gebouwen (NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2011/NB:2011)

Belasting	Algemeen			NL		
	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂
Voorgeschreven belastingen in gebouwen, Categorie (zie EN 1991-1-1)						
Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0.7	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3
Categorie B: kantoorruimtes	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
Categorie C: bijeenkomstruimtes	0.7	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6
Categorie C: bijeenkomstruimtes - vluchtroutes en trappen e.d.	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6
Categorie D: winkelruimtes	0.7	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6
Categorie E: opslagruimtes	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8
Categorie F: verkeersruimte, voertuiggewicht ≤ 30 kN	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6
Categorie G: verkeersruimte, 30 kN < voertuiggewicht ≤ 160 kN	0.7	0.5	0.3	0.7	0.5	0.3
Categorie H: daken	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-3)						
Finland, IJsland, Noorwegen, Zweden	0.7	0.5	0.2			
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte H > 1000 m boven de zeespiegel.	0.7	0.5	0.2			
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte H ≤ 1000 m boven de zeespiegel.	0.5	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)	0.6	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
Temperatuur (geen brand) in gebouwen (zie EN 1991-1-5)	0.6	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0

Merk op dat:

1. ψ₁ en ψ₂ uit de NB gelijk zijn aan die uit NEN-EN 1990.
2. Bij NEN-EN 1990 geldt dat: ψ₀ ≥ ψ₁ ≥ ψ₂.
3. Bij de NB geldt dat: ψ₀ ≤ ψ₁ behalve bij categorie E.

Hierdoor is het nu niet meer vanzelfsprekend dat de doorbuiging $w_{3,a}$ de grootste is van alle doorbuigingen $w_{3,i}$. Met name kunnen bij categorie C en D de doorbuigingen $w_{3,c}$ en $w_{3,d}$ groter worden dan $w_{3,a}$, daar waar ψ₀ kleiner is als ψ₂. De doorbuigingen $w_{3,c}$ of $w_{3,d}$ zullen maatgevend zijn wanneer q_q groter is dan $4 \cdot q_s$ respectievelijk $4 \cdot q_w$. Het probleem zou verholpen zijn wanneer voor categorie C en D ψ₀ wordt opgehoogd van 0.4 naar 0.6.

Conclusie:

Bij één veranderlijke lijnbelasting (LL) en wanneer bij vloeren soms een strengere eis wordt gehanteerd, kan de Europese benadering gebruikt worden met de ψ factoren uit de NB volgens:

$$w_{net,fin} = w_{max} \leq \frac{\ell}{250} \quad w_{fin} - w_g = w_2 + w_3 \leq \frac{\ell}{500} \quad of \quad \frac{\ell}{333} \quad of \quad \frac{\ell}{250}$$

Hierbij kan de werkelijke bijkomende doorbuiging voor categorie C en D groter zijn.

IX. Afschuifvervorming

In een balk belast met een lijnlast ontstaat niet alleen buiging, maar ook afschuiving en als gevolg daarvan ook een afschuifvervorming. Bij staal (en aluminium) is de verhouding E/G ongeveer 2.6 zodat de afschuifvervorming bij staal verwaarloosd kan worden. Bij hout (en SWB) is deze verhouding ongeveer 16 met als gevolg dat de doorbuiging door afschuiving 5 tot 20% kan bedragen van de doorbuiging als gevolg van buiging [33]. Dit is niet zomaar meer te verwaarlozen. Voor de doorbuiging als gevolg van buiging van een ligger op 2 steunpunten met een constante q -belasting geldt:

$$w_{Bending} = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{E_{0,mean} I}$$

En voor de doorbuiging als gevolg van afschuiving geldt:

$$w_{Shear} = \frac{1}{8} \frac{q \ell^2}{G_{mean} k A}$$

Hierin is k de vormfactor voor afschuifvervorming die voor een rechthoekige doorsnede gelijk is aan $\frac{5}{6}$. Door beide doorbuigingen op elkaar te delen volgt:

$$\frac{w_{Shear}}{w_{Bending}} = \frac{1}{8} \frac{q \ell^2}{G_{mean} k A} \cdot \frac{384 E_{0,mean} I}{5 q \ell^4} = \frac{384 \cdot \frac{1}{12} E_{0,mean} h^2}{8 \cdot \frac{5}{6} \cdot 5 G_{mean} \ell^2} = 0.96 \frac{E_{0,mean}}{G_{mean}} \left(\frac{h}{\ell} \right)^2$$

De totale doorbuiging volgt nu door de doorbuiging als gevolg van buiging te vermenigvuldigen met de zogenaamde *shear amplification factor* (Porteous, et al. [33], tabel 4.7):

$$\left[1 + 0.96 \left(\frac{E_{0,mean}}{G_{mean}} \right) \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \right]$$

X. Beams in canopy Econnect

X.1 Information, Geometry, Loads and Deflections

References

NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode 0 Basis (2011) + Dutch NA (2011).
 NEN-EN 1991-1-1+C1: Eurocode 1 Actions - Part 1.1 Loads (2011) + Dutch NA (2011).
 NEN-EN 1991-1-3+C1: Eurocode 1 Actions - Part 1.3 Snow (2011) + Dutch NA (2011).
 NEN-EN 1991-1-4+A1+C2: Eurocode 1 Actions - Part 1.4 Wind (2011) + Dutch NA (2011).

General information

Location: The District of Tomorrow

European Science and Business Park Avantis, Heerlen/Aachen

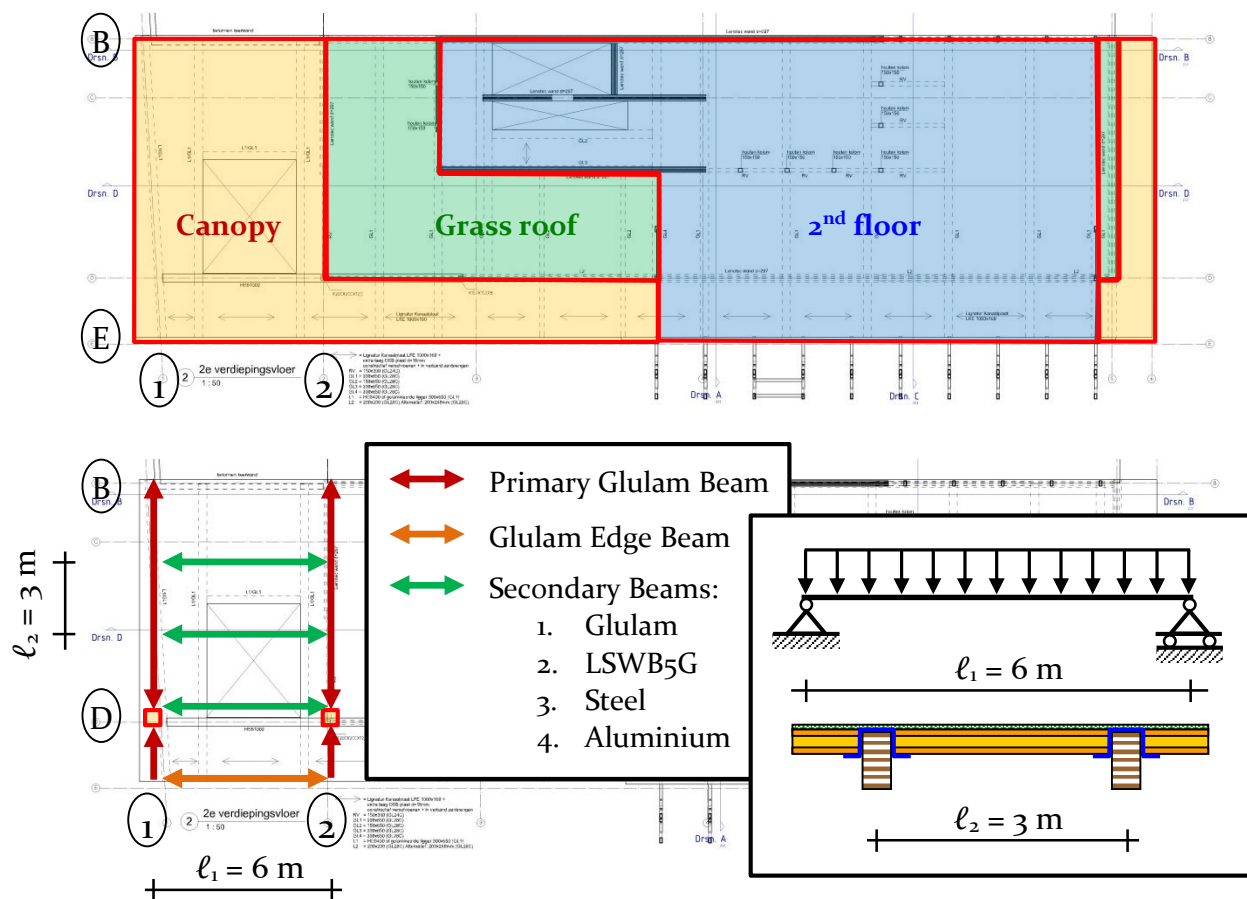
Office building

Canopy = Generally accessible roof -> Spaces where large crowds can be found

Climate Class 2

Lateral buckling is prevented by the roof plates

Geometry



Loads

Dead Load⁸⁸: $p_g = 4.15 \text{ kN/m}^2$

Life Load⁸⁹: $p_q = 5.00 \text{ kN/m}^2$

Snow⁹⁰: $p_{s,k} = 0.164Z - 0.082 + \frac{A}{966} = 0.164 \cdot 4 - 0.082 + \frac{186}{966} = 0.77 \text{ kN/m}^2$

$$p_{s,k} = (0.264Z - 0.002) \left[1 + \left(\frac{A}{256} \right)^2 \right] = (0.264 \cdot 2 - 0.002) \left[1 + \left(\frac{186}{256} \right)^2 \right] = 0.80 \text{ kN/m}^2 \rightarrow$$

$$p_s = \mu_1 C_e C_{it} p_{s,k} = 0.8 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.80 = 0.64 \text{ kN/m}^2$$

Wind^{91,92}: $k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left(\frac{0.05}{0.05} \right)^{0.07} = 0.19$

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0.19 \cdot \ln \left(\frac{8}{0.05} \right) = 0.96$$

$$v_{b,0} = 24.5 \text{ m/s}$$

Wind field III, Dutch National Annex⁹³

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 24.5 = 24.5 \text{ m/s}$$

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b = 0.96 \cdot 1.0 \cdot 24.5 = 23.52 \text{ m/s}$$

$$I_z(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} = \frac{1.0}{1.0 \cdot \ln \left(\frac{8}{0.05} \right)} = 0.20$$

$$q_p(z) = (1 + 7I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = (1 + 7 \cdot 0.20) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 23.52^2 \cdot 10^{-3} = 0.83 \text{ kN/m}^2$$

$$c_f = +0.2$$

Canopy, Zone A, $\alpha = 0^\circ$.

$$p_w = q_p(z) c_f = 0.83 \cdot 0.2 = 0.17 \text{ kN/m}^2$$

Allowable deflections

Max deflections⁹⁴: $w_{inst} \leq \frac{1}{300} \ell_1 = \frac{1}{300} \cdot 6000 = 20.00 \text{ mm}$ EU

$$w_{fin} \leq \frac{1}{150} \ell_1 = \frac{1}{150} \cdot 6000 = 40.00 \text{ mm}$$
 EU

$$w_{net,fin} \leq \frac{1}{250} \ell_1 = \frac{1}{250} \cdot 6000 = 24.00 \text{ mm}$$
 EU and Dutch

$$w_{fin} - w_g \leq \frac{1}{333} \ell_1 = \frac{1}{333} \cdot 6000 = 18.02 \text{ mm}$$
 Dutch

⁸⁸ According to the design calculations from Palte BV. It is assumed that the Dead Load is without the weight of the beams itself.

⁸⁹ Canopy (class I) = Generally accessible roof $\rightarrow$ Spaces where large crowds can be found (class C5)

⁹⁰ 186 m above Sea level, Central West - zone 4 or Central East - zone 2.

⁹¹ Due to the high value of the Dead Load, upward Wind Load is ignored.

⁹² Terrain Category II, $z_e = z = 8 \text{ m}$.

⁹³ In the Eurocode itself no values are provided for $v_{b,0}$.

⁹⁴ Eurocode only for comparison, the lowest restrictions proposed in the Eurocode and Dutch National Annex are used.

X.2 Glulam

References

NEN-EN 1995-1-1+C1+A1: Eurocode 5 Timber - Part 1.1 General (2011) + Dutch NA (2013).

NEN-EN 14080: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber (2013)

Material

GL20h ⁹⁵ :	$f_{m,g,k} = 20.00 \text{ N/mm}^2$	(reference depth = 600 mm)
	$E_{o,g,mean} = 8400 \text{ N/mm}^2$	
	$G_{g,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	
	$\rho_{g,mean} = 370 \text{ kg/m}^3$	
	$b \cdot h = 170 \cdot 685 \text{ mm}^2$	
	$w_c = 10 \text{ mm}$	(precamber)

ULS

Strength ⁹⁶ :	$f_{m,d} = k_{mod} \frac{k_h f_{m,g,k}}{\gamma_M}$	$\gamma_M = 1.25$	Glued-laminated timber
		$k_{mod} = 0.60$	Dead Load
		$k_{mod} = 0.80$	Dead Load + Live Load ⁹⁷
		$k_{mod} = 0.90$	Dead Load + Live Load + Snow + Wind
	$k_h = 1.0 \leq \left(\frac{600}{700}\right)^{0.1} \leq 1.1 \rightarrow k_h = 1.00$		

$$f_{m,d} = 0.60 \cdot \frac{1.00 \cdot 20.00}{1.25} = 9.60 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL}$$

$$f_{m,d} = 0.80 \cdot \frac{1.00 \cdot 20.00}{1.25} = 12.80 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL}$$

$$f_{m,d} = 0.90 \cdot \frac{1.00 \cdot 20.00}{1.25} = 14.40 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL+S+W}$$

Beam: $b = 170 \text{ mm}$
 $h = 685 \text{ mm}$

$$W = \frac{1}{6} b h^2 = \frac{1}{6} \cdot 170 \cdot 685^2 = 13294.71 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Loads: $q_{g,beam} = \rho_g b h = 370 \cdot 10 \cdot 175 \cdot 685 \cdot 10^{-9} = 0.43 \text{ kN/m}$
 $q_g = p_g \ell_2 + q_{g,beam} = 4.15 \cdot 3 + 0.43 = 12.88 \text{ kN/m}$
 $q_q = p_q \ell_2 = 5.00 \cdot 3 = 15.00 \text{ kN/m}$
 $q_s = p_s \ell_2 = 0.64 \cdot 3 = 1.92 \text{ kN/m}$
 $q_w = p_w \ell_2 = 0.17 \cdot 3 = 0.51 \text{ kN/m}$

⁹⁵ Because of the lowest expected Emdodied Land, the lowest strength class is used according to NEN-EN 14080.

⁹⁶ System strength factor $k_{sys} = 1.0$.

⁹⁷ In the Eurocode also for Snow $k_{mod} = 0.80$.

STR – RC2

DL: $q_d = \gamma_G q_g = 1.35 \cdot 12.88 = 17.39 \text{ kN/m}$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 17.39 \cdot 6^2 = 78.26 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{78.26 \cdot 10^6}{13294.71 \cdot 10^3} = 5.89 \text{ N/mm}^2$$

DL+LL: $q_d = \gamma_G q_g + \gamma_Q \psi_{0,q} q_q$ (NEN-EN 1990-1-1: 6.10a)
 $= 1.35 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot 0.50 \cdot 15.00 = 28.64 \text{ kN/m}$

$q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q q_q$ (NEN-EN 1990-1-1: 6.10b)⁹⁸
 $= 1.20 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot 15.00 = 37.96 \text{ kN/m} \rightarrow$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 37.96 \cdot 6^2 = 170.82 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{170.82 \cdot 10^6}{13294.71 \cdot 10^3} = 12.85 \text{ N/mm}^2$$

DL+LL+S+W: $q_d = \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10a)
 $= 1.35 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51)$
 $= 28.64 \text{ kN/m}$

$q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10b)
 $= 1.20 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot (15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51)$
 $= 37.96 \text{ kN/m} \rightarrow$

$q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10b)
 $= 1.20 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 1.92 + 0.00 \cdot 0.51)$
 $= 29.59 \text{ kN/m}$

$q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + q_w)$ (6.10b)
 $= 1.20 \cdot 12.88 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.51)$
 $= 27.48 \text{ kN/m}$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 37.96 \cdot 6^2 = 170.82 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{170.82 \cdot 10^6}{13294.71 \cdot 10^3} = 12.85 \text{ N/mm}^2$$

Check: DL: $\sigma_d = 5.89 \leq 9.60 = f_{m,d} \rightarrow \text{O.K.}$

DL+LL: $\sigma_d = 12.85 \leq 12.80 = f_{m,d} \rightarrow \text{Acceptable} \rightarrow \text{unity check} = 100.39\%$

DL+LL+S+W: $\sigma_d = 12.85 \leq 14.40 = f_{m,d} \rightarrow \text{O.K.}$

⁹⁸ In Eurocode $\xi \gamma_G = 1.15$ instead of 1.20

SLS

Beam: $b = 170 \text{ mm}$
 $h = 685 \text{ mm}$
 $I = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} \cdot 170 \cdot 685^3 = 4553.44 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Bending deflection with shear amplification factor:

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{E_{0,mean}}{G_{0,mean}} \right) \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{8400}{650} \right) \left(\frac{685}{6000} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \cdot 1.16$$

$$q_{inst} = q_g + q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b})$$

$$= 12.88 + 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 27.88 \text{ kN/m} \quad \rightarrow$$

$$q_{inst} = q_g + \psi_{0,q} q_q + q_s + \psi_{0,w} q_w \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b})$$

$$= 12.88 + 0.50 \cdot 15.00 + 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 22.30 \text{ kN/m}$$

$$q_{inst} = q_g + \psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + q_w \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b})$$

$$= 12.88 + 0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.51 = 20.89 \text{ kN/m}$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{inst} \ell_1^4}{EI} \cdot 1.16 = \frac{5}{384} \cdot \frac{27.88 \cdot 6000^4}{8400 \cdot 4553.44 \cdot 10^6} \cdot 1.16 = 14.27 \text{ mm}$$

$$q_{creep} = k_{def} (q_g + \psi_{2,q} q_q + \psi_{2,s} q_s + \psi_{2,w} q_w) \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.16b})$$

$$= 0.80 \cdot (12.88 + 0.30 \cdot 15.00 + 0 + 0) = 13.91 \text{ kN/m}$$

$$w_{creep} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{creep} \ell_1^4}{EI} \cdot 1.16 = \frac{5}{384} \cdot \frac{13.91 \cdot 6000^4}{8400 \cdot 4553.44 \cdot 10^6} \cdot 1.16 = 7.11 \text{ mm}$$

$$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_g \ell_1^4}{EI} \cdot 1.16 = \frac{5}{384} \cdot \frac{12.88 \cdot 6000^4}{8400 \cdot 4553.44 \cdot 10^6} \cdot 1.16 = 6.59 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = 14.27 + 7.11 = 21.38 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 21.38 - 10.00 = 11.38 \text{ mm}$$

$$w_{fin} - w_g = 21.38 - 6.59 = 14.79 \text{ mm}$$

Check: $w_{net,fin} = 11.38 \leq 24.00 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.}$

$w_{fin} - w_g = 14.79 \leq 18.02 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.}$

Mass: $G = \rho_{mean} \cdot b \cdot h \cdot \ell = 370 \cdot 170 \cdot 685 \cdot 6000 \cdot 10^{-9} = 258.52 \text{ kg}$

Table X-1: Minimum dimensions for different strength classes Glulam (precamber=10 mm).

	$b \cdot h$ [mm ²]	k_h -	$f_{m,d}/k_{mod}$ [N/mm ²]	u.c. [-]	saf ⁹⁹ -	$w_{net,fin}$ [mm]	$w_{fin}-w_g$ [mm]	ρ_{mean} [kg/m ³]	Mass [kg]
GL20h	171·684	1.00	16.00	1.00	1.161	11.36	14.78	370	259.78
GL22h	166·663	1.00	17.60	1.00	1.189	9.87	13.74	410	270.27
GL24h	161·644	1.00	19.20	1.00	1.196	10.48	14.17	420	261.21
GL26h	157·627	1.00	20.80	1.00	1.195	11.65	14.98	445	262.37
GL28h	153·612	1.00	22.40	1.00	1.193	12.91	15.85	460	258.08
GL30h	149·598	1.00	24.01	1.00	1.199	13.41	16.19	480	257.08
GL32h	146·584	1.00	25.67	1.00	1.199	14.49	16.94	490	251.00

If the Unity Check (u.c.) is 1.00, the dimensions are determined by the Ultimate Limit State (ULS), otherwise by the Service Limit State (SLS).

Table X-2: Minimum dimensions for different strength classes regular wood (only for comparison reasons, they have no practical value).

	$b \cdot h$ [mm ²]	k_h -	$f_{m,d}/k_{mod}$ [N/mm ²]	u.c. [-]	saf -	$w_{net,fin}$ [mm]	$w_{fin}-w_g$ [mm]	ρ_{mean} [kg/m ³]	Mass [kg]
C14	195·782	1.00	10.77	1.00	1.259	16.39	11.32	350	320.63
C16	187·747	1.00	12.31	1.00	1.238	16.86	11.65	370	309.98
C18	180·718	1.00	13.85	1.00	1.221	17.28	11.94	380	294.22
C20	173·694	1.00	15.38	1.00	1.207	18.60	12.86	390	281.47
C22	168·672	1.00	16.92	1.00	1.191	19.81	13.70	410	277.59
C24	163·652	1.00	18.46	1.00	1.181	20.07	13.88	420	268.18
C27	157·627	1.00	20.77	1.00	1.168	22.20	15.35	450	265.61
C30	152·607	1.00	23.08	0.99	1.157	24.00	16.60	460	254.41
C35	149·594	1.00	26.92	0.91	1.151	24.00	16.60	480	254.37
C40	146·583	1.00	30.77	0.84	1.144	24.00	16.61	500	254.55
C45	143·572	1.00	34.62	0.79	1.139	24.00	16.60	520	255.28
C50	141·562	1.00	38.46	0.75	1.135	24.00	16.60	550	261.01

Table X-3: Strength classes related to grades for British grown timber according to Porteous, et al. [33].

Timber species	General structural grade	Special structural grade
Douglas fir	C14	C18
Larch	C16	C24
British pine	C14	C22
British spruce	C14	C18

⁹⁹ Shear amplification factor for the deflection of a simply supported beam under uniform load.

X.3 LSWB5G (without creep)

See also X.2 *Glulam*.

References

NEN-EN 1995-1-1+C1+A1: Eurocode 5 Timber - Part 1.1 General (2011) + Dutch NA (2013).

Material

LSWB5G :

$$\begin{aligned} f_{m,g,k} &= 89.25 \text{ N/mm}^2 && (\text{reference depth} = 600 \text{ mm}) \\ E_{o,g,\text{mean}} &= 17325 \text{ N/mm}^2 \\ G_{g,\text{mean}} &= 1000 \text{ N/mm}^2 \\ \rho_{g,\text{mean}} &= 1200 \text{ kg/m}^3 \\ b \cdot h &= 120 \cdot 450 \text{ mm}^2 \\ w_c &= 15 \text{ mm} && (\text{precamber}) \end{aligned}$$

Beam: $W = \frac{1}{6}bh^2 = \frac{1}{6} \cdot 120 \cdot 450^2 = 4050.00 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 450^3 = 911.25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

ULS

Strength¹⁰⁰: $k_h = 1.0 \leq \left(\frac{600}{450}\right)^{0.1} \leq 1.2 \rightarrow k_h = 1.03$

$$f_{m,d} = 0.60 \cdot \frac{1.03 \cdot 89.25}{1.25} = 44.13 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL}$$

$$f_{m,d} = 0.80 \cdot \frac{1.03 \cdot 89.25}{1.25} = 58.83 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL}$$

$$f_{m,d} = 0.90 \cdot \frac{1.03 \cdot 89.25}{1.25} = 66.19 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL+S+W}$$

Loads: $q_{g,\text{beam}} = \rho g b h = 1200 \cdot 10 \cdot 120 \cdot 450 \cdot 10^{-9} = 0.65 \text{ kN/m}$
 $q_g = p_g \ell_2 + q_{g,\text{beam}} = 4.15 \cdot 3 + 0.65 = 13.10 \text{ kN/m}$

DL: $q_d = \gamma_G q_g = 1.35 \cdot 13.10 = 17.69 \text{ kN/m}$
 $M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 17.69 \cdot 6^2 = 79.61 \text{ kNm}$
 $\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{79.61 \cdot 10^6}{4050.00 \cdot 10^3} = 19.66 \text{ N/mm}^2$

DL+LL: $q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q q_Q \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.10b})^{101}$
 $= 1.20 \cdot 13.10 + 1.50 \cdot 15.00 = 38.22 \text{ kN/m} \rightarrow$
 $M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 38.22 \cdot 6^2 = 171.99 \text{ kNm}$

¹⁰⁰ System strength factor $k_{\text{sys}} = 1.0$.

¹⁰¹ In Eurocode $\xi \gamma_G = 1.15$ instead of 1.20

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{171.99 \cdot 10^6}{4050.00 \cdot 10^3} = 42.47 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{DL+LL+S+W: } q_d &= \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w) & (6.10b) \\ &= 1.20 \cdot 13.10 + 1.50 \cdot (15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51) \\ &= 38.22 \text{ kN/m} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 38.22 \cdot 6^2 = 171.99 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{171.99 \cdot 10^6}{4050.00 \cdot 10^3} = 42.47 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Check: DL: } \sigma_d &= 19.66 \leq 44.13 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \\ \text{DL+LL: } \sigma_d &= 42.47 \leq 58.83 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \quad \rightarrow \text{unity check} = 72.19\% \\ \text{DL+LL+S+W: } \sigma_d &= 42.47 \leq 66.19 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \end{aligned}$$

SLS

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{E_{0,mean}}{G_{0,mean}} \right) \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{17325}{1000} \right) \left(\frac{450}{6000} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \cdot \mathbf{1.09}$$

$$\begin{aligned} q_{inst} &= q_g + q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b}) \\ &= 13.10 + 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 28.10 \text{ kN/m} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{inst} \ell_1^4}{EI} \cdot 1.09 = \frac{5}{384} \cdot \frac{28.10 \cdot 6000^4}{17325 \cdot 911.25 \cdot 10^6} \cdot 1.09 = 32.74 \text{ mm}$$

$$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_g \ell_1^4}{EI} \cdot 1.09 = \frac{5}{384} \cdot \frac{13.10 \cdot 6000^4}{17325 \cdot 911.25 \cdot 10^6} \cdot 1.09 = 15.26 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = 32.74 + 0.00 = 32.74 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 32.74 - 15.00 = 17.74 \text{ mm}$$

$$w_{fin} - w_g = 32.74 - 15.26 = 17.48 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Check: } w_{net,fin} &= 17.74 \leq 24.00 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.} \\ w_{fin} - w_g &= 17.48 \leq 18.02 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.} \end{aligned}$$

Mass:	$G = \rho_{mean} \cdot b \cdot h \cdot \ell = 1200 \cdot 120 \cdot 450 \cdot 6000 \cdot 10^{-9} = \mathbf{388.80 \text{ kg}}$
--------------	---

Comments:

In contrast to the Dutch Annex, according to the Eurocode the deflection w_{inst} is too large. Increasing $b \cdot h$ to 130·525 mm² this deflection with the Dutch ψ -factors becomes 19.80 mm. With the ψ -factors from the Eurocode, this beam should be 135·530 mm².

X.4 LSWB5G (with creep)

See also X.2 *Glulam*.

References

NEN-EN 1995-1-1+C1+A1: Eurocode 5 Timber - Part 1.1 General (2011) + Dutch NA (2013).

Material

LSWB5G :	$f_{m,g,k} =$	89.25 N/mm ²	(reference depth = 600 mm)
	$E_{o,g,mean} =$	17325 N/mm ²	
	$G_{g,mean} =$	1000 N/mm ²	
	$\rho_{g,mean} =$	1200 kg/m ³	
	$b \cdot h =$	135 · 545 mm ²	
	$w_c =$	10 mm	(precamber)

Beam: $W = \frac{1}{6} b h^2 = \frac{1}{6} \cdot 135 \cdot 545^2 = 6683.06 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$$I = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} \cdot 135 \cdot 545^3 = 1821.13 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

ULS

Strength¹⁰²: $k_h = 1.0 \leq \left(\frac{600}{545}\right)^{0.1} \leq 1.2 \rightarrow k_h = 1.01$

$$f_{m,d} = 0.60 \cdot \frac{1.01 \cdot 89.25}{1.25} = 43.27 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL}$$

$$f_{m,d} = 0.80 \cdot \frac{1.01 \cdot 89.25}{1.25} = 57.69 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL}$$

$$f_{m,d} = 0.90 \cdot \frac{1.01 \cdot 89.25}{1.25} = 64.90 \text{ N/mm}^2 \quad \text{DL+LL+S+W}$$

Loads: $q_{g,beam} = \rho g b h = 1200 \cdot 10 \cdot 135 \cdot 545 \cdot 10^{-9} = 0.88 \text{ kN/m}$

$$q_g = p_g \ell_2 + q_{g,beam} = 4.15 \cdot 3 + 0.88 = 13.33 \text{ kN/m}$$

DL: $q_d = \gamma_G q_g = 1.35 \cdot 13.33 = 18.00 \text{ kN/m}$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 18.00 \cdot 6^2 = 81.00 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{81.00 \cdot 10^6}{6683.06 \cdot 10^3} = 12.12 \text{ N/mm}^2$$

DL+LL: $q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q q_Q \quad (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.10b})^{103}$

$$= 1.20 \cdot 13.33 + 1.50 \cdot 15.00 = 38.50 \text{ kN/m} \rightarrow$$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 38.50 \cdot 6^2 = 173.25 \text{ kNm}$$

¹⁰² System strength factor $k_{sys} = 1.0$.

¹⁰³ In Eurocode $\xi \gamma_G = 1.15$ instead of 1.20

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{173.25 \cdot 10^6}{6683.06 \cdot 10^3} = 25.92 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{DL+LL+S+W: } q_d &= \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w) & (6.10b) \\ &= 1.20 \cdot 13.33 + 1.50 \cdot (15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51) \\ &= 38.50 \text{ kN/m} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$M_d = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 38.50 \cdot 6^2 = 173.25 \text{ kNm}$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{173.25 \cdot 10^6}{6683.06 \cdot 10^3} = 25.92 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Check: DL: } \sigma_d &= 12.12 \leq 43.27 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \\ \text{DL+LL: } \sigma_d &= 25.92 \leq 57.69 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \quad \rightarrow \text{unity check} = 44.94\% \\ \text{DL+LL+S+W: } \sigma_d &= 25.92 \leq 64.90 = f_{m,d} \quad \rightarrow \text{O.K.} \end{aligned}$$

SLS

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{E_{0,mean}}{G_{0,mean}} \right) \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \left[1 + 0.96 \left(\frac{17325}{1000} \right) \left(\frac{545}{6000} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{q \ell^4}{EI} \cdot 1.14$$

$$\begin{aligned} q_{inst} &= q_g + q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.14b}) \\ &= 13.33 + 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 28.33 \text{ kN/m} \quad \rightarrow \end{aligned}$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{inst} \ell_1^4}{EI} \cdot 1.14 = \frac{5}{384} \cdot \frac{28.33 \cdot 6000^4}{17325 \cdot 1821.13 \cdot 10^6} \cdot 1.14 = 17.27 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} q_{creep} &= k_{def} (q_g + \psi_{2,q} q_q + \psi_{2,s} q_s + \psi_{2,w} q_w) & (\text{NEN-EN 1990-1-1: 6.16b}) \\ &= 0.80 \cdot (13.33 + 0.30 \cdot 15.00 + 0 + 0) = 14.26 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$w_{creep} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{creep} \ell_1^4}{EI} \cdot 1.14 = \frac{5}{384} \cdot \frac{14.26 \cdot 6000^4}{17325 \cdot 1821.13 \cdot 10^6} \cdot 1.14 = 8.69 \text{ mm}$$

$$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_g \ell_1^4}{EI} \cdot 1.14 = \frac{5}{384} \cdot \frac{13.33 \cdot 6000^4}{17325 \cdot 1821.13 \cdot 10^6} \cdot 1.14 = 8.13 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = 17.27 + 8.69 = 25.96 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 25.96 - 10.00 = 15.96 \text{ mm}$$

$$w_{fin} - w_g = 25.96 - 8.13 = 17.84 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Check: } w_{net,fin} &= 15.96 \leq 24.00 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.} \\ w_{fin} - w_g &= 17.84 \leq 18.02 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{O.K.} \end{aligned}$$

$$\text{Mass: } G = \rho_{mean} \cdot b \cdot h \cdot \ell = 1200 \cdot 135 \cdot 545 \cdot 6000 \cdot 10^{-9} = 529.74 \text{ kg}$$

X.5 Steel

References

NEN-EN 1993-1-1+C2: Eurocode 3 Steel - Part 1.1 General (2011) + Dutch NA (2011).

Material

	S235		IPE 330
f_y	= 235	N/mm ²	I = 117.70·10 ⁶ mm ⁴
E	= 210 000	N/mm ²	W_{pl} = 804.33·10 ³ mm ³
ρ	= 7 850	kg/m ³	A = 6 261 mm ²
			h = 330 mm
			b = 160 mm
			t_w = 7.5 mm
			t_f = 11.5 mm
			r = 18 mm

ULS

Strength: $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$ $\gamma_{M0} = 1.00$

$$M_{Rd} = \frac{804.33 \cdot 10^3 \cdot 235.00}{1.00} \cdot 10^{-6} = 189.02 \text{ kNm}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_v = 6261 - 2 \cdot 160 \cdot 11.5 + (7.5 + 2 \cdot 18) \cdot 11.5 = 3081.25 \text{ mm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

$$V_{Rd} = \frac{3081.25 \cdot 235.00 / \sqrt{3}}{1.00} \cdot 10^{-3} = 418.06 \text{ kN}$$

Loads: $q_{g,beam} = \rho g A = 7850 \cdot 10 \cdot 6261 \cdot 10^{-9} = 0.49 \text{ kN/m}$

$$q_g = p_g \ell_2 + q_{g,beam} = 4.15 \cdot 3 + 0.49 = 12.94 \text{ kN/m}$$

$$q_q = p_q \ell_2 = 5.00 \cdot 3 = 15.00 \text{ kN/m}$$

$$q_s = p_s \ell_2 = 0.64 \cdot 3 = 1.92 \text{ kN/m}$$

$$q_w = p_w \ell_2 = 0.17 \cdot 3 = 0.51 \text{ kN/m}$$

STR – RC2 $q_d = \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10a)

$$= 1.35 \cdot 12.94 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51)$$

$$= 28.72 \text{ kN/m}$$

$q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10b)¹⁰⁴

$$= 1.20 \cdot 12.94 + 1.50 \cdot (15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51)$$

$$= 38.03 \text{ kN/m} \rightarrow$$

¹⁰⁴ In Eurocode $\xi \gamma_G = 1.15$ instead of 1.20

$$\begin{aligned} q_d &= \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + q_s + \psi_{0,w} q_w) & (6.10b) \\ &= 1.20 \cdot 12.94 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 1.92 + 0.00 \cdot 0.51) \\ &= 29.66 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_d &= \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (\psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + q_w) & (6.10b) \\ &= 1.20 \cdot 12.94 + 1.50 \cdot (0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.51) \\ &= 27.54 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 38.03 \cdot 6^2 = 171.14 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} q_d \ell_1 = \frac{1}{2} \cdot 38.03 \cdot 6 = 114.09 \text{ kN}$$

Check: $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{171.14}{189.02} = 0.91 \leq 1.00 \rightarrow \text{O.K.}$

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{114.09}{418.06} = 0.27 \leq 1.00 \rightarrow \text{O.K.}$

SLS

$$\begin{aligned} q_{inst} &= q_g + q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w \\ &= 12.94 + 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 27.94 \text{ kN/m} \end{aligned} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} q_{inst} &= q_g + \psi_{0,q} q_q + q_s + \psi_{0,w} q_w \\ &= 12.94 + 0.50 \cdot 15.00 + 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 22.36 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{inst} &= q_g + \psi_{0,q} q_q + \psi_{0,s} q_s + q_w \\ &= 12.94 + 0.50 \cdot 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.51 = 20.95 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_3 \ell_1^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{27.94 \cdot 6000^4}{210000 \cdot 117.70 \cdot 10^6} = 19.08 \text{ mm}$$

$$q_{creep} = 0.00 \text{ kN/m} \rightarrow w_{creep} = 0.00 \text{ mm}$$

$$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_g \ell_1^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{12.94 \cdot 6000^4}{210000 \cdot 117.70 \cdot 10^6} = 8.83 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = 19.08 + 0.00 = 19.08 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 19.08 - 00.00 = 19.08 \text{ mm}$$

$$w_{fin} - w_g = 19.08 - 8.83 = 10.24 \text{ mm}$$

Check: $w_{net,fin} = 19.08 \leq 24.00 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$

$w_{fin} - w_g = 10.24 \leq 18.02 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$

Mass: $G = \rho_{mean} \cdot A \cdot \ell = 7850 \cdot 6261 \cdot 6000 \cdot 10^{-9} = \mathbf{294.89 \text{ kg}}$

Comments:

For S275 the section can be IPE A 330 with a mass of 257.83 kg.

X.6 Aluminium

See also X.5 Steel.

References

NEN-EN 1999-1-1+A1: Eurocode 9 Aluminium - Part 1-1 General (2011) + Dutch NA (2011)¹⁰⁵.

Material

	6082-T6		RHS 450x250x8
f_o	= 260 N/mm ²	I	= 300.80 · 10 ⁶ mm ⁴
E	= 70 000 N/mm ²	W_{pl}	= 1622.00 · 10 ³ mm ³
ρ	= 2 700 kg/m ³	A	= 10 900 mm ²
		h	= 450 mm
		b	= 250 mm
		t_w	= 8.0 mm
		t_f	= 8.0 mm

ULS

Strength: $M_{Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_o}{\gamma_{M1}}$ $\gamma_{M1} = 1.10$

$$M_{Rd} = \frac{1622.00 \cdot 10^3 \cdot 260.00}{1.10} \cdot 10^{-6} = 348.53 \text{ kNm}$$

$$A_v = 2 \cdot h_w t_w = 2 \cdot (h - 2t_f) t_w$$

$$A_v = 2 \cdot (450 - 2 \cdot 8.0) \cdot 8.0 = 6944.00 \text{ mm}^2$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$$

$$V_{Rd} = 6944.00 \cdot \frac{260.00}{1.10 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 947.61 \text{ kN}$$

Loads: $q_{g,beam} = \rho g A = 2700 \cdot 10 \cdot 10900 \cdot 10^{-9} = 0.29 \text{ kN/m}$

$$q_g = p_g \ell_2 + q_{g,beam} = 4.15 \cdot 3 + 0.29 = 12.74 \text{ kN/m}$$

$$q_q = p_q \ell_2 = 5.00 \cdot 3 = 15.00 \text{ kN/m}$$

$$q_s = p_s \ell_2 = 0.64 \cdot 3 = 1.92 \text{ kN/m}$$

$$q_w = p_w \ell_2 = 0.17 \cdot 3 = 0.51 \text{ kN/m}$$

STR - RC2 $q_d = \xi \gamma_G q_g + \gamma_Q (q_q + \psi_{0,s} q_s + \psi_{0,w} q_w)$ (6.10b)¹⁰⁶

$$= 1.20 \cdot 12.74 + 1.50 \cdot (15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51) = 37.79 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} q_d \ell_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 37.79 \cdot 6^2 = 170.06 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} q_d \ell_1 = \frac{1}{2} \cdot 37.79 \cdot 6 = 113.37 \text{ kN}$$

¹⁰⁵ Local buckling will not be checked.

¹⁰⁶ In Eurocode $\xi \gamma_G = 1.15$ instead of 1.20

Check: $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{170.06}{348.53} = 0.49 \leq 1.00 \rightarrow \text{O.K.}$

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{113.37}{947.61} = 0.12 \leq 1.00 \rightarrow \text{O.K.}$

SLS

$q_{inst} = q_g + q_q + \psi_{0,s}q_s + \psi_{0,w}q_w$
 $= 12.74 + 15.00 + 0.00 \cdot 1.92 + 0.00 \cdot 0.51 = 27.74 \text{ kN/m} \rightarrow$

$w_{inst} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_3 \ell_1^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{27.74 \cdot 6000^4}{70000 \cdot 300.80 \cdot 10^6} = 22.23 \text{ mm}$

$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_g \ell_1^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{12.74 \cdot 6000^4}{70000 \cdot 300.80 \cdot 10^6} = 10.21 \text{ mm}$

$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} = 22.23 + 0.00 = 22.23 \text{ mm}$

$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 22.23 - 0.00 = 22.23 \text{ mm}$

$w_{fin} - w_g = 22.23 - 10.21 = 12.02 \text{ mm}$

Check: $w_{net,fin} = 22.23 \leq 24.00 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$

$w_{fin} - w_g = 12.02 \leq 18.02 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$

Mass: $G = \rho_{mean} \cdot A \cdot \ell = 2700 \cdot 10900 \cdot 6000 \cdot 10^{-9} = \mathbf{176.58 \text{ kg}}$

Comments:

With a precamber of 15 mm and a profile *RHS 400x200x8* the mass is 150.34 kg but the deflection $w_{fin} - w_g$ becomes 18.49 mm, a little bit too high.

Alternatively a same profile as *IPE A 450* could be used with a total mass of 138.59 kg or with a precamber of 10 mm an *IPE A 400* with a mass of 118.42 kg.

Due to the low modulus of elasticity the deflections are decisive for the dimensions, therefore lower strength classes could be used, e.g. 6005A or 6061-T6 with for f_o 200 or 240 N/mm² respectively.

X.7 Embodied Land

In the Embodied Land for the materials, transportation from the factory to the building site still needs to be added. The following assumptions are made:

- Glulam is transported from DeGrootVroomshoop, distance 260 km by land.
- LSWB5G comes from BUCO-Import, Emblem in Belgium, 120 km by land.
- The steel beams are coming from Tata Steel¹⁰⁷ in IJmuiden, 250 km by land.
- The aluminium beams are coming from Aleris in Duffel, Belgium, 130 km by land.

The energy needed for transportation by land according to Arup [1]¹⁰⁸ is 0.001 MJ/kg·km resulting for wood, bamboo, steel and aluminium in an energy demand of 0.26, 0.12, 0.25 and 0.13 MJ/kg respectively. With the Transportation Energy for LSWB5G from China to BUCO of 5.15 MJ/kg and the general indirect Embodied Land for the materials, it follows:

Tabel X-4: Embodied Land - Indirect¹⁰⁹.

Recycling			Glulam	Glulam _{Bio}	LSWB5G	LSWB5G _{Bio}	Steel	Aluminium
EE _{Total} [MJ/kg]	EE _{PE}	Virgin	12.64 (1.37)	12.44 (1.37)	23.05 (3.23)	13.21 (3.23)	38.00 (12.24)	213.50 (65.24)
	EE _{PE} +EE _{RE}	50%					24.00 (6.37)	123.75 (33.65)
	EE _{RE}	100%					10.00 (3.57)	34.00 (16.55)
	EE _{CE}						2 648 230	9 000 000
	EE _{TE}		0.26	0.26	5.27	5.27	0.25	0.13
EE _{Total} [MJ/kg]	Sum	0%	12.90 (1.37)	12.70 (1.37)	28.31 (3.23)	18.47 (3.23)	2 648 268	9 000 214
		50%					1 324 139	4 500 124
		100%					10.25 (3.57)	34.13 (16.55)
Energy by PV-multicrystalline → multiplying by 0.002315 [m ² ·year/MJ]								
EL _{Indirect} [m ² ·year/kg]		0%	29.86·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	29.40·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	65.54·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	42.76·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	6 130	20 834
		50%					3 065	10 417
		100%					23.73·10 ⁻³ (8.27·10 ⁻³)	79.01·10 ⁻³ (38.30·10 ⁻³)
EE _{PE} = Embodied Energy – Production Energy			Glulam with MUF					
EE _{RE} = Embodied Energy – Recycling Energy			Glulam _{Bio} with Bio-MUF					
EE _{CE} = Embodied Energy – Compensation Energy			LSWB5G with PF and MUF					
EE _{TE} = Embodied Energy – Transportation Energy			LSWB5G _{Bio} with Bio-PF and Bio-MUF					

¹⁰⁷ Former Corus, Hoogovens IJmuiden.

¹⁰⁸ § 9.2.4, transportation by land, distance > 50 km, energy use for transportation = 0.001 MJ/kg·km.

¹⁰⁹ The first number is the mean and the number between parenthesis is the standard deviation.

With the direct Embodied Land for the materials and the masses of the beams calculated before, it follows:

Tabel X-5: Embodied Land.

	Recycling	Glulam	Glulam _{Bio}	LSWB _{5G}	LSWB _{5G} _{Bio}	Steel	Aluminium
EL _{Direct} [m ² ·year/kg]		1600 619	8.150 (1.851)	22 247 204	1.381 (0.064)	0.51·10 ⁻³ (0.25·10 ⁻³)	0.33·10 ⁻³ (0.10·10 ⁻³)
EL _{Indirect} [m ² ·year/kg]	0%	29.86·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	29.40·10 ⁻³ (3.17·10 ⁻³)	65.54·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	42.76·10 ⁻³ (7.47·10 ⁻³)	6130	20834
	50%					3 065	10 417
	100%					23.73·10 ⁻³ (8.27·10 ⁻³)	79.01·10 ⁻³ (38.30·10 ⁻³)
EL [m ² ·year/kg]	0%	1600 619	8.180 (1.851)	22 247 204	1.423 (0.064)	6130	20834
	50%					3 065	10 417
	100%					24.24·10 ⁻³ (8.28·10 ⁻³)	79.34·10 ⁻³ (38.30·10 ⁻³)
Mass		258.52 kg	258.52 kg	529.74 kg	529.74 kg	294.89 kg	176.58 kg
EL [m ² ·year]	0%	0.414·10 ⁹	2 114.60 (478.60)	11.881·10 ⁹	754.00 (34.11)	1.808·10 ⁶	3.679·10 ⁶
	50%					0.904·10 ⁶	1.839·10 ⁶
	100%					7.15 (2.44)	14.01 (6.76)
Lifespan of the building = 50 years							
EL [m ²]	0%	8.276·10 ⁶	42.29 (9.57)	237.612·10 ⁶	15.08 (0.68)	36155	73577
	50%					18 078	36 789
	100%					0.14 (0.05)	0.28 (0.14)
Glulam with MUF Glulam _{Bio} with Bio-MUF				LSWB _{5G} with PF and MUF LSWB _{5G} _{Bio} with Bio-PF and Bio-MUF			

Tabel X-6: Embodied Land for Wood C18, lifespan 50 years (only for comparison reasons).

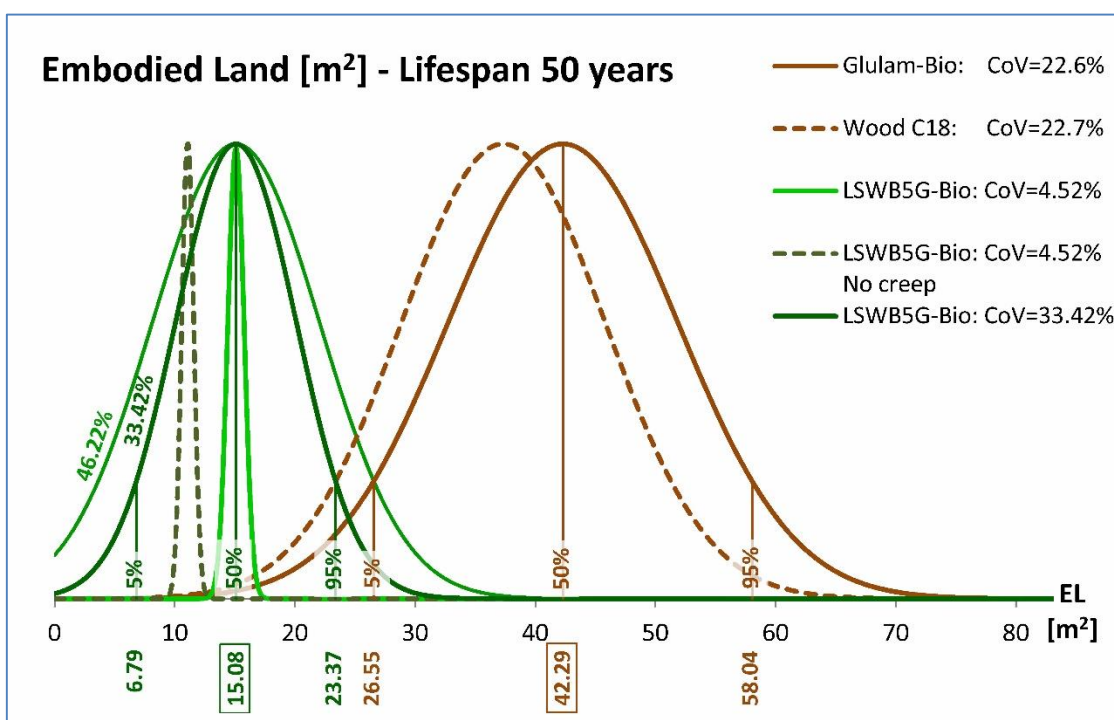
EL _{Direct} [m ² ·year/kg]	EE _{PE} [MJ/kg]	EE _{TE} [MJ/kg]	EE _{Total} [MJ/kg]	EL _{Indirect} [m ² ·year/kg]	EL [m ² ·year/kg]	Mass [kg]	EL [m ² ·year]	EL [m ²]
6.33 (1.44)	7.40 (2.92)	0.26	7.66 (2.92)	17.73·10 ⁻³ (6.76·10 ⁻³)	6.34 (1.44)	294.22	1866.43 (424.29)	37.33 (8.49)

For LSWB5G without creep, the EL of LSWB5G needs to be multiplied by 388.80/529.74.

Table X-7: EL [m²] for Wood, Glulam_{Bio}, and LSWB5G_{Bio}, Lifespan 50 years, Normal distribution.

	EL [m ²]			Fractile		Mass
	Mean	SD	CoV ¹¹⁰	5%	95%	
Glulam _{Bio} GL20h	42.29	9.57	22.63%	26.55	58.04	529.74 kg
Wood C18	37.33	8.49	22.73%	23.37	51.29	
LSWB5G _{Bio}	15.08	0.68	4.52%	13.96	16.20	
CoV = 33.42%	15.08	5.04	33.42%	6.79	23.37	
CoV = 46.22%	15.08	6.97	46.22%	3.61	26.55	388.80 kg
No creep	11.07	0.50	4.52%	10.24	11.89	

The EL for Glulam_{Bio} is higher than for Wood mainly caused by the wood losses due to the lamination process, EL_{Direct} is about 99.6% of the total EL. Due to lack of data, the CoV for LSWB5G_{Bio} is low. By putting the 95% fractile of LSWB5G_{Bio} equal to the 5% fractile of Wood, the CoV becomes 33.42% and for the 5% fractile of Glulam_{Bio} the CoV results in 46.22%.



Figuur X-1: Normal distributions of the EL for the beams at Econnect for Wood, Glulam_{Bio} and LSWB5G_{Bio}, Lifespan 50 years.

¹¹⁰ CoV = Coefficient of Variation.

X.8 Conclusions

In general, at the moment the only realistic material usable for structural elements by MAXergy's methodology is Wood. But wooden beams are only available in limited dimensions.

Beams for the canopy of Econnect results in vary large Embodied Land values, for LSWB5G mainly because of the used resin (PF) and adhesive (MUF) based on crude oil and natural gas. Even so for Glulam due to the use of MUF. The high values for Steel and Aluminium, per beam 3.6 *ha* and 7.4 *ha* respectively, are caused by the Compensation Energy. 100% recycled is only usable when the material used for recycling is paid back for. If that didn't happen, one needs to calculate with the virgin material¹¹¹.

The only realistic alternative for large beams is Glulam or LSWB5G with a resin and adhesive based on 100% bio-mass. Although, they are not yet available at the moment, one may expect these in the near future. In that case, Glulam_{Bio} comes close to Wood and LSWB5G_{Bio} is even better, 2.5 times compared to Wood (for smaller beams) and 2.8 times compared to Glulam_{Bio} (for larger beams). Because the EL for LSWB5G_{Bio} is for 97% made up out of EL_{Direct}, the actual land needed for the beam is less than half that needed for a wooden or a Glulam_{Bio} beam. An important fact when land becomes scarce in the future due to land use for growing food and materials for bio-energy.

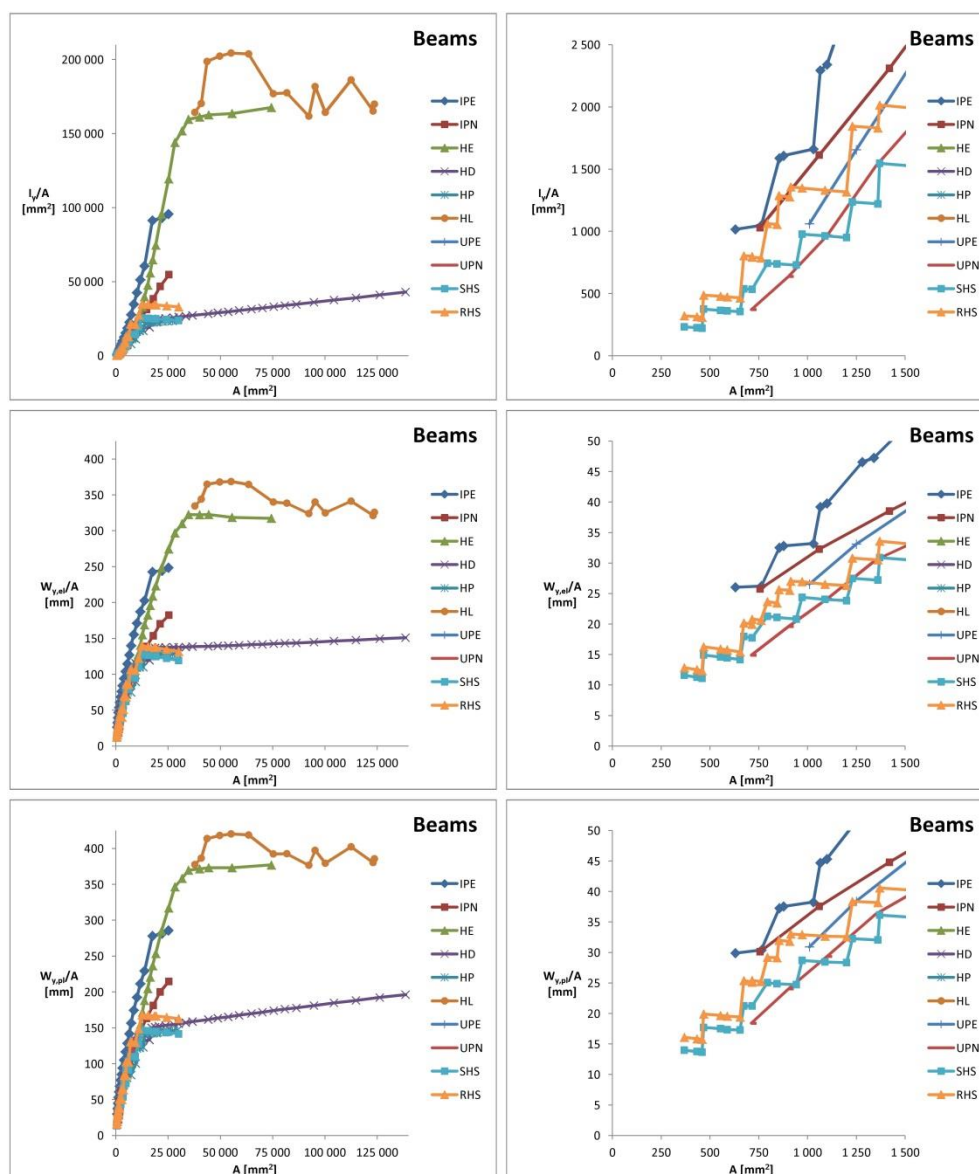
For LSWB5G_{Bio} without creep the results are even better, 3.4 times better than wood and 3.8 times better than Glulam_{Bio}. However, how much LSWB5G_{Bio} actual will creep needs to be investigated but it will probably be lesser than wood. Another topic of research will be the change of mechanical properties due to the use of resins and adhesives based on bio-mass, if available. The main property imposing the dimensions of the LSWB5G beam with creep or without creep is the MOE, the Unity Check (u.c.) is 47.00% and 75.56% respectively. For the Ultimate Limit State there is still room. Due to the structure of SWB5G¹¹² a huge decrease of the MOE by using another resin is not to be expected. Comparing the u.c. of Glulam (100%) to those of LSWB5G, it can be concluded that the advantages of LSWB5G will increase with less stringent deflection requirements. On the other hand, they will decrease if smaller deflections are allowed.

¹¹¹ In MAXergy 2.0 recycling will no longer be separately taken into account, but it will be part of the Production Energy and the lifespan will be elongated.

¹¹² Stiff fibres surrounded by flexible parenchyma cells imbedded in PF. The main component responsible for the relatively low MOE are the parenchyma cells. Changing the resin will probably have little effect on the MOE.

XI. Selectie staalprofielen met minimaal materiaalgebruik

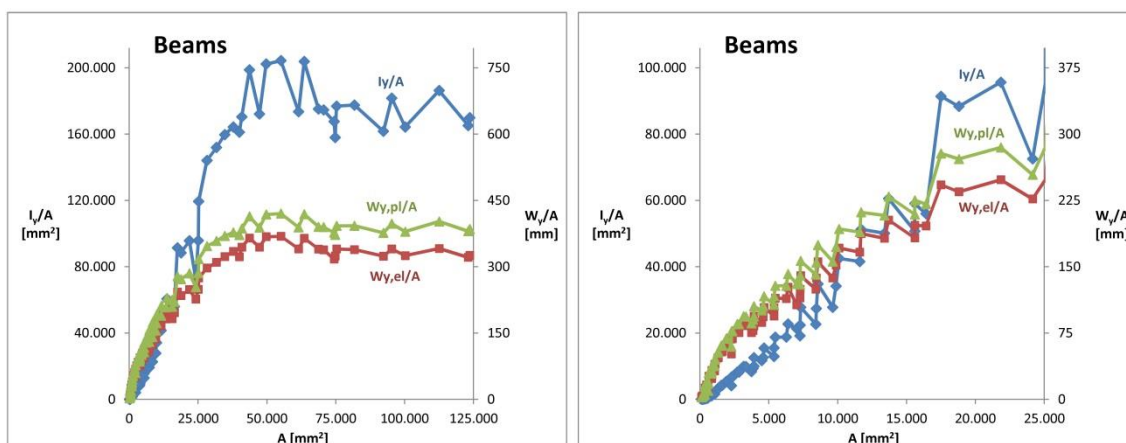
Embodied Land wordt gekoppeld aan de massa van het onderdeel, dus via de volumieke massa aan het volume of voor een balk aan het oppervlak maal de lengte. Sommige geometrische vormen hebben een gunstigere stijfheid-oppervlak of sterkte-oppervlak verhouding dan andere. Voor de bestaande Europese stalen standaardprofielen zijn deze verhoudingen tegen elkaar uitgezet.



Figuur XI-1: Traagheidsmoment (I_y) en weerstandsmomenten (W_y) in relatie tot het oppervlak (A) voor 304 Europese staalprofielen.

De IPE-profielen (IPE-AA en IPE-A) hebben qua materiaalgebruik de gunstigste vorm. Bij de grotere afmetingen (lees grotere overspanningen en belastingen) zijn dit vervolgens de HE-A en HL profielen. Bij de kleinere afmetingen zijn de rechthoekige kokers maatgevend. Opvallend in deze is dat hoofdzakelijk de profielen met de dunste wanden maatgevend zijn met betrekking tot materiaalgebruik. De verklaring hiervoor is dat een profiel met dunne wanden en eenzelfde oppervlak (en eventueel breedte) automatisch hoger is en dus een hogere traagheidsmoment en weerstandsmoment heeft. Deze profielen kunnen wel last hebben van kippen en/of plooiën wat verder in deze studie buiten beschouwing is gelaten.

Worden in relatie tot het materiaalgebruik alleen de gunstigste profielen geselecteerd, dan blijven van de 304 stuks nog 95 stuks over.



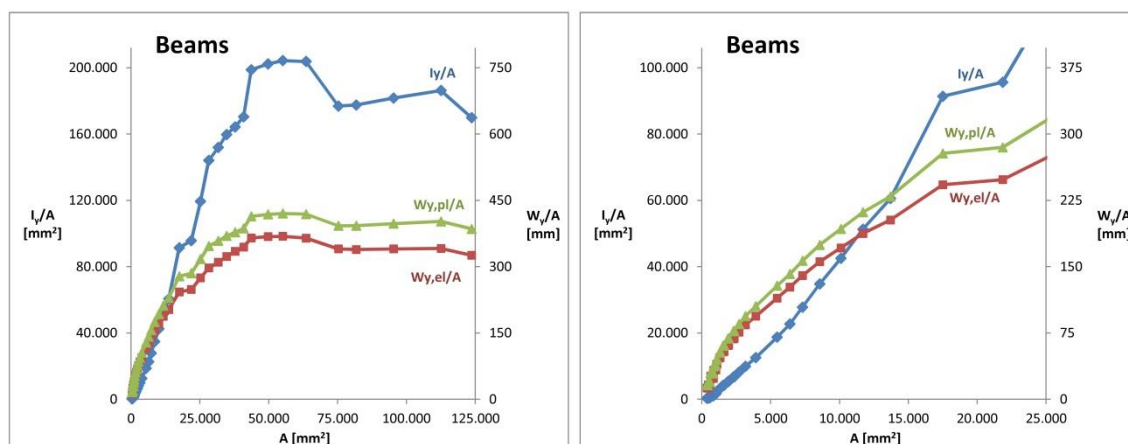
Figuur XI-2: I_y/A en W_y/A voor 95 gunstige Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.

SHS 40x40x2.5	IPE A 140	RHS 400x200x6	HE 1000 x 249
SHS 40x40x2.5	IPE AA 160	IPE O 330	HE 1000 A
RHS 50x30x2.5	IPE A 160	IPE 360	HL 1000 AA
SHS 40x40x3	IPE AA 180	IPE A 400	HE 1000 B
RHS 50x30x3	IPE A 180	IPE O 360	HL 1000 A
RHS 50x30x3.2	IPN 160	IPE 400	HL 1100 A
SHS 50x50x2.5	IPE AA 200	IPE A 450	HL 1000 B
RHS 60x40x2.5	IPE A 200	IPE O 400	HL 1100 B
SHS 50x50x3	IPE AA 220	IPE 450	HL 1100 M
RHS 60x40x3	IPE A 220	IPE A 500	HL 1000 x 483
RHS 60x40x3.2	IPE AA 240	IPE 500	HL 1100 R
IPE AA 80	IPE A 240	IPE A 550	HL 1000 x 539
IPN 80	IPE O 220	IPE 550	HL 1000 x 554
IPE 80	UPE 240	IPE A 600	HE 1000 x 584
RHS 90x50x3	IPE 240	IPE O 550	HL 920 x 588
RHS 90x50x3.2	IPE A 270	IPE 600	HL 1000 x 591
RHS 100x50x3	UPE 270	HE 600 AA	HL 1000 x 642
IPE AA 100	IPE 270	IPE 750 x 137	HL 920 x 725
IPE A 100	IPE A 300	IPE 750 x 147	HL 1000 x 748
IPE 100	IPE O 270	HE 800 AA	HL 920 x 787
IPN 100	IPE 300	HE 650 A	HL 1000 x 883
IPE AA 120	IPE A 330	IPE 750 x 196	HL 920 X 967
IPE A 120	IPE 330	HE 900 AA	HL 920 x 970
IPE AA 140	IPE A 360	HE 1000 AA	

Figuur XI-3: Lijst met 95 gunstige Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.

In Figuur XI-2 zitten nog enkele neerwaartse pieken (ongunstiger materiaalgebruik). Dit komt doordat bij de selectie niet alleen naar de relatie tot het oppervlak is gekeken, maar ook naar de traagheidsmomenten en weerstandsmomenten zelf. Indien deze groter waren zijn ze in eerste instantie meegenomen.

In een verdere selectie zijn die pieken eruit gehaald. Bij vergelijkende berekeningen wordt dan wel automatisch een groter profiel gekozen en dus meer materiaal toegepast! Uiteindelijk blijven 49 profielen over.



Figuur XI-4: I_y/A en W_y/A voor de 49 gunstigste Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.

Voor de lijst met profielen wordt verwezen naar Figuur XI-5 op de volgende pagina.

Als laatste dient wel opgemerkt te worden dat het gebruik van hogere profielen kan resulteren in hogere bouwwerken en dus voor het totale bouwwerk misschien in een hogere *Embodied Land* wat dus ongunstig is. Ook kan de voornoemde kip en plooi gevoeligheid extra voorzieningen vragen wat *Embodied Land* verhogend kan werken.

Beams							
	I_y mm ⁴ x10 ⁴	$W_{el,y}$ mm ³ x10 ³	$W_{pl,y}$ mm ³ x10 ³	A mm ²	I_y/A mm ²	$W_{y,el}/A$ mm	$W_{y,pl}/A$ mm
RHS 50x30x2.5	11.80	4.73	5.92	368.00	320.65	12.85	16.09
RHS 50x30x3	13.60	5.43	6.88	434.00	313.36	12.51	15.85
RHS 60x40x2.5	22.80	7.61	9.32	468.00	487.18	16.26	19.91
RHS 60x40x3	26.50	8.82	10.90	554.00	478.34	15.92	19.68
RHS 60x40x3.2	27.80	9.27	11.50	588.00	472.79	15.77	19.56
IPE AA 80	64.10	16.44	18.86	631.00	1 015.85	26.05	29.89
IPE 80	80.14	20.03	23.22	764.00	1 048.95	26.22	30.39
RHS 90x50x3	84.40	18.80	23.20	794.00	1 062.97	23.68	29.22
RHS 90x50x3.2	89.10	19.80	24.60	844.00	1 055.69	23.46	29.15
IPE AA 100	135.90	27.85	31.90	856.00	1 587.62	32.54	37.27
IPE A 100	141.20	28.81	32.98	878.00	1 608.20	32.81	37.56
IPE 100	171.00	34.20	39.41	1 030.00	1 660.19	33.20	38.26
IPE AA 120	244.20	41.74	47.62	1 065.00	2 292.96	39.19	44.71
IPE A 120	257.40	43.77	49.87	1 100.00	2 340.00	39.79	45.34
IPE AA 140	407.00	59.66	67.60	1 281.00	3 177.21	46.57	52.77
IPE A 140	434.90	63.30	71.60	1 340.00	3 245.52	47.24	53.43
IPE AA 160	645.60	82.56	93.32	1 540.00	4 192.21	53.61	60.60
IPE A 160	689.30	87.81	99.09	1 620.00	4 254.94	54.20	61.17
IPE AA 180	1 020.00	115.70	130.50	1 903.00	5 359.96	60.80	68.58
IPE A 180	1 063.00	120.10	135.30	1 960.00	5 423.47	61.28	69.03
IPE AA 200	1 533.00	156.20	175.80	2 287.00	6 703.10	68.30	76.87
IPE A 200	1 591.00	161.60	181.70	2 350.00	6 770.21	68.77	77.32
IPE AA 220	2 219.00	205.00	230.00	2 699.00	8 221.56	75.95	85.22
IPE AA 240	3 154.00	266.80	298.20	3 171.00	9 946.39	84.14	94.04
IPE A 270	4 917.00	368.30	412.50	3 920.00	12 543.37	93.95	105.23
IPE A 330	10 230.00	625.70	701.90	5 470.00	18 702.01	114.39	128.32
IPE A 360	14 520.00	811.80	906.80	6 400.00	22 687.50	126.84	141.69
IPE A 400	20 290.00	1 022.00	1 144.00	7 310.00	27 756.50	139.81	156.50
IPE A 450	29 760.00	1 331.00	1 494.00	8 560.00	34 766.36	155.49	174.53
IPE A 500	42 930.00	1 728.00	1 946.00	10 100.00	42 504.95	171.09	192.67
IPE A 550	59 980.00	2 193.00	2 475.00	11 700.00	51 264.96	187.44	211.54
IPE A 600	82 920.00	2 778.00	3 141.00	13 700.00	60 525.55	202.77	229.27
IPE 750 x 137	159 900.00	4 246.00	4 865.00	17 500.00	91 371.43	242.63	278.00
HE 800 AA	208 900.00	5 425.51	6 225.00	21 850.00	95 606.41	248.31	284.90
HE 900 AA	301 100.00	6 922.87	7 999.00	25 220.00	119 389.37	274.50	317.17
HE 1000 AA	406 500.00	8 380.00	9 777.00	28 220.00	144 046.78	296.95	346.46
HE 1000 x 249	481 100.00	9 818.00	11 350.00	31 680.00	151 862.37	309.91	358.27
HE 1000 A	553 800.00	11 190.00	12 820.00	34 680.00	159 688.58	322.66	369.67
HL 1000 AA	620 300.00	12 630.00	14 260.00	37 761.26	164 268.88	334.47	377.64
HL 1000 A	696 400.00	14 069.62	15 800.00	40 884.56	170 333.25	344.13	386.45
HL 1100 A	867 400.00	15 920.00	18 060.00	43 650.00	198 717.07	364.72	413.75
HL 1100 B	1 005 000.00	18 279.95	20 780.47	49 700.00	202 213.28	367.81	418.12
HL 1100 M	1 126 000.00	20 320.00	23 160.00	55 120.00	204 281.57	368.65	420.17
HL 1100 R	1 294 000.00	23 149.54	26 600.00	63 520.00	203 715.37	364.44	418.77
HL 1000 x 591	1 331 000.00	25 600.00	29 530.00	75 270.00	176 830.08	340.11	392.32
HL 1000 x 642	1 451 000.00	27 680.00	32 100.00	81 760.00	177 470.65	338.55	392.61
HL 1000 x 748	1 732 000.00	32 430.00	37 880.00	95 340.00	181 665.62	340.15	397.31
HL 1000 x 883	2 096 000.00	38 390.00	45 260.00	112 530.00	186 261.44	341.15	402.20
HL 920 x 970	2 100 000.00	40 270.00	47 660.00	123 660.00	169 820.48	325.65	385.41

Figuur XI-5: De 49 gunstigste Europese staalprofielen in relatie tot materiaalgebruik.