

*Ontwerptool voor de beoordeling van
constructieve alternatieven op
duurzaamheid*



Contactgegevens

Afstudeercommissie

Hoofdbegeleider

Prof. dipl. ing. J.N.J.A. Vambersky

E-mail : J.N.J.A.Vambersky@tudelft.nl

Tel. : (+31) (0)15 2785488

Begeleider IMd Raadgevende Ingenieurs

Ir. P. Peters

E-mail : p.peters@imdbv.nl

Tel. mobiel : 06-22245514

Begeleiders TU Delft

Prof. dr. ir. M. Haas

E-mail : E.M.Haas@tudelft.nl

Tel. : +31 15 27 85686

Dr. ir. G.A. Van Nederveen

E-mail : G.A.vanNederveen@tudelft.nl

Tel. : (+31) (0)15 2781854

Afstudeerbedrijf

IMd Raadgevende Ingenieurs

Adres : Jan Leentvaarlaan 62
3065 DC Rotterdam

Tel. bedrijf : 010 – 2012360

Website : www.imdbv.nl

Afstudeerder

Frank Tool

E-mail : F.T.Tool@student.tudelft.nl

Tel. : 06-47779578

Voorwoord

Dit rapport is de verslaglegging van mijn afstudeeronderzoek die ik, in het kader van mijn opleiding Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft, heb verricht.

Gedurende mijn afstudeeronderzoek heb ik een methode en een ontwerptool ontwikkeld, waarmee op een eenvoudige en doeltreffende wijze de duurzaamheid van constructieve ontwerpen kan worden beoordeeld.

De ontwikkelde methode kijkt op een essentieel punt af van de bestaande beoordelingsmethoden en moet gezien worden als een eerste stap in de richting van een integrale beoordeling, waarbij niet alleen de milieukosten ten gevolge van het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik worden berekend, maar tevens de verwachte levensduur van het gebouw wordt meegenomen, berekend op basis van gebouwspecifieke kenmerken. Door constructieve ontwerpen op deze wijze te beoordelen vertalen de meerkosten van een slimme constructie zich in lagere milieukosten.

Het initiatief voor dit onderzoek is genomen door Pim Peters, directeur en raadgevend ingenieur van het bureau IMd Raadgevende Ingenieurs te Rotterdam. Binnen IMd heb ik kunnen werken aan mijn onderzoek, met Pim als mijn bedrijfsbegeleider. Het aanstekelijke enthousiasme waarmee hij spreekt over duurzaamheid en duurzaam construeren en een prettige werkomgeving hebben ertoe geleid dat ik met veel plezier aan het onderzoek heb gewerkt. Daarnaast hebben de vele gesprekken die we hebben gevoerd, mij gedurende het onderzoek in de goede richting gestuurd. Voor mijn onderzoek heb ik daarnaast veel gehad aan mijn begeleiders van de TU. Dit zijn Michiel Haas, Sander van Nederveen en dhr. Vambersky. Ik heb de begeleiding gedurende mijn onderzoek als zeer prettig ervaren. Bij deze wil ik mijn begeleiders bedanken voor hun bijdrage aan mijn afstudeeronderzoek.

Delft, 13 september 2010
Frank Tool

Samenvatting

De draagconstructie heeft een groot aandeel in de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in een gebouw. De milieukosten van een gebouw kunnen worden bepaald met behulp van toetsingsinstrumenten. Deze instrumenten zijn ontwikkeld om een gebouw als geheel te beoordelen. Voor het beoordelen en vergelijken van constructieve ontwerpen op duurzaamheid bestaat echter nog geen geschikt toetsingsinstrument. In dit afstudeeronderzoek is hiervoor een methode ontwikkeld en uitgewerkt tot een bruikbare ontwerptool. Het onderzoek is gestart met een studie naar de geschiedenis van de ontwikkeling van het 'duurzaam construeren'. Met de term 'duurzaam' wordt verwezen naar de algemene eigenschap van een materiaal, gebouwdeel of constructie, welke een indicatie geeft van de invloed op het milieu (Engels: sustainable).

Brundtland legde in 1987 in het rapport 'Our Common Future', uitgebracht door de Wereld Commissie voor Milieu en Ontwikkeling, een duidelijk verband tussen economische groei, milieuvraagstukken en armoede- en ontwikkelingsproblematiek. Aan de hand van de volgende formule (Ehrlich & Ehrlich, 1990) is het mogelijk om de verbanden te kwantificeren:

$$EP = P \times W \times E.$$

De formule stelt dat de milieudruk (EP) het product is van de bevolkingsomvang (P), de gemiddelde welvaart per persoon (W) en de milieubelasting per eenheid van welvaart (E). Bij het streven naar halvering van de milieudruk in 2040 ten opzichte van 1990 en de veronderstelling dat de bevolking in die tijd verdubbelt en de welvaart vijf keer zo groot wordt, betekent dit dat de milieuefficiëntie met een factor 20 omhoog moet.

De internationale aandacht voor de enorme groei van de impact door de mens op het milieu is sinds het uitkomen van het Brundtland-rapport flink toegenomen. Men is ervan bewust geraakt dat de milieuproblematiek enkel door middel van mondiaal beleid kan worden aangepakt. De klimaatverdragen zijn hier een voorbeeld van. De factor 20 wordt hierin vaak gebruikt als metafoor voor de hoge milieuambities en als richtlijn.

Nederland

De duurzame ontwikkeling is ook doorgedrongen in de bouwsector. In de jaren negentig van de vorige eeuw werd in het eerste Nationaal Milieubeleidsplan het begrip 'duurzaam bouwen' geïntroduceerd. Dit 'duurzaam bouwen' is erop gericht de gezondheid- en milieueffecten als gevolg van het bouwen, de gebouwen en de bebouwde omgeving te reduceren'

Bouwactiviteiten zijn verantwoordelijk voor een fors gedeelte van de totale Nederlandse milieubelasting. Een onderzoek naar de verdeling van de milieukosten van een kantoorgebouw (1) heeft uitgewezen dat de invloed van het materiaalgebruik op de milieukosten aanzienlijk is, zie onderstaande figuur. Deze invloed is afhankelijk van de levensduur van een gebouw, maar zal al groter worden, ervan uitgaande dat de milieubelasting voor het energieverbruik zal afnemen door toepassing van duurzame energiebronnen.



Figuur 0.1: Bijdrage van het materiaalgebruik en water- en energieverbruik aan de milieukosten bij verschillende levensduurscenario's.

Berekenmethodieken

Gezien het grote aandeel van het materiaalgebruik op de totale milieukosten, hoewel afhankelijk van de levensduur van een gebouw, en het feit dat ongeveer 60% van het materiaalgebruik toebehoort tot de draagconstructie, is het belangrijk om een constructief ontwerp te kunnen beoordelen op duurzaamheid. Deze beoordeling kan een helder inzicht geven over de uiteindelijke milieuprestatie van een gebouw. Daarnaast kan deze beoordeling in de ontwerpfase als hulpmiddel dienen bij de keuze uit meerdere constructieve alternatieven.

In de huidige Nederlandse bouwpraktijk worden hoofdzakelijk de volgende toetsingsmethodieken gebruikt: GPR Gebouw en GreenCalc+. Aan de basis van deze methoden en instrumenten ligt de levenscyclusanalyse (LCA). Met de LCA wordt de gehele levenscyclus van een grondstof, materiaal of product, doorgenomen en alle optredende milieueffecten in kaart gebracht. Daarnaast zijn er ook methoden ontwikkeld om de milieukosten van een product door de gehele levenscyclus te bepalen, op basis van de optredende milieueffecten. Milieukosten zijn, algemeen gezien, de kosten die de samenleving moet betalen om schade aan het milieu te voorkomen en te herstellen.

Uit het onderzoek naar de verschillende toetsingsmethodieken is gebleken dat de draagconstructie niet specifiek wordt meegenomen in de beoordeling. Op basis van beperkte gegevens van het beschouwde gebouw, gekoppeld aan gegevens van referentieprojecten, worden de materiaalhoeveelheden van een gebouw en dus de draagconstructie bepaald. Deze hoeveelheden kunnen handmatig worden gewijzigd. Echter zijn de mogelijkheden hiervoor beperkt en is de werkwijze tijdrovend. Hierdoor zijn de methoden niet geschikt om op een eenvoudige wijze de duurzaamheid van verschillende constructieve alternatieven te beoordelen. Op basis van deze conclusie is een onderzoek gestart naar de methode voor de beoordeling van een constructief ontwerp op duurzaamheid.

Methode voor de beoordeling van constructieve alternatieven op duurzaamheid

De milieukosten van een gebouw bestaan hoofdzakelijk uit de realisatiekosten, de jaarlijkse kosten voor energie- en waterverbruik en de sloopkosten. De totale milieukosten (E) van een gebouw is de som van de realisatiekosten (I), de sloopkosten (D) en de jaarlijkse kosten (a) maal de levensduur (L) van het gebouw:

$$E = I + D + (a \cdot L)$$

De jaarlijkse milieukosten (e) worden berekend met de volgende formule:

$$e = a + (I + D)/L$$

Het verlengen van de levensduur leidt tot lagere jaarlijkse milieukosten en vice versa. De lange termijn in beschouwing nemend (veel langer dan de levensduur van een gebouw), kan gesteld worden dat een aantal gebouwen met een lange levensduur leiden tot een lagere milieubelasting dan veel meer gebouwen met een korte levensduur. Het vergelijken en beoordelen van constructieve alternatieven zal dus op basis van de jaarlijkse milieukosten worden gedaan.

Het bepalen van de jaarlijkse milieukosten bestaat uit de volgende twee onderdelen:

1. Het bepalen van de totale milieukosten van het gebouw
2. Het bepalen van de werkelijke levensduur van het gebouw.

Bepaling totale milieukosten

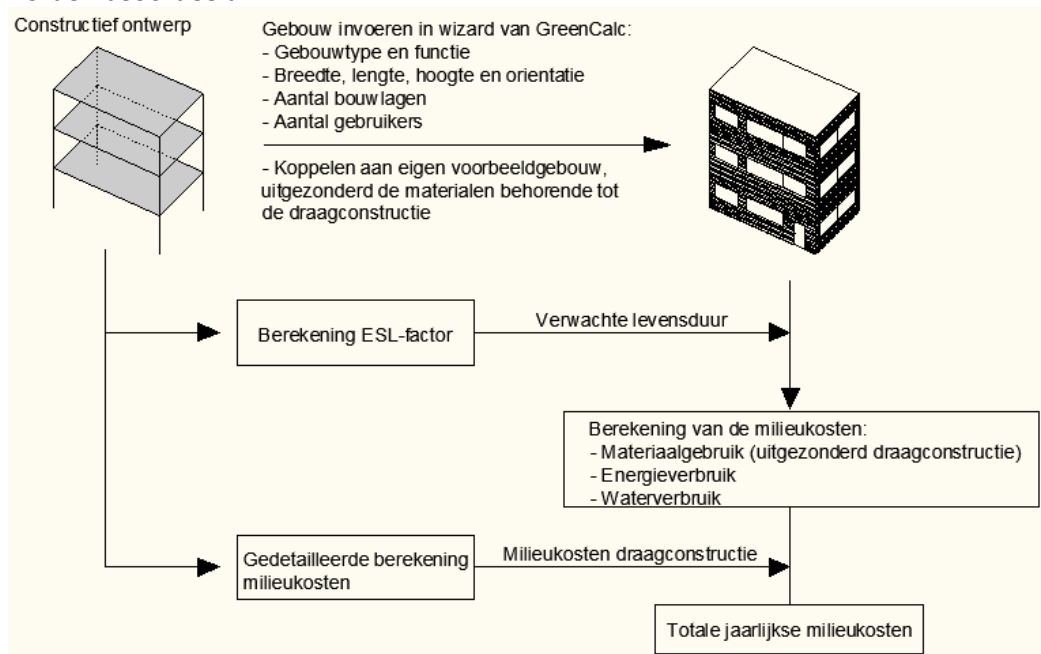
De milieukosten van een gebouw kunnen worden bepaald uit het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik. Omdat een constructief ontwerp wordt beoordeeld en niet een gebouw als geheel, zijn niet alle onderdelen, welke van invloed zijn op de milieukosten, bekend.

In het geval van een constructief ontwerp is enkel de draagconstructie vastgelegd, ongeveer 60% van de totale milieukosten ten gevolge van het materiaalgebruik. Van de overige 40% dient een benadering te worden gemaakt, evenals de milieukosten t.g.v. het energie- en waterverbruik. Voor deze benadering wordt gebruik gemaakt van GreenCalc+.

GreenCalc+ biedt de mogelijkheid om op een eenvoudige wijze een gebouw in te voeren, deze vervolgens te koppelen aan een voorbeeldgebouw en het energie- en waterconcept in te stellen. Vervolgens worden de milieukosten bepaald voor het gehele gebouw. Voor de bepaling van de milieukosten van het materiaalgebruik in de draagconstructie is deze berekening echter niet geschikt. Gezien het grote aandeel van de draagconstructie op de milieukosten, is een gedetailleerd berekening van de draagconstructie noodzakelijk, in plaats van een globale berekening zoals die nu wordt uitgevoerd.

De voorbeeldgebouwen van GreenCalc+ kunnen worden aangepast. Door de elementen, behorende tot de draagconstructie te verwijderen, kunnen de milieukosten, uitgezonderd de materiaalmilieukosten t.g.v. de draagconstructie worden berekend. Vervolgens zullen de milieukosten behorende tot de draagconstructie apart worden berekend, om daarna te worden toegevoegd aan de GreenCalc+ berekening. Bij de bepaling van het materiaalgebruik dient de functionele eenheid voor elk ontwerp gelijk te zijn. De gehanteerde functionele eenheid is: een volledig functionerend en afgewerkt gebouw.

Inclusief het meenemen van de verwachte levensduur van het gebouw, leidt de bovenstaande methode tot het volgende model waarmee de duurzaamheid van een constructief ontwerp kan worden beoordeeld:



Figuur 0.2: Model van de berekening van de jaarlijkse milieukosten

Bepaling ESL-factor

Door in het ontwerp rekening te houden met toekomstige ontwikkelingen, wordt de economische en technische levensduur van een gebouw verlengd. Tegen relatief lage kosten kan het gebouw dan worden aangepast om aan de nieuwe eisen te voldoen, in tegenstelling tot slopen of ingrijpend verbouwen.

De levensduur van een gebouw wordt beïnvloed door verschillende factoren. Deze factoren kunnen worden samengevat in de Estimated Service Life – factor, ofwel ESL-factor, om de verwachte levensduur van een gebouw te berekenen. De ESL-factor is de indicator van de impact van de verschillende aspecten die invloed hebben op de levensduur van een gebouw. Toegepast in de berekening van de jaarlijkse milieukosten leidt dit tot de volgende formule:

$$e = a + (I + D)/(ESL * L)$$

De levensduur (L) is in deze formule een aanname, zoals in GreenCalc wordt gehanteerd. Deze is afhankelijk van de gebruiksfunctie van het gebouw.

Het berekenen van de exacte ESL-factor is haast onmogelijk. Er wordt dan ook gebruik gemaakt van ESL categorieën, gebaseerd op beslissende factoren voor de levensduur van een gebouw. Voor de bepaling van de ESL-factor voor de draagconstructie is gekeken naar de veranderbaarheid (flexibiliteit en aanpasbaarheid) van de constructie.

Een analyse naar de beslissende factoren heeft er toe geleid dat voor de volgende aspecten de invloed is gemodelleerd.

- Stabiliteitssysteem
- Sparingsflexibiliteit
- Draagvermogen
- Overmaat in verdiepingshoogte
- Overmaat in benodigd vloeroppervlak
- Stramienmaten: Draagconstructie, gevel
- Gevel: Dragend of niet-dragend
- Installaties: Bereikbaarheid en positionering

Voor elk aspect is een factorbereik bepaald. Op basis van de ingevoerde gegevens wordt per aspect een factor bepaald binnen het bijbehorende bereik. Vervolgens kan de ESL-factor als volgt worden berekend: $ESL\text{-factor} = A * B * C * \dots$. De factoren A, B, C etc. behoren bij de hierboven genoemde aspecten. De berekening van de ESL-factor is vervolgens gekalibreerd en gevalideerd met behulp van een aantal transformatieprojecten uit de praktijk.

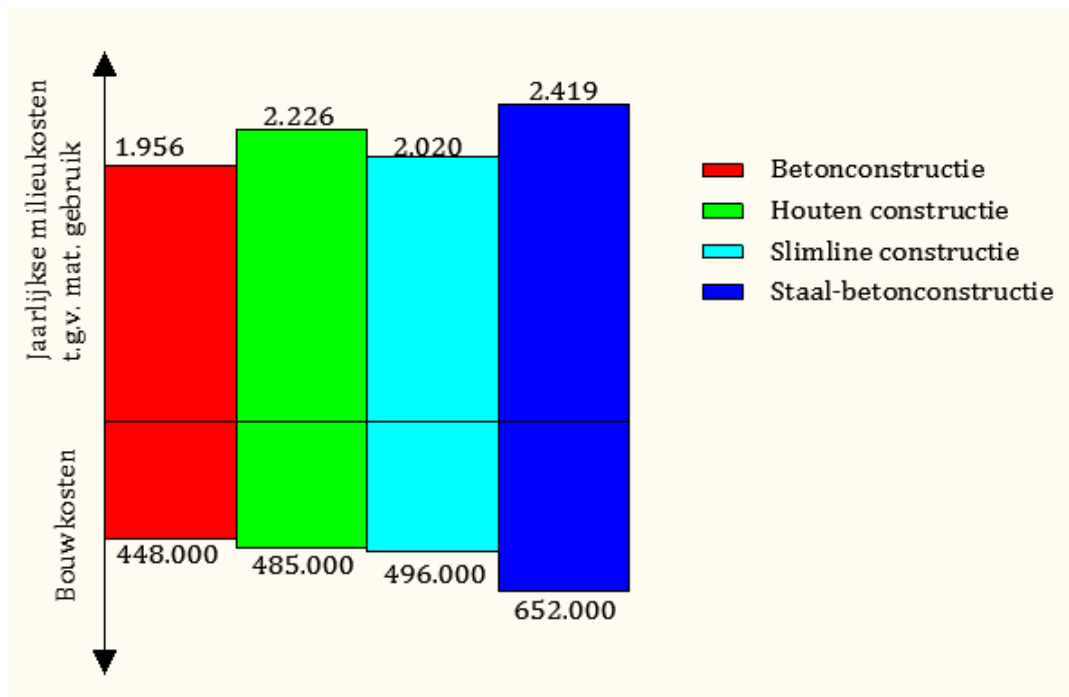
De uitkomsten van de bovenstaande onderzoeken naar de berekening van de jaarlijkse milieukosten van een gebouw en de berekening van de verwachte levensduur zijn vervolgens samengevoegd in een ontwerptool. Gedurende het afstudeeronderzoek is ervoor gekozen om de ontwerptool te integreren in één van de bestaande toetsingsinstrumenten. Hierdoor kan veel sneller een groot bereik op de markt worden gerealiseerd, wat ten goede komt aan de kwaliteit van het duurzaam construeren. GreenCalc+ bleek hiervoor het meest geschikt.

De ontwerptool biedt de mogelijkheid om op een eenvoudige wijze de milieukosten t.g.v. van het materiaalgebruik in de draagconstructie en de verwachte levensduur van het gebouw te berekenen. De met GreenCalc+ berekende milieukosten voor het gebouw, uitgezonderd de milieukosten van de draagconstructie, kunnen eenvoudig geïmporteerd worden. Per constructief alternatief worden de jaarlijkse milieukosten berekend en op basis hiervan kan het meest duurzame ontwerp worden bepaald.

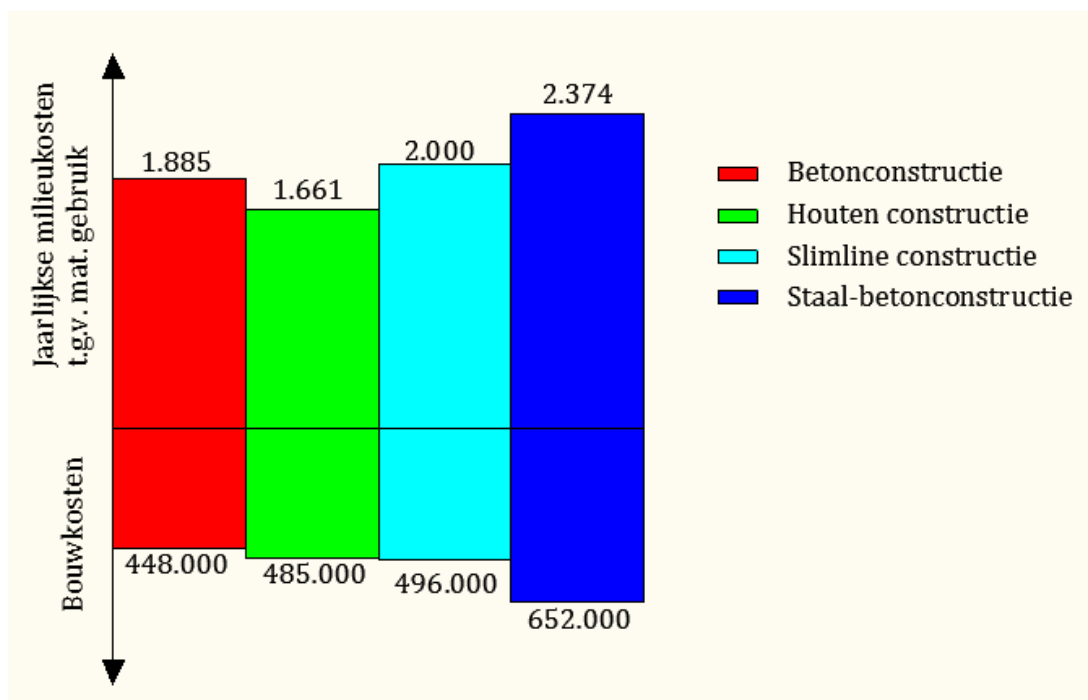
Het laatste onderdeel van het afstudeeronderzoek betreft het ontwerpen van vier constructieve concepten voor een kantoorgebouw. Dit zijn:

- Een betonnen constructie met een Airdeck vloersysteem
- Een betonnen constructie met een Slimline vloersysteem
- Een staal-betonconstructie
- Een houten constructie

De ontwerpen zijn ingevoerd in de ontwerptool en vervolgens beoordeeld op duurzaamheid. Voor de beoordeling zijn de constructies zowel doorgerekend en beoordeeld bij toepassing van standaard en duurzame materialen. Bij toepassing van standaard materialen zijn de betonconstructie en de Slimline constructie het meest duurzaam. Als echter naast duurzaamheid ook het kostenaspect wordt meegenomen in de beoordeling, kan gesteld worden dat de betonnen constructie het beste alternatief is voor het ontworpen gebouw, zie Figuur 0.3. Bij toepassing van duurzame materialen is de houten constructie het meest duurzaam, zie Figuur 0.4. De bouwkosten zijn echter 8% hoger dan de betonconstructie, welke minder duurzaam is. Een investering van 8% op de bouwkosten resulteert dus in de meest duurzame constructie.



Figuur 0.3: Overzicht van de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik (standaard materialen) en de bouwkosten, per constructief ontwerp.



Figuur 0.4: Overzicht van de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik (duurzame materialen) en de bouwkosten, per constructief ontwerp.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting.....	ii
1 Inleiding	1
2 Onderzoeksopzet.....	2
2.1 Probleemstelling.....	2
2.2 Doelstellingen.....	2
2.3 Onderzoeksvragen.....	2
2.4 Onderzoeksopzet.....	3
3 Duurzame ontwikkeling en duurzaam bouwen	4
3.1 Geschiedenis.....	4
3.2 Huidige stand van zaken.....	4
3.3 Nederland	6
3.3.1 Duurzaam bouwen	6
3.3.2 Materiaalgebruik	7
4 Beoordeling milieuprestatie.....	9
4.1 Levenscyclusanalyse	9
4.1.1 Stappen van de LCA	10
4.1.2 Opmerkingen	11
4.2 Milieukosten	12
4.2.1 Life Cycle Costing.....	12
4.2.2 Directe en indirecte milieukosten	12
4.3 Berekenmethodieken.....	13
4.3.1 GreenCalc+	13
4.3.2 Eco-Quantum.....	18
4.3.3 BREEAM-NL.....	22
4.3.4 GPR Gebouw.....	24
4.4 Conclusie	26
5 Draagconstructie en duurzaamheid	27
5.1 Definitie duurzaamheid	28
5.2 Duurzaam Construeren	28
5.3 Draagconstructie en duurzaamheid	29
5.3.1 Levensduur en functie	29
5.3.2 Materiaalgebruik en materiaalkeuze	31
5.3.3 Logistiek en transport.....	31
5.3.4 Multifunctionaliteit	31
6 Beoordeling van duurzaamheid	32

6.1	Vergelijken van gebouwen	32
6.1.1	Referentietypen.....	32
6.1.2	Conclusie	34
6.2	Levensduur	35
6.2.1	Estimated Service Life	36
6.2.2	ESL van de draagconstructie.....	37
6.3	Vergelijkingsmethode voor de tool	37
6.3.1	Totale milieukosten	37
6.3.2	De werkelijke levensduur	38
6.4	Schema beoordelingsmethode	38
7	Bepaling milieukosten	40
7.1	Milieueffecten en milieukosten	40
7.2	Berekening milieukosten van een gebouw met GreenCalc+	42
7.2.1	Materiaalgebruik	42
7.2.2	Conclusie	43
7.3	Model voor de berekening van de milieukosten.....	44
7.4	Uitwerking model	45
7.4.1	GreenCalc+	45
7.4.2	Berekening materiaalhoeveelheden draagconstructie.....	46
8	Bepaling ESL-factor.....	49
8.1	Onderdelen ESL-factor	49
8.1.1	Functiewisseling	49
8.1.2	Uitbreiding.....	50
8.2	Methode voor kwantificering factoren	51
8.3	Gemiddelde levensduur per gebruiksfunctie	51
8.4	Uitwerking verschillende aspecten	52
8.4.1	Architectuur.....	52
8.4.2	Draagconstructie	52
8.4.3	Sparingsflexibiliteit van de vloeren	53
8.4.4	Draagvermogen	54
8.4.5	Overmaat.....	55
8.4.6	Stramienmaten.....	57
8.4.7	Gevel.....	59
8.4.8	Installaties	59
8.4.9	Ontsluiting	61
8.4.10	Demontabel bouwen.....	62
8.5	Kalibreren factoren ter bepaling van de ESL-factor	63
8.5.1	Methode voor het kalibreren	63

8.5.2	Overzicht van het valideren en kalibreren van de ESL-berekening.....	64
9	De ontwerptool	66
9.1	Integratie van de ontwerptool	66
9.1.1	Beoordeling van de toetsingsmethodieken	66
9.1.2	Multi Criteria Analyse van de toetsingsmethodieken	67
9.1.3	Conclusie	67
9.2	Programma van eisen.....	68
9.3	Uitwerking van de ontwerptool	69
9.3.1	Invoer.....	69
9.3.2	Uitvoer.....	70
9.4	Conclusie over gebruik van de tool	72
10	Constructieve alternatieven	73
10.1	Campus Villa's Cascade Park te Almere	73
10.1.1	Architectuur.....	74
10.1.2	De kantoorvilla's.....	74
10.1.3	Opzet constructieve alternatieven.....	75
10.1.4	Uitwerking constructief ontwerp 1: Beton.....	76
10.1.5	Uitwerking constructief ontwerp 2: Beton en staal	77
10.1.6	Uitwerking constructief ontwerp 3: Hout	79
10.1.7	Uitwerking constructief ontwerp 4: Slimline.....	81
10.2	Vergelijking van de constructieve alternatieven op duurzaamheid.....	82
10.2.1	Vergelijking op basis van het materiaalgebruik in de constructie	82
10.2.2	Vergelijking op basis van de jaarlijkse milieukosten	84
11	Conclusies en aanbevelingen	87
11.1	Conclusies.....	87
11.1.1	De berekening van de ESL-factor	87
11.1.2	De bepaling van de milieukosten	88
11.1.3	De methode voor de beoordeling op duurzaamheid.....	88
11.1.4	Beoordeling constructieve ontwerpen.....	90
11.1.5	Bijdrage aan het 'Duurzaam construeren'	90
11.2	Aanbevelingen.....	92
	Bronvermelding.....	93

Bijlagen: Zie bijlagenrapport

1 Inleiding

‘Duurzaam Construeren’ is een onderwerp dat, met de toenemende mate van aandacht voor het milieu, steeds belangrijker wordt. De klimaatproblematiek en de uitputting van de grondstoffen hebben ertoe geleid dat op verschillende niveaus (overheid, maar ook marktpartijen) initiatieven worden genomen op het gebied van duurzaam bouwen. Hierbij valt te denken aan het stimuleren van het gebruik van duurzame technieken en materialen of het opstellen van doelstellingen met betrekking tot de CO₂-uitstoot, energiebesparing en duurzame energie. Een hieraan verwante ontwikkeling in de bouw is het streven naar het realiseren van duurzame gebouwen.

Duurzaam construeren moet leiden tot een duurzame constructie, maar wat is eigenlijk een duurzame constructie? In relatie met ‘constructie’ bestaan er voor de term ‘duurzaam’ twee betekenissen, in het Engels ‘durable’ en ‘sustainable’ genoemd. De mate waarin een materiaal, gebouwdeel of constructie een belasting kan weerstaan over een bepaalde tijd, zonder dat dit invloed heeft op het functioneren ervan, is de omschrijving voor ‘durable’. Met ‘sustainable’ wordt verwezen naar de algemene eigenschap van een materiaal, gebouwdeel of constructie, welke een indicatie geeft van de invloed op het milieu. In dit rapport wordt naar deze laatste omschrijving verwezen, wanneer er over ‘duurzaam’ en ‘duurzaamheid’ wordt gesproken. Bij een duurzame constructie heeft is de invloed ervan op het milieu dus geringer dan bij een standaard constructie.

Stel je een gebouw voor, geheel uitgevoerd in plastic. De meesten onder ons zullen meteen denken dat dit gebouw verre van duurzaam is. Maar stel je voor dat dit gebouw meer dan 300 jaar gebruikt zal worden, of misschien nog wel langer. Dan is het gebouw opeens wel duurzaam. Een ander realistischer voorbeeld is Vaticaanstad. De Sint-Pietersbasiliek is gebouwd in de 16^e eeuw en zal misschien nog wel vele eeuwen gebruikt worden. De jaarlijkse milieukosten van zo een gebouw zullen dus erg laag uitvallen, waardoor het bouwwerk zeer duurzaam is. Dichter bij huis kan gekeken worden naar bijvoorbeeld de Amsterdamse grachtenpanden, gebouwd in de 17^e eeuw. Deze panden zijn, mede door de flexibiliteit van de constructie, nog steeds in gebruik en zijn dus zeer duurzaam.

Voor het beoordelen van de duurzaamheid van gebouwen bestaan verschillende toetsingsmethodieken. De huidige toetsingsinstrumenten zijn niet in staat om een exacte beoordeling te geven over de duurzaamheid van constructieve ontwerpen, omdat de milieukostenberekening in de ontwerpfase is gebaseerd op referentiegebouwen. Vanuit constructief oogpunt is dan ook de behoefte ontstaan naar een ontwerptool waarmee constructieve ontwerpen onderling kunnen worden vergeleken op duurzaamheid.

In dit afstudeeronderzoek is een beoordelingsmethode voor de duurzaamheid van constructieve ontwerpen bepaald. De bovenstaande voorbeelden tonen aan dat de levensduur een grote invloed kan hebben op de duurzaamheid van een gebouw. De levensduur van een gebouw vormt dan ook een belangrijk aspect in de beoordelingsmethode. De ontwikkelde beoordelingsmethode is uitgewerkt tot een bruikbare ontwerptool.

Het beoordelen van de duurzaamheid van een constructief ontwerp is complex gebleken. Daarnaast is het, gezien de huidige aandacht voor het milieu, een maatschappelijk zeer relevant onderwerp. Samen vormen deze ‘ingrediënten’ de basis voor een uiterst interessant onderwerp.



2 Onderzoeksopzet

In dit hoofdstuk zal de aanleiding voor dit afstudeeronderzoek kort worden beschreven. Dit leidt tot een doelstelling voor dit afstudeerwerk. Vervolgens wordt de opzet van het onderzoek beschreven.

2.1 Probleemstelling

Momenteel wordt de vergelijking tussen de verschillende constructieve alternatieven alleen gebaseerd op integratie in bouwkundig en installatieontwerp, benodigde constructiehoogte, bouwkosten en bouwtijd. Duurzaamheid wordt hierbij veelal buiten beschouwing gelaten. Echter, draagconstructies kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan de duurzaamheid van gebouwen. De draagconstructie heeft immers een doorslaggevende invloed op de hoeveelheid grondstoffen die bij een gebouw per eenheid van vloeroppervlak en tijd zijn gemoeid. Door goede keuzes te maken in het constructief ontwerp kan men materiaal besparen, de levensduur van de constructie verlengen en de milieu-impact verminderen.

Bij het uitdragen van de visie van het Duurzaam Construeren is het belangrijk dat men kan aantonen wat de mate van duurzaamheid is van de verschillende constructieve alternatieven. De huidige berekenmethodeken voor het berekenen van duurzaamheid van gebouwen, zoals GreenCalc+, GPR en BREEAM-NL, zijn erg uitgebreid en niet geschikt om op een eenvoudige manier de duurzaamheid van verschillende constructieve alternatieven te beoordelen.

Hier ligt de uitdaging en het onderwerp van dit afstudeeronderzoek: het ontwerpen van een tool, welke op eenvoudige en doeltreffende wijze een beoordeling kan maken over de duurzaamheid van een constructief ontwerp.

2.2 Doelstellingen

Hoofddoelstelling

- Het ontwikkelen van een ontwerptool, waarmee de duurzaamheid van een constructief ontwerp kan worden beoordeeld.

Subdoelstellingen

- Het maken van enkele alternatieve constructief ontwerpen van een interessant gebouw.
- Het toetsen van de constructieve ontwerpen op duurzaamheid, aan de hand van de ontworpen tool.

2.3 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

- Op welke wijze kunnen constructieve alternatieven op duurzaamheid worden beoordeeld en vergeleken?

Subvragen

- Wat wordt bedoeld met duurzaamheid en duurzaam bouwen?
- Hoe werken de bestaande toetsingsinstrumenten en wat zijn de achtergronden van deze methoden?
- Wat is de positie van te ontwikkelen tool t.o.v. de bestaande tools en is het mogelijk om een samenwerking aan te gaan met een bestaande berekenmethode?
- Wat is de relatie tussen duurzaamheid en draagconstructies?

2.4 Onderzoeksopzet

Het afstudeeronderzoek bestaat uit de volgende vijf onderdelen:

1. Literatuuronderzoek
2. Vervolgonderzoek
3. De ontwikkeling van de ontwerptool
4. Het ontwerpen van constructieve alternatieven
5. Beoordelen van de constructieve alternatieven en de ontwerptool

Literatuuronderzoek

In het literatuuronderzoek zijn de hierboven opgestelde subvragen beantwoord. De geschiedenis van “duurzaam bouwen” is beschreven. Vervolgens is er gekeken naar de Nederlandse bouwpraktijk en naar de instrumenten die gebouwen beoordelen op duurzaamheid. Zowel de werking als de achtergronden van de methoden (GreenCalc+, GPR Gebouw, BREEAM-NL) zijn behandeld. Tot slot is er gekeken naar de relatie tussen duurzaamheid en draagconstructies. Hierbij is het van belang om de termen ‘duurzaamheid’ en ‘duurzaam bouwen’ goed te definiëren.

Vervolgonderzoek

Aan de hand van het literatuuronderzoek is de noodzakelijke kennis opgedaan voor het verdere onderzoek. Uit het literatuuronderzoek komt naar voren dat voor de beoordeling en vergelijking van constructieve alternatieven de jaarlijkse milieukosten belangrijk zijn. Het berekenen van de jaarlijkse milieukosten vereist kennis over de totale milieukosten van de constructie en de levensduur van het beschouwde gebouw. In het vervolgonderzoek is naar deze onderdelen verder onderzoek gedaan.

Het vervolgonderzoek bestaat dus uit de volgende twee onderdelen:

- Een studie naar de berekening van de milieukosten van een gebouw, op basis van een constructief ontwerp.
- Een studie naar de bepaling van de Estimated Service Life- , ofwel ESL-factor voor een constructief ontwerp.

Ontwikkeling van de ontwerptool

Gelijktijdig met het vervolgonderzoek is begonnen met de ontwikkeling van de ontwerptool, waarin alle kennis is gebundeld en uitgewerkt in een bruikbare ontwerptool. Het programma is geschreven in de JAVA programmeertaal.

Ontwerpen van constructieve alternatieven

Als onderdeel van het afstudeeronderzoek zijn een aantal constructieve ontwerpen gemaakt voor een project van IMd Raadgevende Ingenieurs. Dit project, ‘Campus Villa’s Cascade Park te Almere’, omvat enkele kantoorvilla’s waarvan in het ontwerp de nadruk ligt op duurzaamheid.

Beoordelen van de constructieve alternatieven en de ontwerptool

Als laatste onderdeel van het rapport zullen de verschillende constructieve ontwerpen met elkaar worden vergeleken op duurzaamheid. Vervolgens zijn conclusies getrokken over de ontwerpen, de berekenmethode en de ontwerptool.

3 Duurzame ontwikkeling en duurzaam bouwen

3.1 Geschiedenis

De oorsprong van de milieuproblemen is te vinden in de industriële revolutie van de 19e eeuw. Sinds deze revolutie is er tot op de dag van vandaag een continue grote en groeiende belasting op het milieu gaande. De hiermee gepaard gaande milieuproblemen, het opraken van grondstoffen, aantasting van ecosystemen en de aantasting van de menselijke gezondheid, creëerden draagvlak voor beleid en ideeën om energie te besparen. Gedurende de tweede helft van de 20e eeuw hebben een aantal belangrijke ontwikkelingen en gebeurtenissen geleid tot internationale aandacht voor de enorme groei van de milieu-impact. Met deze aandacht verbreedde het denken zich naar duurzame ontwikkeling.

In 1987 werd het rapport 'Our Common Future'(2) uitgebracht door de Wereld Commissie voor Milieu en Ontwikkeling, beter bekend als het Brundtland-rapport. In dit rapport werd een duidelijke verbinding gelegd tussen economische groei, milieuvraagstukken en armoede- en ontwikkelingsproblematiek. Er wordt gesteld dat armoede een belemmering vormt voor duurzaam gebruik van de natuurlijke omgeving en dat integratie van natuurbehoud en economische ontwikkeling nodig is voor duurzame ontwikkeling. De definitie van deze duurzame ontwikkeling die in het rapport is gebruikt, is de volgende: 'duurzame ontwikkeling is de ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen'. In 1990 werd een formule geïntroduceerd door Ehrlich en Ehrlich, die het mogelijk maakt de in het Brundtland-rapport beschreven verbanden te kwantificeren. De formule stelt dat de milieudruk (EP) het product is van de bevolkingsomvang (P), de gemiddelde welvaart per persoon (W) en de milieubelasting per eenheid van welvaart (E). Bij het streven naar halvering van de milieudruk in 2040 ten opzichte van 1990 en de veronderstelling dat de bevolking in die tijd verdubbelt en de welvaart vijf keer zo groot wordt, betekent dit dat de milieuefficiëntie met een factor 20 omhoog moet¹. Dit houdt in dat de milieubelasting met 95% gereduceerd dient te worden. De factor 20 wordt vaak gebruikt als metafoor voor de hoge milieuambities en als richtlijn(3).

In 1992 werd er in Rio de Janeiro het Klimaatverdrag afgesloten en ondertekend, onder verantwoordelijkheid van de Verenigde Naties. Het doel van dit verdrag was om de emissies van broeikasgassen te reduceren en daarmee de ongewenste gevolgen van de klimaatverandering te voorkomen. Binnen het kader van het Klimaatverdrag is in 1997 het Kyoto Protocol overeengekomen. Hierin is afgesproken om de uitstoot van broeikasgassen in 2008 – 2012 met gemiddeld 5,2 % te verminderen ten opzichte van het niveau in 1990. In 2005 is het Kyoto Protocol officieel in werking getreden(4).

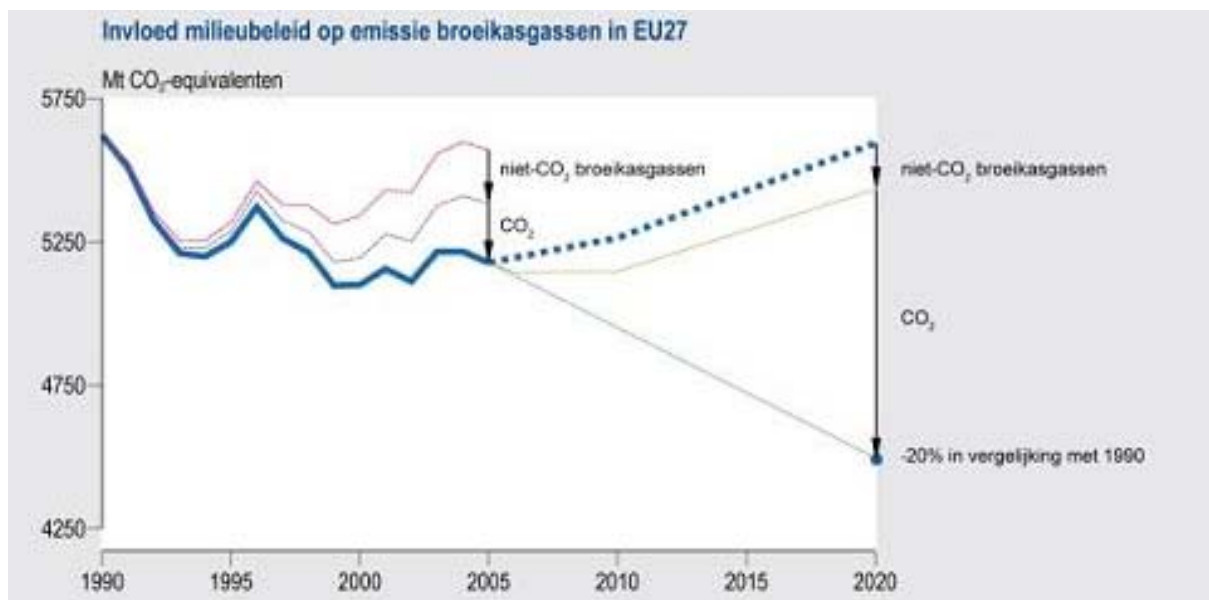
3.2 Huidige stand van zaken

Tegenwoordig staat 'duurzame ontwikkeling' nog steeds sterk in de belangstelling. Een voorbeeld en oorzaak daarvan is de film 'An Inconvenient Truth' van Al Gore. In deze film wordt gesproken over het broeikaseffect en de gevolgen ervan voor de mens in de komende vijftig jaar. Het opwarmen van de aarde en de daarmee gepaard gaande zeespiegelstijging zijn hier een voorbeeld van. Hoewel er wetenschappelijk geen overeenstemming is over de invloed van de mens op de klimaatverandering, heeft de documentaire flink bijgedragen aan het klimaatbewustzijn in de wereld. De media-aandacht voor de klimaatop in Kopenhagen in 2009 benadrukt wederom de mate van aandacht voor het milieu. Men is ervan bewust geraakt dat de milieuproblematiek alleen door middel van mondiaal beleid kan worden aangepakt. Het is echter geen eenvoudige opgave om mondiale overeenstemming te krijgen over het te voeren milieubeleid. In Kopenhagen kwam men dan ook met

¹ Formule van Ehrlich en Ehrlich: $EP = P \times W \times E$. Ingevuld geeft dit: $\frac{1}{2} = 2 \times 5 \times \frac{1}{20}$. Dit betekent dat de milieubelasting per eenheid van welvaart met een factor 20 moet afnemen.

moeite tot een nieuw verdrag. Voor de klimaatop in Kopenhagen waren de verwachtingen hooggespannen. De top was immers de laatste van een serie bijeenkomsten sinds Kyoto en diende een nieuw klimaatverdrag op te leveren dat het Kyoto-protocol vervangt. Omdat geen van de oorspronkelijke doelstellingen behaald werden, wordt het nieuwe verdrag door velen gezien als een gemiste kans. Er is slechts een gedeeltelijk akkoord bereikt, dat geen concrete doelen vooropstelt. Wel staan er afspraken in over 100 miljard dollar klimaatsteun aan de ontwikkelingslanden tegen 2020 en de mechanismen om dat te financieren. Ook de doelstelling om de temperatuurstijging binnen de twee gradengrens² te houden, staat in het akkoord.

De landen van de Europese Unie hebben zichzelf een voortrekkersrol gegeven in het milieubeleid, door de huidige klimaatdoelstelling (Kyoto) te vernieuwen. De doelstelling is gesteld om de uitstoot van broeikasgassen in 2020 met 20% te verminderen ten opzichte van het niveau in 1990. In de onderstaande grafiek zijn de geschatte effecten te zien van het milieubeleid op de emissie van broeikasgassen in de Europese Unie. Dit beleid zal behoorlijk moeten worden aangescherpt om de nieuwe doelstelling te halen. Dit concludeerde het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP), nu onderdeel van het Planbureau voor de Leefomgeving, uit een studie naar het effect van het klimaatbeleid op de emissie van broeikasgassen. Volgens het rapport 'EU 2020 climate target: 20% reduction requires five-fold increase in impact of CO₂ policies' zal de impact van het beleid met een factor vijf moeten toenemen, zie Figuur 3.1.



Figuur 3.1: Ex-post geschatte effecten van het milieubeleid op de uitstoot van broeikasgassen (GHG's) in de EU-27 in de periode van 1990-2005. Vanaf 2005 de ex-ante-beleids-effectramingen.⁽⁵⁾

² De EU is ervan overtuigd dat de opwarming van de aarde maximaal 2°C boven het pre-industriële niveau mag uitkomen, aangezien er overtuigend wetenschappelijk bewijs bestaat dat het risico van onomkeerbare en mogelijk catastrofale veranderingen in het milieu veel groter wordt wanneer dit maximum wordt overschreden (30).

3.3 Nederland

Als er naar de totale Nederlandse milieubelasting wordt gekeken, is te zien dat bouwactiviteiten verantwoordelijk zijn voor een fors gedeelte ervan. Vooral het grondstoffen- en het energieverbruik in gebouwen zorgen hiervoor. Maar liefst 33% van het totaal dragen de bouwactiviteiten bij aan het broeikaseffect. Ook op andere milieuproblemen is de invloed van de bouw aanzienlijk.

In de onderstaande tabel is te zien wat de bijdrage van de bouw aan het totaal van de milieubelasting per milieuprobleem is.

Milieuprobleem	Bijdrage aan het totaal vanuit de bouw
Aantasting van de ozonlaag	25%
Broeikaseffect	33%
Verzuring	10%
Vermesting	16%
Verspreiding van milieugevaarlijke stoffen	9%
Afvalstoffen	40%
Aantasting van landschap door grondstofwinning	500 ha per jaar
Grondstofbehoefte	150 Mton per jaar

Tabel 3.1: Milieubelasting als gevolg van bouwen, wonen, werken en verplaatsen(6)

3.3.1 Duurzaam bouwen

In de jaren negentig van de vorige eeuw werd in het eerste Nationaal Milieubeleidsplan het begrip 'duurzaam bouwen' geïntroduceerd. Duurzaam bouwen is afgeleid van duurzame ontwikkeling, een ontwikkeling die een combinatie moet zijn van 'People, Planet en Prosperity', van sociale, milieu en economische kwaliteit. Met 'duurzaam bouwen' wordt het volgende bedoeld: 'duurzaam bouwen is erop gericht de gezondheids- en milieueffecten als gevolg van het bouwen, de gebouwen en de bebouwde omgeving te reduceren' (MVRM 1993).

Gezien de grote invloed van de bouwactiviteiten op de milieueffecten en de bijhorende gestelde milieudoelstellingen, is de bouwsector een belangrijke doelgroep in het milieubeleid geworden. Het uitvoeren van het milieubeleid door de bouwsector brengt een aantal problemen met zich mee. Zo is er een gebrek aan structurele samenwerking tussen de betrokken instanties en bedrijven in de bouw. Verder is er een beperkte beschikbaarheid van informatie over milieuvriendelijke materialen en bouwwijzen en over de kosten en baten daarvan. Tot slot zijn er onzekerheden betreffende de marktwerking en de regelgeving.(6)

Duurzaam bouwen vereist een vermindering van de toepassing van primaire eindige grondstoffen. Dit kan door vervanging met vernieuwbare grondstoffen en voor het milieu verantwoorde toepassing van secundaire grondstoffen. Hiervoor is de toename van hergebruik van afval in belangrijke mate bepalend. Daarnaast zal de bouw het energieverbruik moeten verminderen.

Het overheidsbeleid ten aanzien van het duurzame bouwen is kort samengevat het volgende(6):

Materiaalgebruik, integraal ketenbeheer

- Zoveel mogelijk sluiten van kringlopen bij het gebruik van grondstoffen in de bouw.
- Voorkomen van restafvalstromen en bevorderen van hergebruik van bouw- en sloopafval.
- Verminderen van restemissies naar het milieu bij de productie van bouwmaterialen bij het productieproces bouwen.

Energie-extensivering

- Besparing op ruimteverwarming van gebouwen.
- Verhoging van het aandeel van duurzame energie en inzet van alternatieve energiebronnen.
- Verlaging van de energie-inhoud van gebouwen.
- Verlaging van het energieverbruik als gevolg van locatiekeuze.

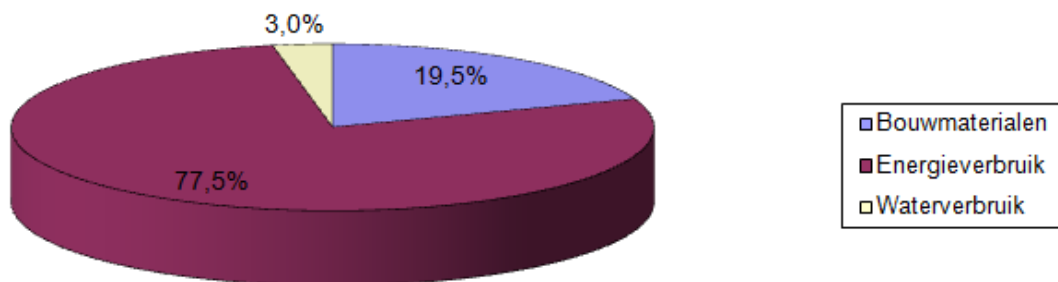
Kwaliteitsbevordering

- Milieuzorg in de bouw.
- Kwaliteitsverhoging van de gebouwde omgeving, gebouwen en bouwmaterialen.

3.3.2 Materiaalgebruik

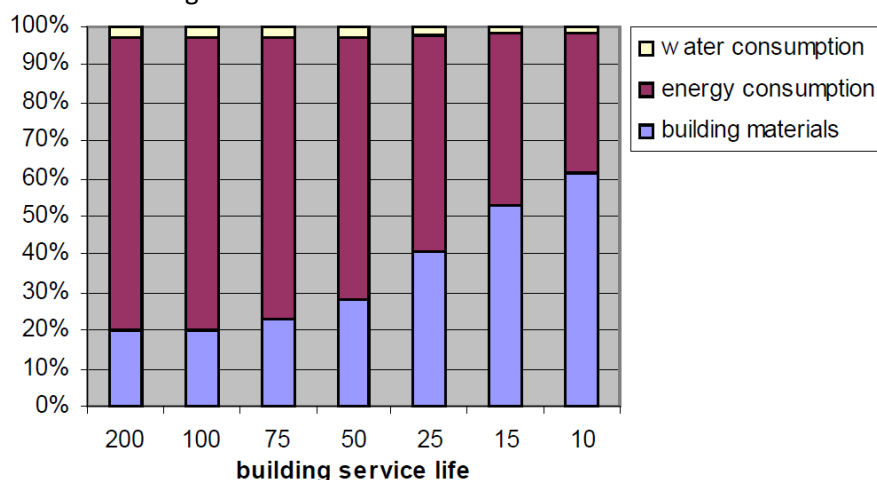
Van alle materiaalstromen wordt geschat dat ongeveer de helft direct of indirect met de bouw te maken hebben (Haas, 1997). Verder heeft ongeveer een derde van alle milieueffecten een relatie met de bouwsector. In Nederland wordt per jaar ongeveer 130 miljoen ton bouw materiaal in omloop gebracht, terwijl er jaarlijks zo'n 16 miljoen ton bouw- en sloopafval vrijkomt (Hendriks & Janssen, 2004). Dat is ruim een kwart van al het vrijkomende afval.

De verdeling van de milieukosten van een kantoor gebouw met een levensduur van 75 jaar ziet er ongeveer als volgt uit:



Figuur 3.2: Verdeling van de milieukosten van twaalf kantoren, naar het gebruik van bouwmaterialen en verbruik van energie en water, uitgaande van een levensduur van 75 jaar (1)(7)

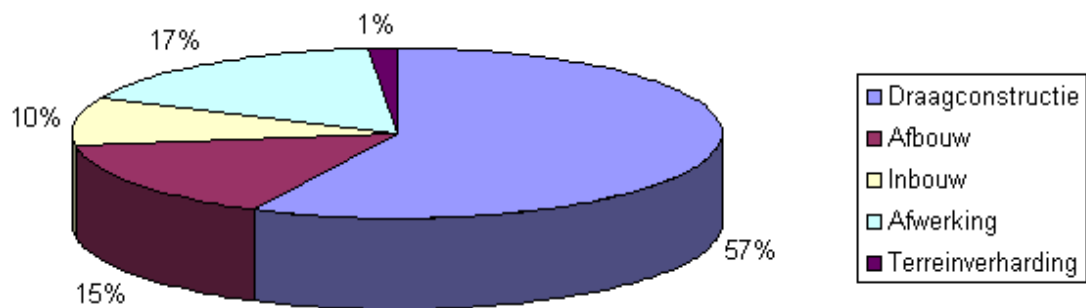
Dit blijkt uit een onderzoek (1) waarbij er gekeken is naar de verdeling van de milieukosten van een kantoor. Hiervoor zijn twaalf kantoren onder het licht gehouden. Het blijkt dat bij een levensduur van 75 jaar geldt dat bijna 80% van de totale milieubelasting wordt bepaald door het energieverbruik tijdens de levensduur. Hieruit kan men concluderen dat het energieverbruik voor de milieubelasting veel belangrijker is dan het materiaalgebruik. Echter is er sprake van een vertekend beeld. De verwachte levensduur van de kantoren was voor de berekening gesteld op 75 jaar. Voor kantoren geldt dat deze levensduur zelden wordt gehaald. Wanneer de levensduur afneemt, neemt daarmee tevens het energieverbruik af. Het materiaalgebruik blijft echter gelijk, aangezien de initiële materiaalinvesteringen onafhankelijk zijn van de levensduur. Bij een levensduur van ongeveer twintig jaar hebben het energie- en materiaalverbruik een even groot aandeel in de milieukosten, zie onderstaande figuur.



Figuur 3.3: Bijdrage van het water- en energieverbruik en het materiaalgebruik aan de milieukosten bij verschillende levensduursscenario's(1)

Aangezien de gebruiksduur van kantoren op dit moment ongeveer gelijk is aan twintig jaar, is de invloed van de materialen dus veel hoger dan in de Figuur 3.2 wordt aangegeven. Nog een belangrijke factor die invloed heeft op de verhouding van de milieukosten, is het feit dat de milieubelasting van het energieverbruik in de toekomst kleiner zal worden door het gebruik van duurzame energiebronnen. Er kan dus geconcludeerd worden dat het materiaalgebruik wel degelijk een belangrijke rol speelt in de milieukosten van een kantoorgebouw en dat deze rol alleen maar zal groeien.

Aangezien het materiaalgebruik een grote invloed heeft op de milieukosten, dient er verder te worden gekeken naar de invloed van de specifieke onderdelen. Het blijkt dat de draagconstructie, vrijwel onafhankelijk van de levensduur van een gebouw, de grootste invloed heeft op het materiaalgebruik. Bijna 60 % van het totale materiaalgebruik kan worden toegeschreven aan de draagconstructie, zie onderstaande figuur. Wanneer men dus goede resultaten wil behalen bij het verminderen van de milieubelasting van een gebouw, dan zal er dus vooral naar de draagconstructie moeten worden gekeken.(7)



Figuur 3.4: Verdeling van de milieukosten binnen het materiaalgebruik (1)

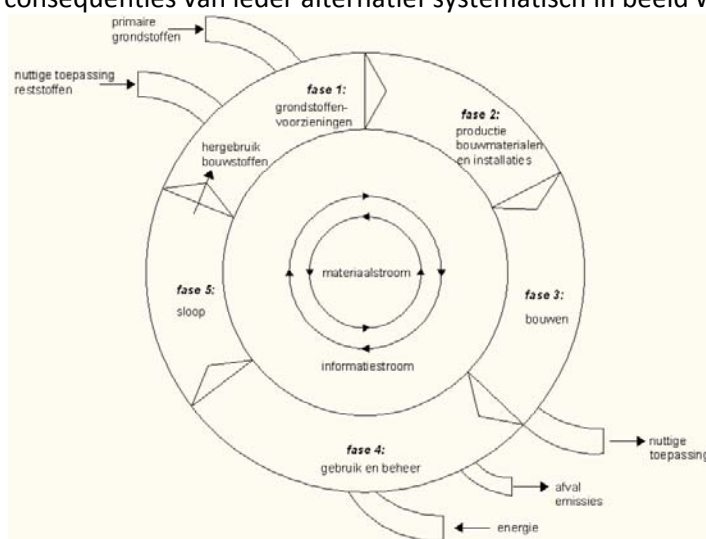
4 Beoordeling milieuprestatie

Het afstudeeronderzoek richt zich op het beoordelen van constructies van gebouwen op duurzaamheid. Voor de beoordeling van de milieuprestaties van gebouwen zijn verschillende methoden en instrumenten beschikbaar. Om een goed inzicht te verkrijgen over hun werking, is het belangrijk de achtergrond ervan te kennen. Aan de basis van deze methoden en instrumenten ligt de levenscyclusanalyse (LCA). Met de LCA wordt de gehele levenscyclus van een grondstof, materiaal of product, doorgenomen en alle optredende milieueffecten in kaart gebracht. Daarnaast zijn er ook methoden ontwikkeld om de milieukosten van een product door de gehele levenscyclus te bepalen. Het resultaat van de beoordeling kan per toetsingsmethode verschillen. De resultaten kunnen kwantitatief (milieukosten, score) en kwalitatief (geclassificeerd milieuprofiel, keurmerk) zijn. In de huidige Nederlandse bouwpraktijk worden hoofdzakelijk de volgende toetsingsmethodieken gebruikt: GPR Gebouw, GreenCalc+ en BREEAM-NL. Deze methoden, inclusief het toetsingsinstrument Eco Quantum³ zullen hieronder inzichtelijk worden gemaakt, nadat eerst de levenscyclusanalyse en het berekenen van milieukosten is behandeld.

4.1 Levenscyclusanalyse

Gedurende de verschillende fasen in de bouw, wordt er ingegrepen op het milieu en de gebouwde omgeving. De effecten hiervan kunnen zich ontwikkelen op vijf schalen: op mondiaal, continentaal, fluviaal, regionaal en stedelijk niveau. In de bouwcyclus zijn alle fasen van de bouw opgenomen, zie Figuur 4.1. Voor het in kaart brengen van de milieueffecten is het noodzakelijk dat al deze fasen van de bouwcyclus worden behandeld, van de wieg tot het graf. De levenscyclusanalyse, ontwikkeld door het Centrum Milieukunde Leiden (CML) volgens de ISO-norm, is hier bij uitstek voor geschikt. De essentie van de methode is dat niet producten worden beschreven en vergeleken, maar juist productfuncties.

De uitkomst van een LCA-studie is een milieuprofiel: een 'scorelijst' met milieueffecten. Aan het milieuprofiel is te zien welke milieueffecten de belangrijkste rol spelen in de levenscyclus. Die effecten kunnen dan met voorrang worden aangepakt. Ook kan van tevoren worden berekend of een maatregel effectief zal zijn. In combinatie met aanverwante instrumenten kan LCA een concreet beeld opleveren van de mogelijkheden voor aanpassingen van de bedrijfsvoering en kunnen de consequenties van ieder alternatief systematisch in beeld worden gebracht.



Figuur 4.1: De bouwcyclus(6)

³ Tegenwoordig wordt Eco-Quantum niet meer gebruikt. Als voorganger van het huidige GPR Gebouw is het behandelen van deze methode historisch gezien van belang.

Varianten op de LCA

Het TWIN-model (Haas, 1997) voegt kwalitatieve beoordelingen toe aan de berekende LCA-gegevens, daar waar de kwantitatieve data betreffende milieueffecten ontbreekt, en bepaalt middels weging milieubelastingpunten voor materialen of producten. Deze kwalitatieve beoordeling is altijd op basis van gegevens uit de literatuur. Officiële milieumaten nemen aspecten, waarvan geen kwantitatieve gegevens beschikbaar zijn niet mee in de beoordeling. Daardoor kan er echter een grotere fout ontstaan in het eindoordeel dan wanneer een zorgvuldige inschatting van de ontbrekende gegevens wordt gemaakt. De nieuwste versie, TWIN²⁰⁰², is grotendeels gebaseerd op de CML-2-methodiek⁴ en werkt met milieukosten in plaats van puntenscores.

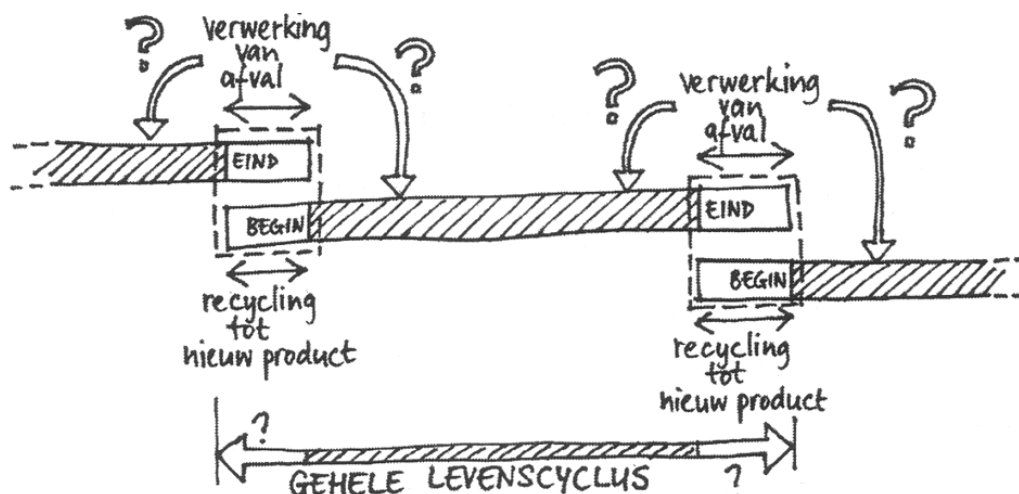
4.1.1 Stappen van de LCA

De LCA bestaat uit de volgende stappen(8)(6):

- Doelbepaling
- Inventarisatie per product
- Classificatie en beoordeling (milieuprofiel) per product
- Gevoeligheidsanalyse per product
- Vergelijken van diverse milieuprofielen onderling

Doelbepaling en inventarisatie per product

De eerste stap in de LCA is het bepalen van de toepassing ervan. Dit kan zijn: het vergelijken of toetsen van producten, verbetering en innovatie van producten en processen, besturing van beleidsstrategieën en marktwerking. Vervolgens dient de functionele eenheid te worden gekozen. De productfunctie moet worden gedefinieerd, evenals de eenheid waarin deze wordt uitgedrukt. Op basis hiervan kan vergelijking plaatsvinden, beter dan wanneer er vergeleken wordt op producten als zodanig. Na het vaststellen van een functionele eenheid worden producten geselecteerd die representatief zijn voor de door die eenheid vastgelegde productgroep. Deze producten worden tot in detail beschreven. De levenscyclus moet in kaart worden gebracht, wat resulteert in een procesboom. Hierin zijn de processen uit de cyclus en de in- en uitstromen van het proces vermeld. Belangrijk punt hierbij is dat altijd een grens moet worden getrokken tussen processen die wel en niet in beschouwing worden genomen (systeemgrens). Het toerekenen van milieueffecten aan een bepaald proces (allocatie) is daarbij een belangrijk discussiepunt. Dit allocatieprobleem is hieronder grafisch weergegeven.



Figuur 4.2: Grafische weergave van het allocatieprobleem(9)

⁴ De CML-2-methodiek is de nieuwe versie van de LCA-methode.

Classificatie en beoordeling per product

Het uitvoeren van een LCA resulteert vaak in een groot aantal gegevens. Deze gegevens dienen te worden gecondenseerd tot een hanteerbaar aantal kengetallen, waarbij de bruikbaarheid van de meeste doeleinden toeneemt naarmate het aantal kengetallen kleiner wordt. Aggregatie en weging zijn hiervoor geschikte methoden. Per potentieel milieueffect worden de milieu-ingrepen uit de verschillende fasen van de levenscyclus van een product samengevoegd tot één getal dat het potentiële milieueffect representeert. Het milieuprofiel, de bundeling van potentiële milieueffecten, wordt verkregen door aggregatie. Het belang van de verschillende milieueffecten ten opzichte van elkaar kan worden afgewogen. Dit leidt tot een beperkte groep van getallen, die representatief zijn voor de milieubelasting van een product.

Het kwantificeren van de milieu-ingrepen is mogelijk door voor elk proces een lijst op te stellen van deze ingrepen, de ingreep tabel. Alle processen samen leveren de ingreep tabel van het product. De milieu-ingrepen als gevolg van de processen, worden toegekend aan de fase in de levenscyclus waarin ze voorkomen. Niet-kwantificeerbare informatie, zoals kwalitatieve aspecten als 'hinder' worden in de CML-methode apart vermeld. In elke fase van de levenscyclus treden milieubelastingen op. Deze kunnen worden beoordeeld op hun reële of op hun potentiële effect. Door een ingreep te beoordelen op een potentieel milieueffect wordt een gebiedsonafhankelijk milieuprofiel verkregen. Een groot aantal milieuaspecten kan worden beoordeeld. De hoofdaspecten zijn: grondstoffen, emissies, afval, energie, levensduur, repareerbaarheid, hergebruik en hinder. Deze aspecten sluiten aan bij de eerder genoemde hoofdpunten van het overheidsbeleid ten aanzien van het duurzaam bouwen, namelijk ketenbeheer, energie-extensivering en kwaliteitsbevordering. Omdat deze aspecten niet onafhankelijk zijn, stelt de CML slechts drie milieuaspecten voor: uitputting van grondstoffen, verontreiniging en aantasting.

Gevoeligheidsanalyse per product

Een gevoeligheidsanalyse kan een goed instrument zijn om de meest relevante milieubelastende factoren vast te stellen en aan de hand daarvan te komen tot maatregelen om de milieubelasting te verminderen en innovatie te bewerkstelligen.

Vergelijken van de diverse milieuprofielen onderling

Bij een vergelijkende evaluatie worden de milieuprofielen van meerdere producteenheden naast elkaar gelegd. Gelijksortige milieuaspecten, zoals luchtverontreiniging en afvalvolume, kunnen worden vergeleken. Het wegen van ongelijksortige aspecten kan op dit moment alleen subjectief. Afhankelijk van het doel van de LCA is het niet altijd noodzakelijk om tot een eenduidig oordeel te komen over de productalternatieven. Dit is het geval wanneer men knelpunten probeert te achterhalen. In geval van een productvergelijking dient er wel een eenduidig oordeel te komen. Hierbij is het van belang dat bekend is of de verschillen in de waarden wel of niet significant zijn.

4.1.2 Opmerkingen

De gestandaardiseerde LCA-methodiek vormt de beste basis voor een milieubeoordeling, maar er zijn ook bezwaren aan de methode verbonden. Onzekerheden over de milieubelastendheid van bepaalde ingrepen, de plaatselijkheid van bepaalde effecten, de gehanteerde beoordelingsmethoden en het meenemen van het levensduureinde zijn de wetenschappelijk-inhoudelijke bezwaren betreffende de milieubeoordeling. Methodisch is het belangrijkste bezwaar dat voor een aantal onderdelen nog geen gestandaardiseerde beoordelingsmethode bestaat, waardoor ze nog niet worden meegenomen in de LCA. Dit geldt voor belangrijke milieueffecten als aantasting van ecosystemen en gezondheidsaspecten.

4.2 Milieukosten

Milieukosten zijn, algemeen gezien, de kosten die de samenleving moet betalen om schade aan het milieu te voorkomen en te herstellen. Deze kosten zijn niet berekend in de prijs van producten: uiteindelijk worden de milieukosten verhaald op de samenleving door middel van belasting en accijnzen. Het ministerie van VROM maakt onderscheid in milieukosten en verborgen milieukosten. De milieukosten worden volgens het VROM betaald door de industrie, door het voorkomen van schade aan het milieu of door zich te houden aan het overheidsbeleid. Deze kosten zijn verrekend in de prijs van goederen. De verborgen milieukosten zijn in feite de milieukosten die hieronder worden beschreven. Er zijn twee typen verborgen milieukosten:

Schaduw prijzen weerspiegelen de prijs die samenleving bereid is te betalen voor het bereiken van een milieudoelstelling.

Preventiekosten zijn de kosten die gerelateerd zijn aan het voorkomen van milieuschade door bepaalde milieu-ingrepen (bijv. emissies). De preventiekosten voor duurzaamheid zijn kosten van preventieve maatregelen die benodigd zijn om schade aan het milieu op een duurzaam niveau te behouden. Het zijn de (theoretische) kosten van maatregelen die nog moeten worden uitgevoerd. In de meeste modellen zijn de milieukosten in feite theoretisch. (1)

Wanneer men de milieukosten van een product door de gehele levenscyclus wil bepalen, dient er gekeken te worden naar de directe en de indirecte kosten. Voor het bepalen van de directe kosten zijn slechts enkele methoden beschikbaar, omdat de berekening ervan relatief eenvoudig is. De bekendste hiervan is de Life Cycle Costing (LCC) methode.

4.2.1 Life Cycle Costing

De levenscyclusanalyse is erop gericht om de milieu-ingrepen en -effecten die voortkomen uit de totale levenscyclus van een product in kaart te brengen, om vervolgens tot opties voor verbetering van de milieumaat te komen. Life Cycle Costing (LCC) biedt in principe hetzelfde, alleen is deze methode erop gericht om de totale kosten (en eventueel de baten) door de totale levenscyclus van een product te bepalen. Het doel ervan is om de milieukosten te minimaliseren, ofwel de besparingen te maximaliseren. Een LCC-studie kan voor drie doeleinden worden gebruikt: het bepalen van de nulsituatie, vergelijken van producten en het voorspellen van de kosten van een nieuw product.

Om tot een kostenprofiel te komen, moeten alle kosten uit de levenscyclus worden teruggerekend naar één tijdstip. Hierbij dient men rekening te houden met rente en inflatie. Met de 'Discounted Cash Flow'-techniek worden toekomstige kosten teruggerekend naar de huidige waarde: de contante waarde. Daarnaast kan er ook een Netto-Contante Waarde (NCW) worden berekend, door het oorspronkelijk geïnvesteerde bedrag van de 'contante waarde' af te trekken. Met de NCW kan de haalbaarheid van een investering worden bepaald.

4.2.2 Directe en indirecte milieukosten

Het berekenen van zowel de directe als de indirecte kosten wordt ook wel volledig kostenbeheer (full-cost accounting) genoemd. De indirecte kosten kunnen op verschillende manieren worden bepaald. Dit kan vanuit de behoefte om milieuproblemen daadwerkelijk te voorkomen of ongedaan te maken, maar bijvoorbeeld ook vanuit de vraagstelling wat de gemeenschap ervoor over zou hebben om een milieuprobleem te laten verdwijnen. Het nut van het volledig kostenbeheer is dat het mogelijk maakt om alternatieven met elkaar te vergelijken op de totale kosten over de gehele economische levensduur.

4.3 Berekenmethodieken

De ontwerpfase is de belangrijkste fase in het proces van idee tot de realisatie, het gebruik en de sloop van een gebouw. In de ontwerpfase worden keuzes gemaakt welke een grote invloed hebben op de economische, duurzame, functionele, technische en uiterlijke kwaliteit van het gebouw. Het is echter niet gemakkelijk om in de ontwerpfase, wanneer nog veel zaken onbekend zijn, een goede beoordeling per ontwerpvariant te geven over de duurzaamheid van een gebouw. Omdat de materie zo complex is, zijn er berekenmethodieken en programma's ontwikkeld, die het ontwerpproces vereenvoudigen. Deze zijn op basis van de in paragraaf 4.1 en 4.2 beschreven methoden ontwikkeld. Aan de hand van de berekenmethodieken is het mogelijk om effecten van bepaalde keuzes en de milieuprestatie van een gebouw of wijk te beoordelen.

Hoewel de basis van deze methoden overeenkomt, kunnen de hierna te behandelen toetsingsinstrumenten echter een verschillende uitkomst geven, doordat verschillende milieudata als invoer worden gebruikt voor het bepalen van de milieuscore van een gebouw. Op initiatief van de ontwikkelaars/eigenaren van deze instrumenten heeft een harmonisatie van de bepalingsmethoden plaatsgevonden en is de 'Bepalingsmethode materiaalgebonden milieuprestatie van gebouwen en gww-werken' geschreven (10). Deze methode is gereedgekomen in 2010. De ontwikkelaars van de instrumenten hebben afgesproken de methode uit deze handleiding te gebruiken als dé rekenmethode voor de bepaling van de milieueffecten van het materiaalgebruik binnen de bestaande instrumenten. De handleiding is gebaseerd op de NEN 8006:2004. De NEN 8006 betreft bouwmaterialen, bouwproducten en bouwelementen.

Naast de harmonisatie van de verschillende berekenmethodieken voor het bepalen van de milieueffecten van materiaalgebruik in gebouwen, is door marktpartijen gewerkt aan een geharmoniseerde database als normatieve input voor milieueffectberekeningen conform de bovengenoemde methode. Omwille van eenduidigheid in milieueffectberekening, zorgvuldigheid en efficiency is, op initiatief van de deelnemende partijen, gewerkt aan een nationale database, waarvan alle milieuprestatie-instrumenten straks gebruik zullen maken. Deze geharmoniseerde database wordt gesteund door VROM, Nederlands Verbond Toelevering Bouw (NVTB) en Stichting Milieu Relevante Product Informatie (MRPI). In deze nationale database staat de milieudata van basisprocessen en bouwcomponenten. De basis voor de opbouw van de database is de SimaPro-database. De database levert geharmoniseerde input voor de milieueffectberekening binnen de milieuprestatie-instrumenten: GreenCalc+, GPR Gebouw en BREEAM-NL.(11)

Voor dit onderzoek wordt dieper ingegaan op een aantal toetsingsmethoden welke in de huidige bouwpraktijk regelmatig worden of zijn toegepast. Er zal vooral gekeken worden naar de werking van methoden, de benodigde invoer en de resulterende uitvoer. Uit het voorgaande hoofdstuk is gebleken dat de draagconstructie een grote bijdrage kan hebben in een duurzaam ontwerp. Voor de verschillende methoden wordt gekeken hoe dit aspect wordt meegenomen in de beoordeling van de milieuprestatie.

4.3.1 GreenCalc+

De 'GreenCalc-methode' is bestemd voor ontwerpers en richt zich op het gebouw- en stadsniveau. De methode is gebaseerd op de scheiding van geldstromen van bedrijfseconomische en milieueconomische aard. Bij (bouw)projecten wordt dan ook gebruik gemaakt van twee boekhoudmodellen. In het bedrijfseconomische model worden bijvoorbeeld aannamen gedaan met betrekking tot renteontwikkeling, levensduur van een gebouw en het leegstandspercentage. In het milieuboekhoudmodel betreffen deze aannamen onder andere de milieuambities van het bedrijf in de vorm van streefwaarden. Met behulp van GreenCalc kan een gebouwontwerp integraal worden beoordeeld op de aspecten materialen, energie, water en mobiliteit.

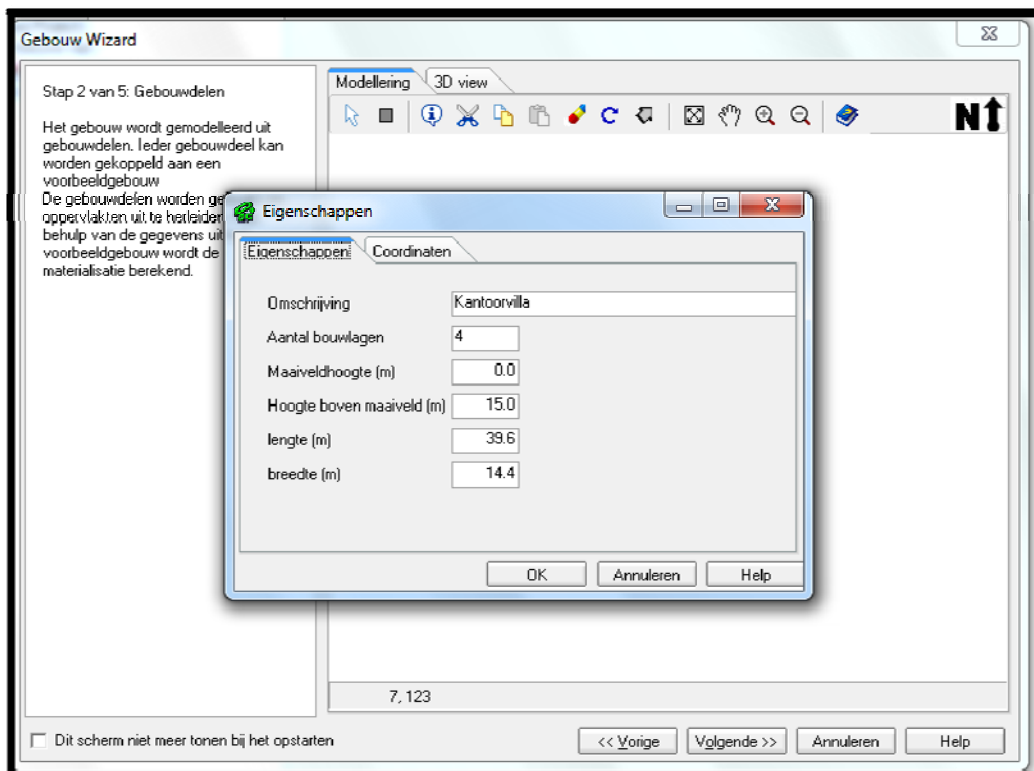
GreenCalc+ is de opvolger van het in 1997 geïntroduceerde programma GreenCalc. Het programma heeft een grondige herziening ondergaan. Zo is het nu mogelijk om niet alleen kantoorgebouwen, maar ook woningen, scholen, gezondheidscentra, winkels en zelfs hele wijken te beschouwen.

De kosten voor een beoordeling met GreenCalc+ zijn: € 3.000 – 6.000.(12)

4.3.1.1 Werking

Binnen GreenCalc+ is het mogelijk om een project aan te maken. Hierin is het mogelijk om verschillende gebouwontwerpen in te voeren en deze met elkaar te vergelijken. Bestaande gebouwontwerpen kunnen binnen een project worden gedupliceerd, om op eenvoudige wijze een aangepast ontwerp in te kunnen voeren. In een ontwerp worden de basisgegevens van een gebouw, zoals bruto vloeroppervlakte, gebruiksoppervlakte, oriëntatie en oppervlakte van gevels, aantal werknemers en dergelijke, vastgelegd met behulp van de 'Gebouw Wizard' (Figuur 4.3 en Figuur 4.5).

Binnen een gebouwontwerp kunnen één of meer scenario's worden aangemaakt, waarin de milieubelasting van een gebouwontwerp wordt uitgewerkt. Zo kan de invloed van materiaalkeuzes, installatietypen en dergelijke worden beoordeeld. Elk scenario bestaat uit de vier modules, betreffende materialen, energie, water en mobiliteit. Deze modules zullen hieronder worden behandeld. In GreenCalc+ worden de milieukosten op jaarbasis berekend.



Figuur 4.3: Invoerblad van de 'Gebouw Wizard' in GreenCalc+

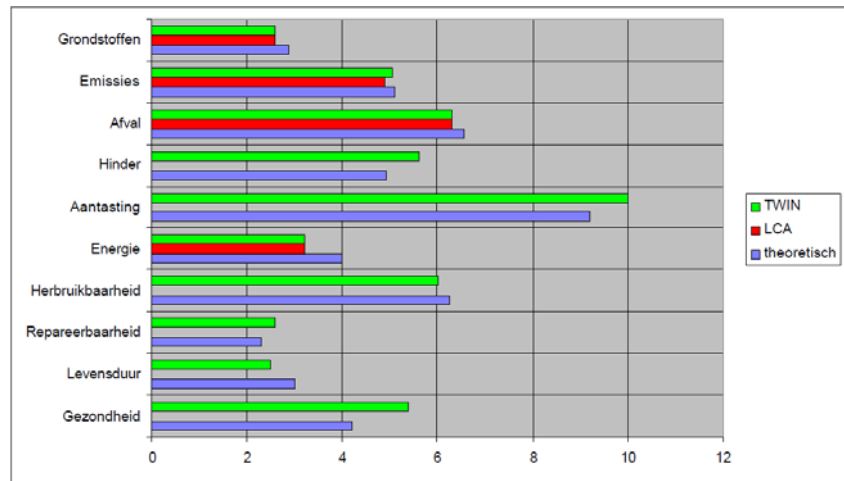
4.3.1.2 Invoer

Materialenmodule

De materialenmodule is gebaseerd op het TWIN²⁰⁰²-model. Hierin worden naast kwantitatieve gegevens ook niet kwantificeerbare gegevens verwerkt om een volledige beoordeling van materialen mogelijk te maken. Grondstoffen, materialen en constructies worden beoordeeld op de volgende aspecten:

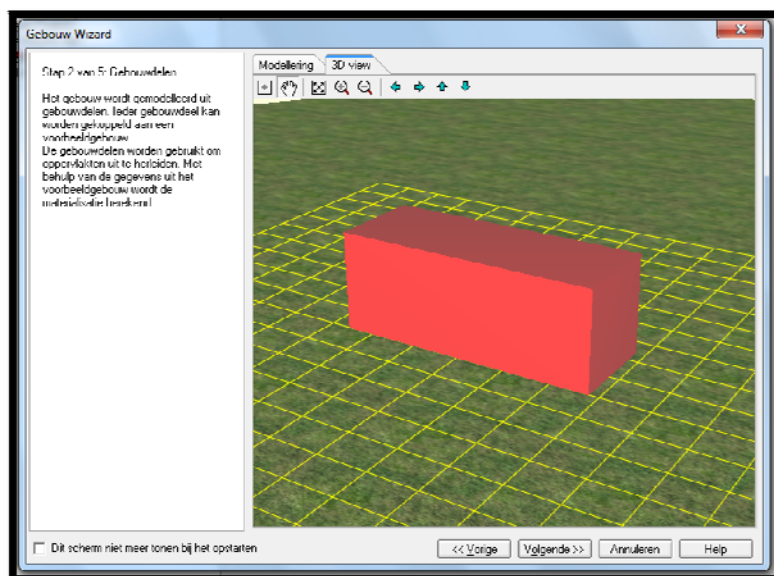
- Grondstoffen
- Verontreiniging
- Afval
- Hinder
- Aantasting
- Energieverbruik
- Herbruikbaarheid
- Repareerbaarheid
- Levensduur
- Gezondheid

**Figuur 4.4: Vergelijking milieumaten
LCA en TWIN beoordeling met
“theoretisch” milieuprofiel (13)**



In Figuur 4.4 is te zien dat het TWIN-model een goede aanvulling is op de LCA. Voor de aspecten grondstoffen, emissies, afval en energie is kwantitatieve data voorhanden (LCA). De LCA kan van de overige aspecten geen beoordeling geven. Bij het ontbreken van de kwantitatieve gegevens, is met behulp van kwalitatieve inschattingen (TWIN-model) een meer op de werkelijkheid aansluitende beoordeling realiseerbaar, waarbij een breder gedeelte van het milieuprofiel wordt beoordeeld. (13)

De invoer van de basisgegevens wordt vereenvoudigd doormiddel van de eerder genoemde ‘Gebouw Wizard’ waarin het gebouw in een aantal stappen kan worden ingevoerd, zie onderstaande figuur.



Figuur 4.5: Wizard GreenCalc+

Na de invoer van de basisgegevens van het ontwerp dient in de vervolgschermen de toegepaste materialen en hoeveelheden te worden ingevoerd. Deze kunnen worden opgeroepen uit de bij het programma behorende database. In deze database zijn verschillende gegevens opgenomen betreffende de materialen. Deze gegevens worden uitgedrukt per functionele eenheid. De milieugegevens (bijv. broeikaseffect [$\text{kg CO}_2 / \text{ton}$]), maar ook andere noodzakelijke gegevens zoals de warmtegeleidingcoëfficiënt van de materialen en dergelijke, is te vinden in de database. Naast de standaard materialen is het mogelijk om zelf een constructie samen te stellen. Een spouwmuur is bijvoorbeeld op te bouwen, waarbij de toegepaste materialen en diktes naar wens kunnen worden aangepast.

De verzamelde milieubelasting voor de verschillende aspecten, volgend uit de invoer van de materialen, wordt via de monetarisering uitgedrukt in euro's. Op deze manier is het vergelijkbaar en sommeerbaar gemaakt. Het resultaat van de berekening kan vervolgens op verschillende manieren worden gepresenteerd.

Energiemodule

Met de energiemodule is het mogelijk om het energieverbruik in de gebruiksfase van een wijk, utiliteitsgebouw of woongebouw te bepalen, in diverse fasen van het ontwerpproces. De module bevat de volgende onderdelen:

- Gebouwgebruik
- Bouwkundige gegevens
- Klimaatsysteem
- Warmtapwater
- PV en windmolens
- Verlichting
- Apparatuur
- Correcties

De berekeningen van het energiegebruik zijn gebaseerd op de NEN 5128:2004 (Woningbouw) en de NEN 2916:2004 (Utiliteitsbouw). Op basis van de gegevens, ingevoerd in de 'Gebouw Wizard', worden de toegepaste installaties gegenereerd en een fictief energieverbruik berekend, exclusief het energieverbruik van in het gebouw aanwezige apparatuur, uitgaande van een standaard gebruikers/bewonersgedrag.

De GreenCalc+ methodiek bevat voornamelijk de forfaitaire rekenmethoden van de NEN 2916 en NEN 5128. Daarnaast is op een aantal plaatsen de invoer ten opzichte van NPR 2917 en NPR 5129 beperkt. Verder is het mogelijk om gegevens te importeren uit de NPR 5129 en de NPR 2917.

GreenCalc+ biedt de mogelijkheid om op eenvoudige wijze het energieconcept vast te leggen. Indien gewenst kunnen echter ook gedetailleerd de toegepaste systemen worden ingesteld.

Watermodule

De GreenCalc+ methodiek voor het bepalen van het waterverbruik van woningen is gebaseerd op de WPN (Water Prestatie Norm) NEN 6922. Deze norm is erop gericht het waterverbruik (gebouwgebonden, kwantitatief) terug te dringen. Uit deze rekenmethode volgt de WPC (WaterPrestatieCoëfficiënt), een verhoudingsgetal van het waterverbruik van een woning en het normverbruik van een woning. In de NEN 6922 wordt echter geen onderscheid gemaakt tussen drinkwater en "ander" water. In de WPC komt het gebruik van regenwater dus niet tot uitdrukking. In de berekening van de milieukosten wordt het gebruik van regenwater en composttoiletten wel meegenomen.

De GreenCalc+ methodiek voor het bepalen van het waterverbruik van utiliteitsgebouwen is gebaseerd op de bepalingsmethode van de 'Water Prestatie Normering', die door bureau Opmaat en Boom is ontwikkeld in opdracht van de gemeente Utrecht.

In overeenkomst met de berekening van het energieverbruik biedt GreenCalc+ de mogelijkheid om op eenvoudige wijze het waterconcept vast te leggen. Indien gewenst kunnen echter ook gedetailleerd de toegepaste systemen worden ingesteld.

Mobiliteitsmodule

Binnen de mobiliteitsmodule wordt de milieucomponent bereikbaarheid van een gebouw beoordeeld. De rekenmethodiek van de mobiliteitsmodule in GreenCalc+ is gebaseerd op de rekenmethodiek van het bestaande softwareprogramma VPL-KISS. VPL staat voor 'VerkeersPrestatie op Locatie' en is ontwikkeld door Novem met steun van het ministerie van Economische Zaken. Deze

beoordeling is complex. Op basis van een aantal scenario's is het toch mogelijk om inzicht te verkrijgen in de milieueffecten als gevolg van mobiliteit. Het resultaat van de milieukostenberekening voor 'Mobiliteit' wordt op dit moment nog niet meegenomen in de berekening van de milieu-index van een gebouw.

4.3.1.3 Uitvoer

De duurzaamheid van een gebouw of wijk wordt in GreenCalc+ uitgedrukt in één overzichtelijk getal, de milieu-index. Hierbij wordt het gebouw of de wijk beoordeeld op de aspecten energieverbruik, waterverbruik en materiaalgebruik.

In GreenCalc+ wordt een onderscheid gemaakt in de milieu-index gebouw (MIG), milieu-index bedrijfsvoering (MIB) en de eigen-index.

De milieueffecten worden in GreenCalc+ uiteindelijk uitgedrukt in jaarlijkse milieukosten. De milieu-index geeft een vergelijking van de milieukosten van het gebouw met die van een referentiegebouw. Het ontwerp van dit referentiegebouw is hetzelfde als die van het beschouwde gebouw, echter is deze gebouwd met de materialen en technieken uit 1990. De milieu-index wordt als volgt berekend: $\text{Milieu-index} = \text{milieukosten referentiegebouw} / \text{milieukosten gebouw} * 100$.

Een huidig duurzaam gebouw heeft een milieu-index die ligt tussen de 150 en 300, een gebouw uit 1990 heeft een milieu-index van 100. Hoe hoger de index, hoe duurzamer het gebouw.

De milieu-index bedrijfsvoering is een vergelijking van het ontwerpgebouw (met het "werkelijke" gebruik van het gebouw) met een automatisch gegenereerd referentiegebouw. Dit geeft de kwaliteit van het gebouw plus gebruiker weer.

De eigen-index is een vergelijking van het ontwerpgebouw (met ontwerpgebruiker) met een zelf gegenereerd referentiegebouw.

Bij het berekenen van meerdere ontwerpen kan een vergelijking worden gemaakt tussen de duurzaamheid van de verschillende ontwerpen.

4.3.1.4 Beoordeling

GreenCalc+ werkt vrij eenvoudig. Het programma maakt het mogelijk om gegevens te importeren en te exporteren. Zo kan de berekening van de EPC gemakkelijk worden ingevoerd in het programma. Het invoeren van de benodigde gegevens vergt behoorlijk wat tijd, aangezien de berekening behoorlijk gedetailleerd is. Doordat het programma werkt met een database, is het gemakkelijk om het programma bij te werken. De mogelijkheid om constructies samen te stellen, zoals een spouwmuur, biedt een behoorlijke ontwerpvrijheid. GreenCalc+ maakt gebruik van referentiegebouwen om de milieu-index te berekenen. Dit resulteert in een getal wat een goed beeld geeft over de milieuprestatie van het gebouw. Daarnaast geven de jaarlijkse milieukosten een goed inzicht over de milieubelasting en milieuprestatie van een gebouw.

De draagconstructie wordt meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik.

4.3.2 Eco-Quantum

Eco-Quantum wordt tegenwoordig niet meer gebruikt, de methode is de voorganger van het huidige GPR Gebouw. De toetsingsmethode is ontwikkeld door IVAM Environmental Research en W/E-adviseurs duurzaam bouwen, met steun van SEV en SBR. Op basis van deze rekenmethode is het programma Eco-Quantum Woningbouw ontwikkeld, waarmee architecten, opdrachtgevers en gemeenten snel de milieuprestatie van een gebouw kunnen berekenen. De milieueffecten van woningen ten gevolge van het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik kunnen worden bepaald aan de hand van de LCA-methodiek. Dit resulteert in een milieuprofiel. Indien gewenst kan met een facultatieve weging het milieuprofiel worden doorgerekend tot één indicatorscore. Eco-Quantum bevat een uitgebreide en inzichtelijke database van materialen, die in woningen worden toegepast, en hun milieueffecten. Niet-kwantificeerbare milieueffecten zoals aantasting worden niet meegenomen, waardoor de afweging niet compleet is. Desondanks geeft het model goed inzicht in de verschillende milieuaspecten van materiaalkeuzen.

4.3.2.1 Werking

Eco-Quantum Woningbouw bestaat uit een combinatie van in- en uitvoermodules, rekenmodules en databestanden. Het programma is opgebouwd uit vier delen:

- De invoer van woninggegevens (modules 1,2 en 3);
- Het rekengedeelte (modules 4 t/m 8);
- Databestanden (modules 9 t/m 12);
- De uitvoer met rekenresultaten (modules 13 t/m 16).

De modules 1, 2 en 3 worden gebruikt om een ontwerp in te voeren, zie ook 4.3.2.2. Het programma is zo ontworpen dat de invoer in Eco-Quantum Woningbouw tot een minimum beperkt kan blijven. Dit, omdat voor een groot aantal variabelen met standaardinstellingen wordt gerekend.

De modules 4 t/m 8 vormen het rekenhart van Eco-Quantum. Met de modules wordt de invoer van de gebruiker 'vertaald' naar de uiteindelijke milieuprestatie van een geheel gebouw. Alvorens de berekeningen worden uitgevoerd, stelt de gebruiker een aantal belangrijke uitgangspunten vast in de vorm van de vergelijkingsbasis, bijvoorbeeld m² gebruiksoppervlak per jaar, de weeg- en normalisatiefactoren en de presentatiewijze. In module 5 wordt vervolgens de eerste berekeningsstap uitgevoerd, waarbij de invoer wordt omgezet naar duizenden materiaalstromen in de levenscyclus van een gebouw. Op basis van standaard afvalscenario's per component berekent het programma automatisch de afval- en recyclingstromen voor het gehele gebouw; tijdens gebruik, renovatie en sloop (module 6). In module 7 worden de milieueffecten van de materiaal- en energiestromen berekend met behulp van milieuprofielen uit het 'Databestand Milieu'. Met behulp van normalisatie en weegfactoren die in module 4 zijn ingesteld, worden de milieueffecten in module 8 verder geaggregeerd naar Milieumaten en de Milieu Indicator.

Het programma maakt gebruik van een viertal bestanden waarin standaardgegevens voor een groot aantal variabelen zijn weergegeven (module 9 t/m 12).

Het componentenbestand is direct gekoppeld aan het Gebouwmodel en bestaat uit 81 componenten met ruim duizend alternatieven. De architect voert het materiaalgebruik in, door een keuze te maken uit de alternatieven per component. Per componentalternatief, bijvoorbeeld een m² buitenkozijn van vuren hout, is de materiaalsamenstelling standaard in het bestand opgenomen; de gebruiker kan niet een zelf gematerialiseerde componentalternatief invoeren. Verder zijn in elk alternatief de levensduur per onderdeel, de onderhoudsactiviteiten, het bouwafval en de afvalscenario's opgenomen. Met dit componentenbestand gekoppeld aan de ingevoerde hoeveelheden, rekent het programma (module 5) de materiaalstromen van een gebouw in kilogrammen uit.

In het databestand 'Afvalscenario's' is per materiaal de verdeling aangegeven over fracties van het gesloopte materiaal naar storten, verbranden, recycling en hergebruik. Er zijn twee afvalscenario's

voor elk materiaal gemaakt. Scenario A voor de huidige situatie en scenario B voor de verwachte situatie in de toekomst.

Het 'Databestand Milieu' bevat de milieugegevens van ruim honderd bouwmaterialen en energieopwekkingprocessen. Het milieubestand bestaat uit 1.312 scores voor de milieueffecten van één kilogram bouw materiaal, verdeeld over de productiefase, eventueel de gebruiksfase en het storten en het verbranden van een materiaal in de afdankfase. Voor een aantal materialen is ook de uitloging in de gebruiksfase bepaald. Deze gegevens zijn berekend in een stand-alone versie van het LCA-programma SimaPro.

Voor een aantal onderdelen van de methode is nog geen internationale standaard beschikbaar, zoals voor het wegen en normaliseren van de verschillende milieueffecten. Gezien deze situatie kan bij module 4 een keuze worden gemaakt uit twee sets normalisatiefactoren en kan de standaardset met weegfactoren worden vervangen door een eigen set. De beschikbare factoren zijn in dit databestand 'Normalisatie en weegfactoren' opgenomen.

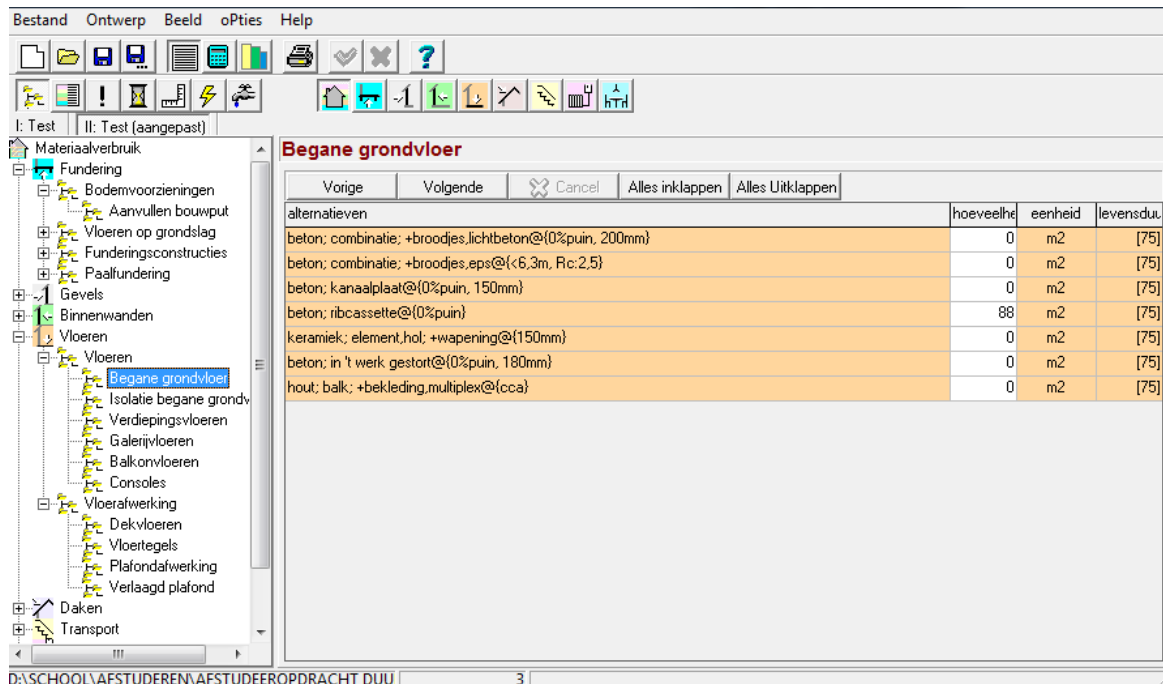
In de modules 13 t/m 16 zijn verschillende vormen van uitvoer van resultaten mogelijk, zie ook 4.3.2.3. Na het berekenen van de resultaten heeft de gebruiker de mogelijkheid te kiezen uit meerdere vormen van uitvoer: Milieumaten, milieueffecten en hoeveelheden. Tevens is het mogelijk verschillende doorsneden te maken: totaal materialen, energie en water maar ook afzonderlijk. Als deze keuze is gemaakt, verschijnt een staafgrafiek op het scherm. Iedere staaf geeft een totale score op het betreffende onderdeel weer. Per staaf is de totale score opgesplitst naar de bijdrage van de verschillende bouwdelen. Zo is bijvoorbeeld de bijdrage van de verschillende bouwdelen aan een Milieumaat te zien.

Eco-Quantum maakt het mogelijk om twee of meer ingevoerde ontwerpen of ontwerpvarianten met elkaar te vergelijken. Het vergelijken kan op Milieumaten, maar ook op milieueffecten of hoeveelheden. Vergelijken van milieukwaliteit kan door twee of meer bestanden te openen. Het is echter ook mogelijk binnen een bestand meerdere werkbladen aan te maken en die vervolgens onderling te vergelijken. Het is zelfs mogelijk de resultaten van twee werkbladen (uit een bestand) onderling en met een tweede bestand te vergelijken. Voor het goed vergelijken van verschillende woningen is het wenselijk dat de presentatie van uitvoer op m^2 gebruiksoppervlakte en per jaar levensduur is ingesteld. Het is mogelijk dat vergelijken per m^3 bruto inhoud en per jaar een juist beeld geeft. Dat laatste is bijvoorbeeld het geval als een woning met een hogere verdiepingshoogte (met het oog op toekomstwaarde) wordt vergeleken met een woning met een standaard verdiepingshoogte. Vergelijking op m^2 gebruiksoppervlakte zou in dat geval ongunstig zijn voor de woning met een hogere toekomstwaarde.

4.3.2.2 Invoer

Wanneer een nieuw project wordt geopend, dient de basisinformatie van het ontwerp, zoals plaats, type woning en opdrachtgever, te worden ingevoerd. Verder vraagt het programma hier om enkele belangrijke gegevens van de woning, zoals de verwachte levensduur en enkele afmetingen volgens NEN 2580. Ten slotte wordt in deze module naast de bestandsnaam, ook het energie- en waterverbruik van de woning in de gebruiksfase ingevoerd.

Vervolgens kunnen de gegevens voor het materiaalgebruik van het gebouw in module 2 worden ingevoerd. Voor de invoer van de bouwkundige gegevens is gebruik gemaakt van de karakterisatie van het gebouw en de opdeling in bouwcomponenten volgens de NL/Sfb-Elementenmethode. Deze methode wordt ook bij kostenramingen en CAD-programmatuur gebruikt. Er zijn een aantal niveaus te onderscheiden, namelijk 'Gebouw', 'Bouwdelen', 'Elementen', 'Componenten' en 'Materiaalniveau'. Aan de hand van een zogenaamde boomstructuur kan er tot in detail ingezoomd worden van bouwdelen tot aan het materiaalniveau, zie Figuur 4.6 op de volgende bladzijde. Het gebouw is opgedeeld in de volgende bouwdelen: fundering, gevels, binnenwanden, vloeren, daken, transport, installaties en inrichting.



Figuur 4.6: Invoerblad Eco-Quantum

Er zijn meer dan duizend veel voorkomende bouwcomponenten in het programma opgenomen. Door hoeveelheden van een component voor een bepaalde eenheid (m^1 , m^2 of stuk) in te voeren worden de materiaalstromen automatisch door het programma berekend. Daarbij is de levensduur en het standaard afvalscenario van de gekozen component gegeven. Deze kunnen echter worden aangepast naar eigen inzicht.

Met behulp van de invoerlijst is het mogelijk te controleren welke instellingen door de gebruiker zijn veranderd, zoals het afvalscenario en de levensduur (module 3). Het overzicht van de invoergegevens kan eventueel naar een printer of een ander programma worden geëxporteerd.

De milieueffecten van het energieverbruik worden vervolgens bepaald door de primaire deelgebruiken (aantal MJ per jaar) en de wijze van opwekking (gasgestookt of elektrisch). Het gaat om het energieverbruik voor ruimteverwarming, warmtapwater, hulpenergie, verlichting, ventilatoren, koeling en bevochtiging. Deze getallen volgen uit de EPC-berekening. Koeling en bevochtiging zijn voor woningen voorsnog niet relevant.

De milieueffecten van het watergebruik worden ten slotte bepaald door de inhoud, het debiet en de leidinglengten voor de verschillende tappunten en de waterbron. De tappunten betreffen bad, toilet, douche, wastafel, wasmachine, tuin en keuken, aangevuld met de post leidingverlies als gevolg van de wachttijd. De waterbron kan zijn: drinkwater(grondwater en/of oppervlaktewater), hemelwater en grijswater.

Resultaten

Voor de presentatie van de resultaten worden drie mogelijkheden gegeven. Standaard worden de resultaten gepresenteerd per m^2 gebruiksoppervlak en per jaar levensduur. Daarnaast kan er gekozen worden om de resultaten te laten weergeven:

- Per totaal gebruiksoppervlak en totale levensduur van de woning
- Per m^3 bruto-inhoud en per jaar levensduur

Met de standaardinstelling ontstaat een vergelijkingseenheid die het mogelijk maakt woningen met verschillende afmetingen en levensduur met elkaar te vergelijken. Hierbij dient wel rekening te

worden gehouden met verschillende functionele eigenschappen, indien er twee verschillende typen woningen (bijvoorbeeld villa en een tussenwoning) met elkaar worden vergeleken.

Weging en normalisatie

De instelling van de weging- en normalisatieset heeft een belangrijke invloed op de resultaten in de vorm van 'Milieumaten' en de 'Milieu Indicator'. Aangezien er geen algemene overeenstemming over de weegfactoren is, kunnen de uitkomsten van de 'Milieu Indicator' niet voor externe communicatie worden gebruikt. In de standaard instelling van het programma wordt deze indicator daarom niet getoond. Echter is het wel mogelijk om deze op te roepen. Voor de weging wordt de MET-set (Kalisvaart, 1994) als standaard gebruikt. Daarnaast kan een eigen weegset worden ingevoerd.

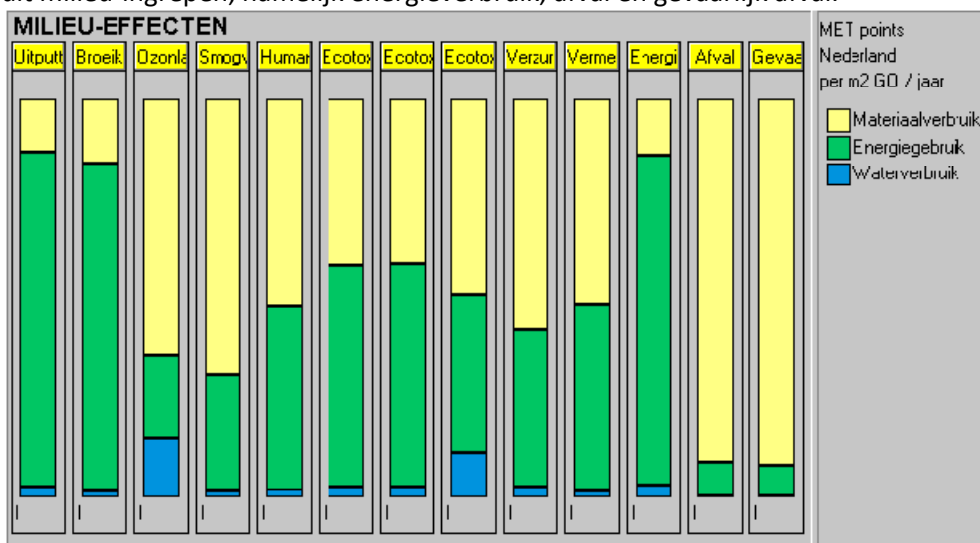
4.3.2.3 Uitvoer

Er kan worden gekozen om de resultaten als volgt weer te geven:

- Uitvoer van hoeveelheden
- Uitvoer van milieueffecten
- Uitvoer van milieumaten

Bij de uitvoer in hoeveelheden worden de materiaal-, energie- en waterstromen van de woning naast elkaar getoond. De hoeveelheid materialen is onderverdeeld naar bouwdeelen. Door te klikken op een bouwdeel wordt inzicht verkregen in de bijdrage van de elementen die onder dat bouwdeel vallen. Door nogmaals te klikken gebeurt datzelfde voor de componenten die binnen een element vallen. Voor energie- en waterverbruik geldt hetzelfde. Door klikken op een deel wordt inzicht verkregen in onderliggende niveaus.

De uitvoer van milieueffecten, zoals broeikaseffect, grondstofuitputting en verzuring, omvat 1.312 scores. Iedere staaf kan worden onderverdeeld in de bijdrage als gevolg van materiaalgebruik en energie- en waterverbruik, zie Figuur 4.7. De meeste scores zijn berekend met behulp van de karakterisatiefactoren uit de 'Handleiding voor Milieugerichte Levenscyclus analyses van producten'. Deze karakterisatiefactoren zijn in de tussentijd aangevuld. Het bestand 'Karakterisatie' is in de stand alone versie van SimaPro voor Eco-Quantum opgenomen en bevat verschillende karakterisatiefactoren die voor de uitvoering van 'Rekenmodule Milieu-effecten' noodzakelijk zijn. Naast zogenaamde scores voor potentiële milieueffecten, bestaan de milieuscores voor een deel ook uit milieu-ingrepen, namelijk energieverbruik, afval en gevaarlijk afval.



Figuur 4.7: Uitvoerblad milieueffecten

Bij het werken met Eco-Quantum is er vaak de behoefte aan geaggregeerde uitvoer in de vorm van een indicator. Daarom is het mogelijk de milieuprestatie in de vorm van vier Milieumaten

(grondstoffen, emissies, energie en afval) en een Milieu Indicator weer te geven. Bij 'Uitvoer Milieumaten' is iedere staaf onderverdeeld in de bijdragen als gevolg van materiaalgebruik en energie- en waterverbruik. Ook hier is het mogelijk door te klikken naar lagere niveaus. Van een referentiewoning zijn de indicatoren per Milieumaat en voor de Milieu Indicator afgeleid. Dat wil zeggen dat de indicatoren voor deze woning op 100 zijn vastgesteld. In deze referentie zijn, voor zover mogelijk, alle vaste maatregelen van het Nationaal Pakket Duurzame Woningbouw toegepast en is uitgegaan van een EPC = 0,97. Deze zijn te gebruiken als vergelijkingsmateriaal bij het verbeteren van de milieuprestatie van een woningontwerp.

4.3.2.4 Beoordeling

Het programma is erg overzichtelijk en gebruiksvriendelijk. Het invoeren van het materiaalgebruik is eenvoudig door het gebruik van de boomlijst. Het wisselen tussen de verschillende invoer onderdelen is mogelijk door middel van een aantal knoppen met duidelijke symbolen, welke de inhoud van het betreffende onderdeel weergeven. Na de invoer kan eenvoudig de berekening worden gestart. Indien gewenst kunnen weegfactoren worden aangepast naar eigen inzicht en kan voor een bepaald grondgebied worden gekozen, wat invloed heeft op de normalisatiefactoren. Deze stappen kunnen echter ook worden overgeslagen, zodat de standaardinstellingen worden gebruikt. De uitvoer van de resultaten is eenvoudig in te stellen door middel van een keuzemenu. De resultaten worden interactief getoond. Dat wil zeggen dat het mogelijk is om in te zoomen op bepaalde aspecten in de resultaten, zie ook 4.3.2.3. Dit maakt het uitlezen van de resultaten zeer inzichtelijk.

De draagconstructie wordt meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik.

4.3.3 BREEAM-NL

De Dutch Green Building Council (DGBC) is een onafhankelijke organisatie, die een duurzaamheidskeurmerk heeft ontwikkeld voor Nederlandse nieuwe gebouwen. Voor gebieden en voor gebruikte gebouwen is het keurmerk nog in ontwikkeling. DGBC is een stichting die certificaten verstrekt aan opdrachtgevers die de mate van duurzaamheid van hun gebouw of gebied hebben laten beoordelen volgens vooraf gestelde criteria. De DGBC wil gaan toetsen op basis van BREEAM-NL(14).

BREEAM is een methode om de milieuprestatie van gebouwen te analyseren en verbeteren, van ontwerp tot management. BREEAM staat voor Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Met BREEAM-NL, de Nederlandse beoordelingsmethode, kan de duurzaamheid van een gebouw (en de bouwkegel) worden beoordeeld in de ontwerp- en de opleveringsfase. De beoordeling van de ontwerpfase resulteert in een tijdelijk certificaat. Dit certificaat vervalt zodra het feitelijke gebouw beoordeeld is na oplevering, en een definitief certificaat heeft ontvangen. De beoordeling in de opleveringsfase kan op twee manieren uitgevoerd worden:

1. Een opleveringsbeoordeling op basis van ontwerpbeoordeling
2. Een zelfstandige opleveringsbeoordeling

De opleveringsbeoordeling levert het definitieve BREEAM-NL certificaat op, dat de ontwikkelaar/eigenaar het recht geeft het BREEAM-NL keurmerk te voeren voor het betreffende object. De kosten voor een BREEAM-NL beoordeling liggen tussen de € 15.000 – 60.000 (12).

Het systeem maakt gebruik van kwalitatieve weging; als totaalscore krijgt een gebouw één van de volgende waarderingen: Pass, Good, Very Good, Excellent of Outstanding. BREEAM-NL is voornamelijk bruikbaar voor kantoren, scholen, winkels en industriële gebouwen met 1 gestandaardiseerde beoordelingsrichtlijn. Gebouw beoordelingen kunnen met BREEAM-NL alleen voor de volgende typen bouwprojecten uitgevoerd worden:

- Nieuwbouw
- Grootchalige renovatie van bestaande gebouwen
- Nieuwbouw uitbreiding aan een bestaand gebouw

4.3.3.1 Werking

Een gebouw wordt integraal beoordeeld op de volgende elementen:

- Bouwkundige elementen (tussenvloeren, gevels, dak, ramen)
- Installaties (verlichting, verwarming, koeling, ventilatie)
- Afwerking (binnenwanden, vloerafwerking, etc.)
- Het bij het gebouw horende terrein (bouwkavel)

De beoordeling vindt plaats op basis van een zogenaamde creditlist. Door DGBC is een vertaling gemaakt op basis van de BREEAM Europe 2008 Credit list. De Nederlandse Creditlist is toegespitst op Nederlandse wet- en regelgeving, praktijkrichtlijnen en bouwpraktijk en bestaat uit de onderstaande categorieën. Elke categorie telt mee in de eindscore volgens een vastgestelde weging. Voor de weging per categorie zijn de waarden aangehouden die gehanteerd worden door BREEAM

International, zie de percentages achter de onderstaande categorieën:

1. Management	(12%)
2. Gezondheid	(15%)
3. Energie	(19%)
4. Transport	(8%)
5. Water	(6%)
6. Materialen	(12,5%)
7. Afval	(7,5%)
8. Landgebruik & Ecologie	(10%)
9. Vervuiling	(10%)

Per gebouwtype kunnen de toe te kennen punten verschillen. Om de totale score van het gebouw beter te laten ondersteunen door het behalen van specifieke credits in meerdere categorieën, heeft BREEAM-NL verplichte credits. Dit is in navolging van de Engelse versie BREEAM-UK. De toekenning van punten voor de credits in een categorie levert een categoriescore op, uitgedrukt als het percentage behaalde punten per categorie. Door de weging van de categoriescores wordt een gewogen eindscore bepaald, die wordt uitgedrukt als percentage van de maximaal haalbare score. Deze eindscore wordt volgens de onderstaande tabel omgezet in het BREEAM-NL keurmerk.

BREEAM-NL keurmerk	Minimaal benodigde score
Pass	30% (minimum eis voor het verlenen van een certificaat)
Good	45%
Very Good	55%
Excellent	70%
Outstanding	85%

Tabel 4.1: BREEAM-NL keurmerk: minimaal benodigde score

4.3.3.2 Invoer

Per credit zijn een aantal punten te behalen. Per punt zijn er criteria-eisen opgesteld waaraan dient te worden voldaan. Om aan te tonen dat er is voldaan aan de gestelde eisen is bewijsmateriaal benodigd. Wanneer de bewijsvoering voldoende is, zullen de punten worden toegekend.

BREEAM-NL werkt met een expert en een assessor. De expert is een gekwalificeerde procesmanager en inhoudsdeskundige met betrekking tot BREEAM-NL en heeft hiertoe een opleiding gevolgd. De expert ondersteunt de ontwikkelaar/ opdrachtgever tijdens het ontwerp- en bouwproces met betrekking tot de vereisten van het BREEAM-NL certificaat. Tevens kan de expert op deze manier voorwerk doen voor de assessor bij de opbouw van een dossier met bewijsmateriaal. Op basis van dit dossier doet een onafhankelijke assessor de definitieve BREEAM-NL beoordeling. De expert mag werkzaam zijn bij de ontwikkelaar / opdrachtgever of als externe deskundige worden ingehuurd.

De assessor is een onafhankelijke, gekwalificeerde en bij DGBC geregistreerde beoordelaar met betrekking tot BREEAM-NL, werkzaam voor een Licentiehoudende Organisatie. De assessor kan zich laten ondersteunen door een expert bij het verzamelen van bewijsmateriaal, maar is te allen tijde eindverantwoordelijk voor het beoordelingsrapport op basis waarvan DGBC vaststelt of een certificaat verleend kan worden.

4.3.3.3 Uitvoer

De uitvoer is bij een positief resultaat een BREEAM-NL certificaat met daarop de op het object van toepassing zijnde kwalificatie.

4.3.3.4 Beoordeling

BREEAM-NL is een beoordelingsmethode, die werkt op basis van bewijsvoering. Het laten toetsen van een gebouw met BREEAM-NL vereist een expert en een assessor. Dit zorgt ervoor dat de kwaliteit van de beoordeling gewaarborgd is. Daarnaast betekent dit ook dat de vrijheid om te werken met de methode beperkt is. Het resultaat van de beoordeling is een keurmerk. Dit keurmerk geeft aan hoe het gebouw zich verhoudt met andere door BREEAM-NL beoordeelde gebouwen, maar er is verder geen informatie uit te destilleren over de invloed van specifieke onderdelen op de beoordeling. Verder zijn de kosten voor een beoordeling behoorlijk groot.

Het materiaalgebruik wordt deels beoordeeld aan de hand van een externe tool, bijvoorbeeld GPR Gebouw. Echter is de DGBC momenteel bezig met het ontwikkelen van een tool voor het berekenen van de schaduwprijs, die voor de assessoren beschikbaar komt.

4.3.4 GPR Gebouw

GPR Gebouw is een instrument waarmee de duurzaamheid van nieuwbouwwoningen en utiliteitsgebouwen in kaart wordt gebracht. Hiermee maakt het programma duurzaam bouwen goed meetbaar en eveneens eenvoudig bespreekbaar. De beoordeling resulteert in een aantal rapportcijfers. Voldoet een project aan het Bouwbesluit dan behaalt het een GPR cijfer van 5,0. Het instrument, in tien jaar tijd ontwikkeld door W/E-adviseurs en de gemeente Tilburg kan gebruikt worden voor het afspreken van ambities op gebouwniveau, voor het toetsen en optimaliseren van prestaties en voor het communiceren over niveaus van duurzaamheid. Inmiddels is het programma beschikbaar in de vierde versie. Het wordt toegepast in de initiatief-, ontwerp-, uitvoering- en opleveringsfase van het planproces. De kosten voor een beoordeling zijn: € 500 – 1500 (12).

4.3.4.1 Werking

GPR Gebouw is webbased; er wordt gewerkt via internet. Licentiehouders maken projecten aan op een eigen afgesloten deel van de GPR Gebouw website. Zij kunnen voor elk project partners uitnodigen voor de invoer van gegevens of de toetsing van de resultaten.

Het programma bestaat uit de modules Energie, Milieu, Gezondheid, Gebruikskwaliteit en Toekomstwaarde. Elk van deze modules bestaat daarnaast uit enkele submodulen. Binnen deze submodulen kunnen gegevens worden ingevoerd en aspecten worden aangevinkt, die van toepassing zijn op het gebouw. Zo zijn er punten te behalen voor elke module. In totaal kunnen per module 1000 punten worden behaald. Per module wordt een cijfer gegeven, gebaseerd op het aantal behaalde punten. Deze cijfers worden gepresenteerd in een staafgrafiek, waarin naast het behaalde cijfer tevens de ambitie wordt getoond. Zo is eenvoudig te zien of een gebouw voldoet aan de vooraf gestelde eisen. Daarnaast wordt er een score gegeven voor de CO₂-emissie ten opzichte van een referentiewaarde. Met de consumentenlabel wordt een beoordeling gegeven over de gehele prestatie van het gebouw. Hierbij is een score van één tot vijf sterren te behalen.

4.3.4.2 Invoer

De modules zijn in het programma inzichtelijk gemaakt door middel van tabbladen. Het eerste tabblad betreft de algemene invoergegevens zoals de naam van de berekening, de

gebouwkenmerken en de gebouwlevensloop. Bij de gebouwkenmerken worden gevraagd naar het aantal gebouwen en bouwlagen en het aantal m² voor het gebruiksooppervlakte, de begane grond- en verdiepingsvloer, de gevel (open en dicht), de dragende binnenwanden en het dak (plat en hellend). Er kan gekozen worden voor referentiewaarden voor het gekozen type woning. Eigen invoer is ook mogelijk. Vervolgens is het mogelijk om de afmetingen voor de componenten te specificeren. Voor onderdelen van de fundering, vloeren, gevels, binnenwanden, daken, trappen en liften, installaties en inrichting kunnen gegevens worden ingevoerd. Tevens kunnen voor deze componenten de forfaitaire waarden worden aangehouden. Vervolgens kan de levensduurverwachting voor het gebouw worden ingevuld.

Het volgende tabblad is Energie. Bouwkundige gegevens als het bouwtype, thermische bruggen, Rc-waarden van vloeren, gevels en daken en het type beglazing kunnen hier worden ingevuld. Daarnaast kunnen gegevens over de toegepaste installaties en aanvullende energiemaatregelen worden ingevoerd. Deze gegevens resulteren in een indicatie over de energieprestatie en CO₂-emissie per woning, het energieverbruik per woning per jaar en het primair energieverbruik EPN per woning per jaar. Tijdens het invullen van de benodigde gegevens is te zien hoe het cijfer van de beoordeling veranderd. Hierdoor is goed zichtbaar gemaakt wat de invloed is van een bepaalde maatregel op de beoordeling.

Het tabblad Milieu bestaat uit de onderdelen Water, Milieuzorg en Materiaal. In het onderdeel water is het mogelijk om de waterbesparende voorzieningen in te voeren. Het onderdeel Milieuzorg betreft de zorgvuldigheid van het ontwerpproces, de uitvoering, het gebruik en de sloop van het gebouw. In het onderdeel materiaal kunnen de toegepaste materialen worden ingevoerd. Voor elk onderdeel van het gebouw zijn een aantal opties mogelijk.

Het tabblad Gezondheid is opgebouwd uit de onderdelen Geluid, Luchtkwaliteit, Thermisch comfort en Licht en visueel comfort. Ook hier zijn voor een aantal aspecten opties aan te vinken die van toepassing zijn op het gebouw. Dit geldt ook voor het tabblad Gebruikskwaliteit, welke bestaat uit de onderdelen Toegankelijkheid, Functionaliteit, Technische kwaliteit en Sociale veiligheid.

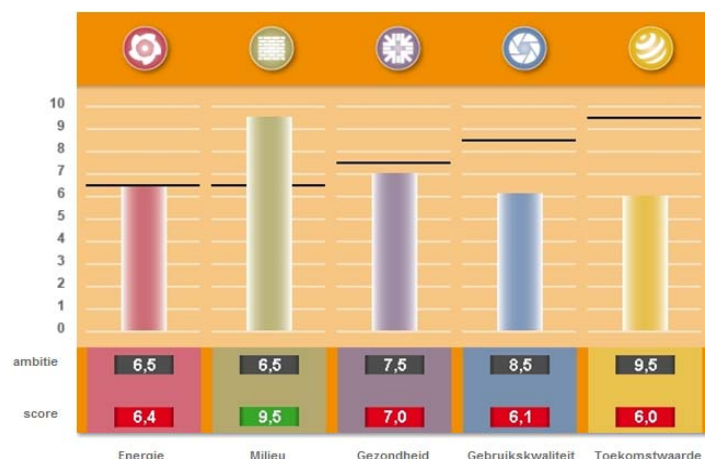
Het tabblad Toekomstwaarde richt zich op de toekomstgerichte voorzieningen, flexibiliteit en belevingswaarde van het gebouw. In het onderdeel Flexibiliteit is de mate van uitbreidbaarheid in te voeren. Daarnaast komen de onderwerpen “aanpasbare elementen” en “verandering indeling” aan bod. De belevingswaarde hangt af van een aantal aspecten, waarvan kan worden ingevoerd of deze van toepassing zijn op het gebouw.

4.3.4.3 Uitvoer

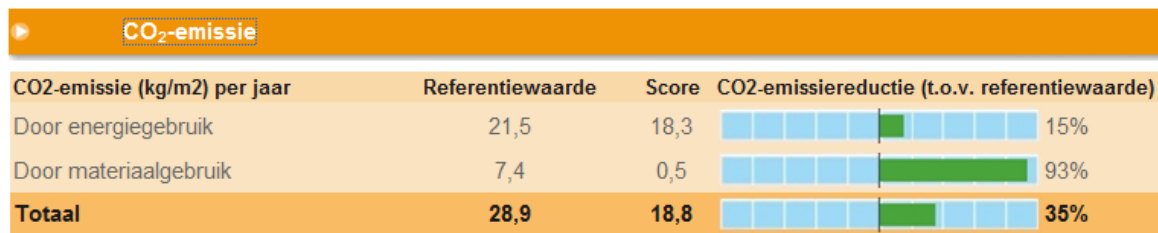
Het resultaat van de beoordeling is een cijfer voor de onderdelen Energie, Milieu, Gezondheid, Gebruikskwaliteit en Toekomstwaarde. Aan de hand van een staafgrafiek, zie Figuur 4.8 wordt inzichtelijk gemaakt hoe het cijfer zich verhoudt met de vooraf gestelde doelstelling (ambitie).

Figuur 4.8: Uitvoer van GPR Gebouw

Tevens wordt een beoordeling gegeven over de CO₂-emissie van het gebouw. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de CO₂-emissie door energieverbruik en



materiaalgebruik. De beoordeling is gebaseerd ten opzichte van de referentiewaarde, zie onderstaande afbeelding.



Figuur 4.9: Weergave van de beoordeling over de CO₂-emissie

De algemene beoordeling van het gebouw resulteert in een consumentenlabel. Het label classificeert het project in één tot vijf sterren.

4.3.4.4 Beoordeling

GPR Gebouw heeft een aantrekkelijk uiterlijk. Daarnaast is het erg overzichtelijk. Het is gemakkelijk om te wisselen tussen de tabbladen. Indien gegevens nog niet bekend zijn, is het mogelijk om forfaitaire gegevens in te vullen of om gegevens uit een referentie gebouw te gebruiken. In het invoerblad dienen specifieke waarden te worden ingevuld over de gebouwkenmerken, waarin het materiaalgebruik wordt vastgelegd. In de overige modules wordt veelal gevraagd een keuze te maken uit de gegeven opties voor de verschillende aspecten en onderdelen. Hierdoor is de invoer behoorlijk eenvoudig. Naast de keuzes wordt soms extra informatie gegeven over het betreffende onderdeel. Doordat een bepaalde keuze gelijk wordt doorgerekend naar de score, is het mogelijk om de invloed ervan te bepalen. Hierdoor is het programma een goed hulpmiddel in de ontwerpfase. De uitvoer is eenvoudig en geeft een goed beeld van het gebouw. Doordat het resultaat een cijfer is, kan de milieuprestatie van een gebouw goed geplaatst worden. Dit geldt ook voor de beoordeling van het consumentenlabel in een aantal sterren.

De draagconstructie wordt meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik en deels bij de berekening van het energieverbruik. Ook wordt een beoordeling gegeven over de functionaliteit van de woning. Hierin komen aspecten als beukmaat en netto verdiepingshoogte aan het bod. Verder wordt ook de toekomstwaarde van het gebouw beoordeeld, waarbij flexibiliteit (zie 5.3.1) een belangrijk onderdeel is. Tot slot kan de levensduur van een ontwerp, een belangrijk onderdeel van de milieuprestatie van een gebouw, in GPR Gebouw worden aangepast. Hiermee behandelt het programma een breder gebied van duurzaamheid in vergelijking met de andere toetsingsmethodieken, welke hoofdzakelijk op basis van het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik de duurzaamheid van een gebouw beoordelen.

4.4 Conclusie

Uit het onderzoek naar de verschillende toetsingsmethodieken is gebleken dat de draagconstructie niet specifiek wordt meegenomen in de beoordeling. Het materiaalgebruik van de draagconstructie kan, uitgezonderd BREEAM-NL, als onderdeel van het totale materiaalgebruik van een gebouw worden ingevoerd. Er wordt hoofdzakelijk gekeken naar het energieverbruik en materiaalgebruik. GPR Gebouw behandelt samen met BREEAM-NL een breder gebied betreffende duurzaamheid.

Gezien het grote aandeel van de draagconstructie op de totale milieukosten (3.3.2), hoewel afhankelijk van de levensduur van een gebouw, is het belangrijk om een constructief ontwerp te beoordelen op duurzaamheid. Deze beoordeling kan een helder inzicht geven over de uiteindelijke milieuprestatie van een gebouw. Daarnaast kan deze beoordeling in de ontwerpfase als hulpmiddel dienen bij de keuze uit meerdere constructieve alternatieven. Concluderend uit het onderzoek naar de verschillende toetsingsmethodieken kan gesteld worden dat geen van de huidige methoden geschikt zijn om constructieve ontwerpen te beoordelen op duurzaamheid.

5 Draagconstructie en duurzaamheid

Uit het onderzoek van Dobbels naar twaalf kantoorgebouwen, is gebleken dat de draagconstructie voor de milieubelasting van groot belang is, zie 3.3.2. Het materiaalgebruik krijgt een steeds grotere invloed op de totale milieubelasting. Daarnaast draagt de draagconstructie voor bijna 60% bij aan het totale materiaalgebruik in een gebouw. Door middel van verstandig constructief ontwerp is er dus veel winst te behalen wat betreft duurzaamheid. Gedurende het ontwerpproces worden keuzes gemaakt, die een grote invloed hebben op de kwaliteit, en in het bijzonder de duurzame kwaliteit, van een gebouw. Door goede keuzes te maken in het constructief ontwerp kan men materiaal besparen, de levensduur van de constructie verlengen en de milieu-impact verminderen. Voor een eenvoudige kantoorplattegrond blijkt bijvoorbeeld dat er tot een factor 5 milieuverschil kan ontstaan tussen het beste en het slechtste realistische constructief ontwerp (1).

Wanneer men spreekt over duurzaam bouwen, wordt nog te weinig aandacht besteed aan de draagconstructie. Op dit moment richt het overheidsbeleid zich teveel op materiaalkeuze en op maatregelen om het water- en energieverbruik te beperken. Dit is terug te zien in de toetsingsmethodieken die op de markt zijn. De huidige toetsingmethoden, GreenCalc+, GPR Gebouw en BREAA-NL, zijn geschikt om gebouwen als geheel te beoordelen op het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik.

Momenteel wordt in de ontwerpfase de vergelijking tussen de verschillende constructieve alternatieven hoofdzakelijk gebaseerd op integratie in bouwkundig en installatieontwerp, benodigde constructiehoogte, bouwkosten en bouwtijd. Duurzaamheid wordt hierbij veelal buiten beschouwing gelaten. Gezien de invloed van de draagconstructie op de milieubelasting van een gebouw is het echter noodzakelijk om niet alleen een beoordeling te kunnen geven over de duurzaamheid van een gebouw, maar tevens over de duurzaamheid van een constructief ontwerp. De bovengenoemde toetsingsmethoden zijn erg uitgebreid, maar een specifieke beoordeling van de draagconstructie op duurzaamheid is met deze methoden niet mogelijk. Hierdoor zijn deze methoden niet geschikt om op een eenvoudige wijze de duurzaamheid van verschillende constructieve alternatieven te beoordelen, zie 4.3. Vanuit constructief oogpunt is dan ook de behoefte ontstaan naar een tool, welke op basis van een constructief ontwerp een beoordeling kan geven over de mate van duurzaamheid.

Hiermee dient zich het onderwerp van dit afstudeeronderzoek aan:

Het ontwikkelen van een tool waarmee op een eenvoudige en doeltreffende wijze de duurzaamheid van een constructief ontwerp kan worden beoordeeld.

Voordat deze tool kan worden ontwikkeld zullen een aantal zaken onderzocht moeten worden. Belangrijk is het vaststellen van de aspecten waarin een draagconstructie bijdraagt aan een duurzaam ontwerp. Hoe deze aspecten dienen te worden beoordeeld, zal vervolgens onderzocht moeten worden. In de inleiding van dit rapport is de definitie van de term ‘duurzaam’ behandeld. Ter verduidelijking en ter herinnering wordt hieronder eerst nogmaals de definitie van de term ‘duurzaam’ besproken. Daarna wordt de bijdrage van een draagconstructie aan een duurzaam ontwerp behandeld.

5.1 Definitie duurzaamheid

Een goede beschrijving van de relatie tussen duurzaamheid en een draagconstructie vereist een duidelijke definitie van de term 'duurzaamheid'. Er zijn vele beschrijvingen voor de term 'duurzaam'. In relatie met 'constructie' bestaan er voor de term 'duurzaam' twee betekenissen (15). In het Engels spreekt men over 'durable' en 'sustainable' voor deze twee betekenissen. Aan de ene kant zegt 'duurzaam' iets over de mate waarin een materiaal, gebouwdeel of constructie een belasting kan weerstaan over een bepaalde tijd, zonder dat dit invloed heeft op het functioneren ervan (durable). Aan de andere kant verwijst de term 'duurzaam' naar de algemene eigenschap van een materiaal, gebouwdeel of constructie, welke een indicatie geeft van de invloed op het milieu (sustainable). In dit rapport wordt naar deze laatste omschrijving verwezen, wanneer er over 'duurzaam' en 'duurzaamheid' wordt gesproken.

5.2 Duurzaam Construeren

Duurzaam construeren betekent dat naast zwaartekracht, vormgeving en kosten ook het aspect duurzaamheid wordt meegenomen in de afwegingen bij het maken van een constructief ontwerp. Hierbij dient te worden opgemerkt dat niet dwangmatig moet worden geprobeerd de milieu-impact van een gebouw te verkleinen. Door slim te ontwerpen en goed onderbouwde afwegingen te maken, dient men de milieulast van de gebouwen te verkleinen en de economische waarde ervan te verhogen. Duurzaam construeren is een geïntegreerd besluitvormingsproces; een serie afwegingen die samen met de andere partijen in het ontwerp- en bouwproces moeten worden gemaakt. Deze afwegingen verschillen per situatie en dit maakt duurzaam construeren dan ook een complex proces.

Zowel flexibel als niet-flexibel bouwen kan bijvoorbeeld duurzaam zijn. Door in een nieuw ontwerp constructief ruimte te laten voor wat nog mogelijk kan komen, wordt de levensduur van een gebouw aanzienlijk verlengd. En een gebouw dat 100 in plaats van 50 jaar meegaat, is in principe 100 procent duurzamer. Echter, een gebouw dat een verwachte levensduur van twintig jaar heeft en niet van functie zal veranderen, kan buitengewoon simpel in elkaar steken. Het kantoorgebouw van XX-architecten in Delft, genaamd 'XX-kantoor', is gebouwd volgens dit uitgangspunt. Niet het gebouw zelf, maar de ruimte die het gebouw inneemt, wordt op een flexibele manier gebruikt. Basis van dit concept is dat de toegepaste materialen ofwel na twintig jaar gedemonteerd kunnen worden en opnieuw zijn te gebruiken of die na twintig jaar zo versleten zijn dat ze gecomposteerd kunnen worden (kartonnen ventilatiekokers).

Door gebruik te maken van het bestaande, is het mogelijk de milieu-impact laag te houden. Naast hergebruik is ook constructieve optimalisatie een van de belangrijkste pijlers onder een duurzaam gebouw. Door middel van optimalisatie kan een flinke materiaalbesparing worden behaald. Echter, wanneer dit ten koste gaat van het draagvermogen, moet men realiseren dat dit kan inhouden dat een gebouw minder flexibel wordt voor functiewisselingen. Het afwijken van de vaste conventies kan tevens leiden tot een besparing in het materiaalgebruik. Het toepassen van grote kolomvrije overspanningen bijvoorbeeld, vereist onevenredig veel materiaal. Kleine overspanningen zijn in principe dus duurzamer. Dit betekent niet dat grote overspanningen niet meer moeten worden toegepast, maar dat de keuze ervoor goed onderbouwd moet zijn. Hetzelfde geldt voor de keuze tussen constructieve optimalisatie en flexibiliteit.

Naast het besparen van het toegepaste materiaal is de materiaalkeuze bepalend voor de duurzaamheid van een gebouw. Zo kan er bijvoorbeeld gekozen worden voor een stalen, betonnen, houten of hybride draagconstructie. Van beton is betongranulaat te maken, maar beton is meestal niet 100% recyclebaar. Staal is dit echter weer wel, maar heeft een hoge milieu-footprint. Hout is in principe het meest duurzame materiaal, zoals ook blijkt uit berekeningen met GreenCalc+. Toch wordt hout veel minder toegepast in een draagconstructie dan staal en beton. Dit is geen probleem, maar ook hier geldt dat de keuze hiervoor goed onderbouwd dient te zijn.

Tot slot behoort multifunctionaliteit tot één van de mogelijkheden om tot een duurzaam ontwerp te komen. Naast het 'dragen' van het gebouw is een constructie in staat om meerdere functies te

vervullen. Zo wordt bij betonkernactivering de massa van de betonnen draagconstructie gebruikt voor warmteopslag en koudeopslag, waardoor een aangenaam binnenklimaat wordt verkregen op een duurzame wijze.

Met het toepassen van betongranulaat en betonkernactivering is een eerste stap gezet in de richting van duurzaam construeren. Duurzaam construeren gaat echter veel verder dan deze twee maatregelen.

Kort samengevat zijn de punten voor het Duurzaam Construeren de volgende(16):

- Verleng de levensduur van gebouwen
- Beperk het materiaalgebruik
- Gebruik duurzame materialen
- Houd rekening met de milieu-impact van (bouw)logistiek en transport
- Gebruik de constructie voor meer dan alleen 'dragen'

5.3 Draagconstructie en duurzaamheid

De draagconstructie bestaat uit de volgende onderdelen: Fundering, kolommen, balken, vloer- en dakconstructie, en soms wanden en gevels. Deze onderdelen hebben invloed op de duurzaamheid van de constructie. Het bepalen van deze invloed wordt gedaan aan de hand van de opgestelde punten voor het Duurzaam Construeren. Per punt wordt er gekeken naar de onderdelen en aspecten van de draagconstructie die hierop invloed hebben. Vervolgens worden deze aspecten verder onderzocht, zodat er uiteindelijk een goed onderbouwde beoordeling kan worden gegeven over de mate van duurzaamheid van de draagconstructie.

5.3.1 Levensduur en functie

Een langere levensduur heeft tot gevolg dat de milieubelasting per functionele eenheid afneemt, omdat de milieubelasting over een langere periode wordt verdeeld. De levensduur van een gebouw wordt beïnvloed door de volgende aspecten:

- Levensduurscenario
- Veranderbaarheid
- Hergebruik

Het levensduurscenario vormt het uitgangspunt bij het ontwerp van de draagconstructie.

Voor constructies met als doel een lange levensduur zijn flexibiliteit met betrekking tot veranderingen in functie in de toekomst en hoge duurzaamheid van belang. Voor constructies met een gemiddelde of korte geplande levensduur zijn de mogelijkheid tot veranderingen en hergebruik belangrijk.

5.3.1.1 Veranderbaarheid

De veranderbaarheid van een gebouw kan worden opgesplitst in flexibiliteit en aanpasbaarheid. De toekomstige waarde van een gebouw is grotendeels afhankelijk van de flexibiliteit in de verandering van het gebruik. Waar de gemiddelde technische levensduur van een kantoorgebouw bijvoorbeeld circa vijftig jaar bedraagt, is de gemiddelde economische levensduur slechts ongeveer twintig jaar. Dat betekent dat na twintig jaar het kantoorgebouw ingrijpend moet worden verbouwd of gesloopt. Bij een flexibel gebouw is dit niet nodig.

Flexibiliteit

Functionele flexibiliteit wordt mogelijk gemaakt door technische flexibiliteit. Een gebouw is geschikt voor verschillende functies wanneer de technische eigenschappen dit ook mogelijk maken.

Functionele flexibiliteit kan worden onderverdeeld in multifunctionaliteit en onderverdeelbaarheid van gebouwen. Met multifunctionaliteit wordt hier de mogelijkheid tot het gebruik voor meerdere functies bedoeld. Onderverdeelbaarheid wordt gerealiseerd door technische flexibiliteit en de

aanwezigheid van meerdere ingangen, trappenhuizen, liften en faciliteitgroepen en schachten. Hierdoor is het mogelijk om een verdiepingsvloer door meer dan één organisatie te gebruiken.

Technische flexibiliteit kan worden onderverdeeld in interne en externe flexibiliteit. Externe flexibiliteit betreft de uitwaartse, horizontale en verticale uitbreidbaarheid van een gebouw. Uitbreidbaarheid kan worden gerealiseerd door dragende wanden of gevels in de constructie te vermijden. Tevens kunnen voorbereidingen worden getroffen voor eventuele uit- of opbouw. Interne flexibiliteit is gekoppeld aan de herinrichtbaarheid van een gebouw. Een gebouw, dat op een eenvoudige manier gewijzigd kan worden om te voldoen aan de nieuwe functie, is intern flexibel. In de praktijk betekent dit meestal het ombouwen van een kantoor of een schoolgebouw tot één of meer woningen. Bij de maatvoering van het gebouw moet dan al rekening worden gehouden met 'woningmaten', zoals beukmaten, raamindelingen, leidingkokers en trappenhuizen.

Aanpasbaarheid

Voor de aanpasbaarheid van een gebouw zijn de draagconstructie en de compatibiliteit met de gebouwinstallaties een belangrijke factor. Hierbij is het van belang dat de installaties in de toekomstige ontwikkelingen van een gebouw geen belemmeringen zullen vormen. Compatibiliteit kan worden gerealiseerd door flexibele integratie of door het scheiden van de constructie en zijn installaties. Dit kan bijvoorbeeld door geen installaties in te bouwen in dragende wanden. Voldoende verdiepingshoogte maakt veranderingen in installaties mogelijk. Ook de locatie van trappen en liftschachten voor verkeer en voor horizontale en verticale verbindingen voor gebouwinstallaties zijn bepalend voor de aanpasbaarheid van een gebouw.

5.3.1.2 Hergebruik

Bepalend voor de hergebruikmogelijkheden van een bestaand gebouw zijn de waardering van een gebouw, de eigenschappen en afmetingen en de technische conditie. De laatste twee zijn in belangrijke mate verbonden met de draagconstructie.

Eigenschappen en afmetingen

Een goed voorbeeld van de invloed van de eigenschappen en afmetingen van een gebouw op de mogelijkheid tot hergebruik, zijn de grachtenpanden in de binnenstad van Amsterdam.

Als de verdiepingshoogten van de zeventiende eeuwse huizen op dezelfde marge ten opzichte van de lengte van de mensen waren gebaseerd als tegenwoordig, had de hele binnenstad inmiddels moeten worden gesloopt. Echter, omdat men grote verdiepingshoogte toepaste in de panden, voldoen de panden nog steeds aan de huidige eisen. De grote verdiepingshoogte werd voor status en voor daglichttoetreding toegepast. Een ander onbedoeld voordeel uit die tijd is de gebruikelijke vloeroverspanning van zijmuur tot zijmuur, zonder tussensteunen. Voor pakhuizen destijds lijkt dit een logische maatregel, maar tegenwoordig maakt dit gebruik van vele functies buiten opslag van waren mogelijk.

Eigenschappen als draagvermogen, overspanningen, vrije hoogte, vloeroppervlakte, lay-out en kantoordiepte hebben allen invloed op de levensduur van een gebouw. Het draagvermogen van een gebouw is van belang bij verandering van functie, aangezien de belastingen groter kunnen zijn. Grote vloeroverspanningen maken veranderingen in gebruik mogelijk, doordat er niet te veel verticale draagconstructie elementen zijn. Grote afmetingen van een ruimte, bieden de mogelijkheid tot alternatief gebruik. Tevens kan hiervoor gebruik gemaakt worden van te verplaatsen scheidingswanden. Afmetingen hebben ook invloed op het energieverbruik. De verhouding tussen inhoud en geveloppervlak bijvoorbeeld heeft invloed op de energie-efficiëntie van een gebouw.

5.3.2 Materiaalgebruik en materiaalkeuze

Het materiaalgebruik heeft een grote invloed op de milieu-impact van een gebouw. Deze impact wordt beïnvloed door de materiaalkeuze. Het toepassen van duurzame materialen kan de milieubelasting per eenheid materiaal over de gehele levensduur verminderen.

Hergebruik en recycling zorgen ervoor dat bouwdelen en bouwmaterialen na de sloop opnieuw kunnen worden ingezet en niet worden gestort of verbrand. Hiermee kan het materiaalgebruik sterk worden verminderd. De belangrijkste ontwikkeling in dit kader is demontabel bouwen. Demontabel bouwen maakt hergebruik en recycling in de toekomst mogelijk. Het is een bouwmethode waarbij de constructieve verbindingen zodanig zijn uitgevoerd, dat de onderdelen van de constructie zonder of met geringe destructie kunnen worden gedemonteerd en voor hergebruik in aanmerking komen. Monolithische verbindingen kunnen in dit opzicht dus beter niet worden toegepast. Met de bouwmethode wordt gestreefd naar besparing in gebruik van energie en grondstoffen, het beperken van geluids- en stofoverlast bij het slopen en het verminderen van het afvalprobleem. Een voorbeeld van demontabel bouwen is IFD bouwen. Industrieel Flexibel Demontabel (IFD) bouwen is een manier van ontwerpen, ontwikkelen en bouwen, waarin via een geïntegreerde benadering industriële, flexibele en demontabele aspecten gezamenlijk een rol spelen. Alleen wanneer aan alle drie van deze aspecten op een juiste wijze invulling wordt gegeven, is er sprake van IFD.

De wijze van bouwen kan ook op een andere manier invloed uitoefenen op het materiaalgebruik. Bij in situ gebouwde constructies komt bijvoorbeeld meer bouwafval vrij in vergelijking met prefab constructies. Verder is de recyclebaarheid te verhogen door het scheiden van de draagconstructie en de niet-draagconstructie.

5.3.3 Logistiek en transport

Bij de keuze en inkoop van de benodigde bouwmaterialen zal er rekening moeten worden gehouden met het transport van deze materialen naar de bouwplaats en de impact daarvan op het milieu. Dit aspect kan aan het materiaalgebruik en materiaalkeuze (5.3.2) worden toegevoegd.

5.3.4 Multifunctionaliteit

Door middel van multifunctioneel gebruik van de draagconstructie kan het materiaalgebruik en/of het energieverbruik verminderd worden. Met multifunctionaliteit wordt in dit geval niet het inpassen van meerdere functies binnen een gebouw, na oplevering en in de toekomst, bedoeld. De multifunctionaliteit heeft betrekking op de draagconstructie.

Een draagconstructie kan meerdere functies vervullen. Door inventief om te gaan met deze kwaliteit kan de milieubelasting aanzienlijk worden beperkt. Een voorbeeld van een inventief gebruik van de draagconstructie is betonkernactivering, zoals in 5.2 reeds is vermeld. De massa van de constructie wordt naast het “dragen” van het gebouw, gebruikt om warmte en/of koude in op te slaan. In de zomer werkt dit verkoelend en ’s winters juist verwarmend. Wanneer dit concept in de juiste situatie wordt toegepast, levert dit een aanzienlijke vermindering van het energieverbruik op.

Een ander voorbeeld van multifunctioneel gebruik van de draagconstructie is het combineren van bouwkundige en constructieve elementen.

6 Beoordeling van duurzaamheid

In het voorgaande hoofdstuk zijn de aspecten genoemd die invloed uitoefenen op de duurzaamheid van een gebouw en specifiek: de draagconstructie van een gebouw. Naast de te beoordelen aspecten is de methode voor de beoordeling zelf van groot belang voor het realiseren van de tool. Een gebouw kan op verschillende wijzen worden beoordeeld. Zoals eerder vermeld kan deze beoordeling zowel kwalitatief als kwantitatief zijn. Daarnaast is de basis waarop wordt vergeleken van grote invloed op de beoordeling. In dit hoofdstuk wordt de methode voor de beoordeling onderzocht, resulterend in een beoordelingsmethode voor de te ontwerpen tool.

6.1 Vergelijken van gebouwen

De absolute milieubelasting van een gebouw op zich zelf, zegt niets over de milieutechnische kwaliteit van het gebouw. Hiervoor is een vergelijking met een ander gebouw of een referentie benodigd. GreenCalc+ maakt hiervoor gebruik van een referentie gebouw uit 1990, om een ontwerp te vergelijken en te beoordelen op duurzaamheid. Andere toetsingsmethodieken geven een cijfer of een keurmerk voor een ontwerp. Op deze basis kan dan ook een vergelijking tussen verschillende ontwerpen worden gemaakt.

Bij een vergelijking van absolute scores moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan:

1. De gebouwen hebben een vergelijkbare functie en grootte. Dat laatste is niet noodzakelijk als de resultaten kunnen worden geconverteerd naar dezelfde grootte. Het kiezen van een functionele eenheid zorgt voor een basis van de vergelijking van gebouwen.
2. Gebouwen dienen op dezelfde wijze te worden beoordeeld. Hierbij is het 'input protocol' van belang. In dit protocol staat beschreven hoe de beoordeling wordt gemaakt. Indien de functies verschillen van de te vergelijken gebouwen kan met een 'function conversion protocol' functionele gelijkheid gerealiseerd worden.

Naast het vergelijken op absolute basis is het ook mogelijk om een vergelijking te maken op basis van relatieve scores. Wanneer de berekende milieubelasting van een gebouw wordt vergeleken met die van een referentie gebouw of met een referentie milieubelasting, kan een index of factor worden bepaald. Aan de hand van deze factoren is het mogelijk gebouwen met elkaar te vergelijken. Een aantal voordelen van het gebruik van relatieve scores zijn de volgende:

- Simpele scores, in tegenstelling verschillende effect scores met veel getallen.
- Vergelijkbaarheid van aspecten m.b.t. duurzaamheid, waarvan de scores in verschillende eenheden kunnen worden uitgedrukt.
- Reductie van systematische afwijkingen in de beoordeling.

In een vergelijkende studie lossen de mogelijke fouten in de beoordelingsmethode op, doordat in de berekeningen de resultaten worden gedeeld met elkaar. Dit maakt de keuze voor een bepaalde methode minder belangrijk. Vanuit wetenschappelijk oogpunt geeft men daarom de voorkeur aan het werken met relatieve scores.⁽¹⁾

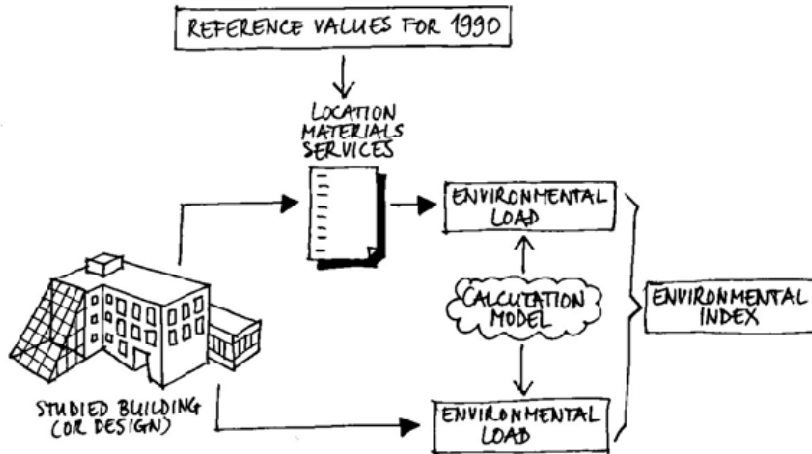
6.1.1 Referentietypen

Voor gebouwen zijn er vier basis referentietypen (1) welke hieronder kort worden toegelicht:

1. Ontwerp referentie
2. Bruto vloeroppervlak referentie
3. FTE referentie
4. Gemiddelde milieuprestatie

Ontwerp referentie

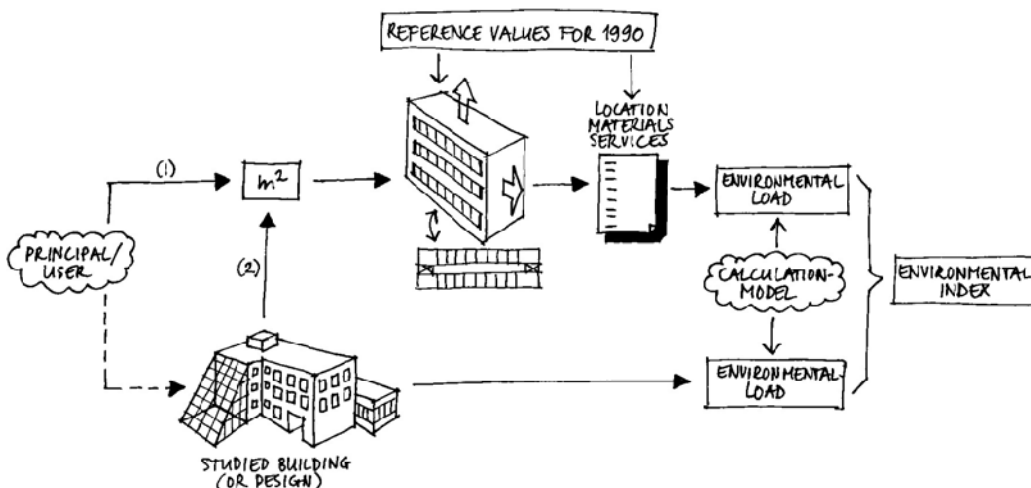
Het ontwerp van het referentiegebouw is in dit geval gelijk aan die van het bestudeerde gebouw. Hierbij moet men denken aan de vorm, het vloeroppervlak, gevel, ingebouwde componenten en het materiaalgebruik. De toegepaste bouwmaterialen en de energie- en waterinstallaties zijn in dit geval verschillend. Door de milieukosten van het referentiegebouw te delen met die van het bestudeerde gebouw verkrijgt men een index, welke een indicator is voor de duurzaamheid van het gebouw.



Figuur 6.1: Illustratie van de bepaling van de 'ontwerp referentie' en de milieu-index (Dobbelsteen van den, 2004)

BVO referentie

Dit referentietype is gebaseerd op het bruto vloeroppervlakte van het bestudeerde gebouw. Een belangrijk verschil met de 'ontwerp referentie', is het ontwerp van het theoretische BVO referentiegebouw. De geometrie, de gevel en de ingebouwde componenten worden opgebouwd aan de hand van ontwerpelementen van het referentiegebouw. Verder wordt er op dezelfde wijze omgegaan met de toegepaste bouwmaterialen en de energie- en waterinstallaties, als bij de 'ontwerp referentie'. Vervolgens kunnen de milieukosten worden berekend voor het referentiegebouw en kan er een index worden berekend van de milieukosten⁵.

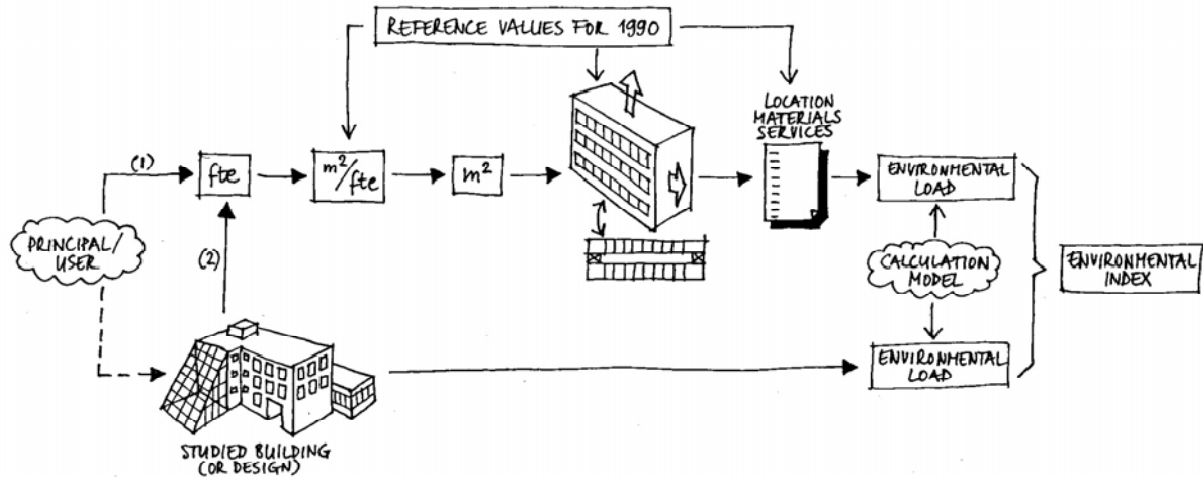


Figuur 6.2: Illustratie van de bepaling van de 'BVO referentie' en de milieu-index (Dobbelsteen van den, 2004)

⁵ Doordat de bruto/netto verhouding per gebouw ontwerp verschillend kan zijn, is de vergelijking niet altijd correct.

FTE referentie

Het aantal personen (of 'Full time equivalent', FTE) waarvoor het gebouw is ontworpen of waardoor het gebouw wordt gebruikt, vormt in dit geval de basis van de vergelijking. Het benodigde vloeroppervlak wordt berekend met een referentie gemiddeld vloeroppervlak per persoon. Vervolgens wordt net als bij de 'BVO referentie' het referentiegebouw opgebouwd en kan de milieu-index worden berekend.



Figuur 6.3: Illustratie van de bepaling van de 'FTE referentie' en de milieu-index (Dobbelsteen van den, 2004)

Gemiddelde milieuprestatie

Het bepalen van een referentie gebouw vereist relatief veel werk en inzicht in de functionele en technische aspecten van gebouwen. Een snelle vergelijking van gebouwen is mogelijk door een referentiebelasting per m² BVO, per gebruiker of FTE te gebruiken. De gemiddelde milieukosten voor kantoorgebouwen gedeeld door het aantal gebruikers kunnen bijvoorbeeld €20.000 per FTE zijn. Wanneer het bestudeerde gebouw hetzelfde gemiddelde heeft, kan gesteld worden dat het gemiddeld presteert qua duurzaamheid. Bij het gebruik van deze methode dient men er wel op bedacht te zijn, dat voor de bepaling van de referentiegemiddelden vele gebouwen van hetzelfde type moeten zijn doorgerekend. Wanneer dit niet het geval is kan er weinig waarde worden gehecht aan de vergelijking.

6.1.2 Conclusie

In het voorgaande wordt het bestudeerde gebouw vergeleken met een bepaald referentiegebouw, op basis van de behandelde referentietypen. Hierbij is het doel van de vergelijking om de duurzaamheid van een enkel bouwontwerp te bepalen. Dit komt niet overeen met het doel van de te ontwerpen tool, namelijk het beoordelen van de duurzaamheid van een constructief ontwerp. In dit geval dienen constructieve alternatieven onderling te worden vergeleken en beoordeeld.

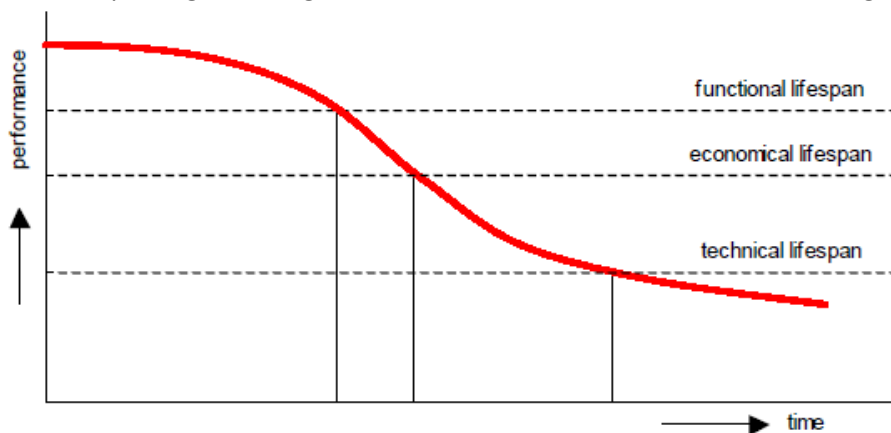
De behandelde referentietypen zijn niet geschikt om een beoordeling van een constructief ontwerp te geven. De methoden zijn vooral gericht op het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik. De eigenschappen van de draagconstructie kunnen hierin niet worden meegenomen in de beoordeling. Het belangrijkste onderdeel van de beoordeling op duurzaamheid, het beoordelen van de levensduur van een gebouw, ontbreekt in de huidige toetsingsmethodieken. In de volgende paragraaf zal de wijze, waarop de levensduur kan worden meegenomen in de beoordeling, worden onderzocht.

6.2 Levensduur

De levensduur heeft een grote invloed op de mate van duurzaamheid van een gebouw. In de huidige berekenmethode wordt de levensduur meegenomen in de berekening door hiervoor een waarde aan te nemen of te laten invoeren. Gezien de invloed van de levensduur op de duurzaamheid van een gebouw is het echter vreemd dat de methodieken geen methode bieden waarmee de levensduur van een gebouw, op basis van de gebouweigenschappen, wordt bepaald.

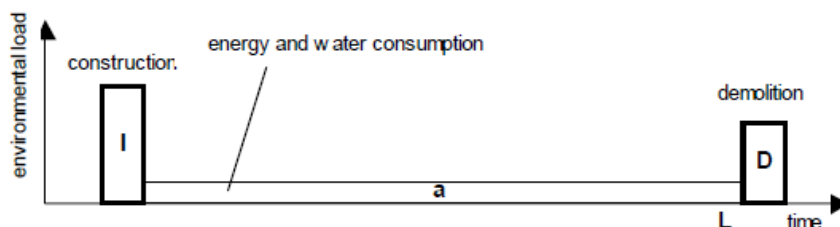
In deze paragraaf zal iets dieper worden ingegaan op de levensduur van een gebouw. Verder wordt de invloed van de levensduur op de milieubelasting behandeld.

Een gebouw heeft verschillende levensduur typen (Dobbelsteen van den, 2004). Zo kan er gesproken worden over de technische levensduur van een gebouw. De technische levensduur is de verwachte periode waarin het gebouw voldoet aan de criteria voor de technische prestatie, bij een bepaalde onderhoudsstrategie. De economische levensduur is de periode, waarna verder gebruik of onderhoud van het gebouw economisch onverantwoord is. Naast de economische levensduur is er ook een milieutechnische levensduur. Deze levensduur kan worden gedefinieerd als de periode waarna sloop en herbouwen milieuvriendelijker wordt geacht dan renovatie en hergebruik. Dit is in overeenstemming met de economische levensduur, alleen is in dit geval de milieubelasting in plaats van de kosten de beslissende factor. De functionele levensduur is de periode waarin het gebouw voldoet aan de functionele eisen of de verwachte periode waarin een organisatie kan functioneren zonder aanpassing aan het gebouw. Grafisch kan het bovenstaande als volgt worden gepresenteerd:



Figuur 6.4: De algemene vermindering van de prestatie van gebouwen (after: Nunen et al., 2003)

De milieukosten van een gebouw bestaan hoofdzakelijk uit de realisatiekosten, de jaarlijkse kosten voor energie- en waterverbruik en de sloopkosten, zie onderstaande figuur.



Figuur 6.5: Eenvoudig model van de milieukosten gedurende de levensduur van een gebouw (Dobbelsteen van den, 2004)

Het vergelijken van de milieukosten van verschillende gebouwen kan op twee manieren: vergelijken op basis van de netto contante waarde of op jaarlijkse kosten. De netto contante waarde wordt berekend door de kosten in de toekomst terug te rekenen naar het begin van het project. In geval van een financiële beoordeling wordt hierin de rente en inflatie meegenomen. In het geval van milieukosten is het meenemen van deze factoren debatteerbaar. Wanneer deze niet worden meegenomen, is de netto contante waarde van de milieukosten eenvoudig te berekenen. De totale

milieukosten (E) is de som van de realisatiekosten (I), de sloopkosten (D) en de jaarlijkse kosten (a) maal de levensduur (L) van het gebouw:

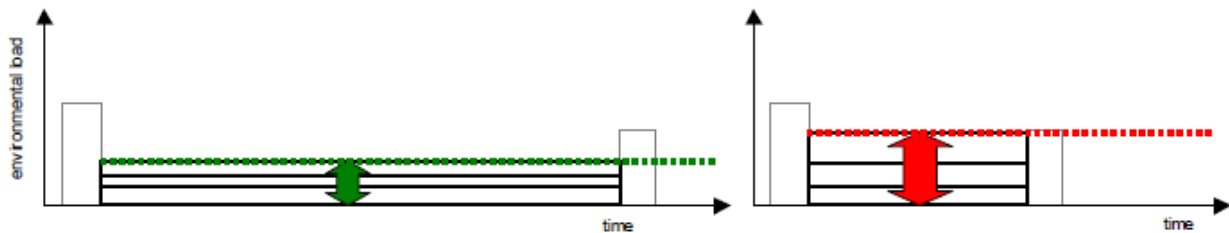
$$E = I + D + (a * L) \quad <4.01>$$

Een langere levensduur leidt in deze formule tot hogere milieukosten.

De jaarlijkse milieukosten (e) worden berekend met de volgende formule:

$$e = a + (I + D)/L \quad <4.02>$$

Uit de formule blijkt dat wanneer de levensduur wordt vergroot, de jaarlijkse milieukosten zullen verminderen. Een korte levensduur daarentegen geeft een verhoging van de milieukosten. In Figuur 6.6 is dit effect weergegeven:



Figuur 6.6: De jaarlijkse milieukosten in geval van een lange en een korte levensduur (Dobbelsteen van den, 2004)

Wanneer er wordt gekeken naar de langere termijn (veel langer dan de levensduur van een gebouw), kan gesteld worden dat een aantal gebouwen met een lange levensduur leiden tot een lagere milieubelasting dan veel meer gebouwen met een korte levensduur. Het gebruik van de jaarlijkse kosten geeft een beter inzicht op de invloed van de levensduur van een gebouw, dan de berekening van de netto contante waarde van de milieukosten. De te ontwerpen tool zal de verschillende constructieve ontwerpen dan ook op basis van deze jaarlijkse milieukosten vergelijken en beoordelen.

6.2.1 Estimated Service Life

De levensduur van een gebouw wordt beïnvloed door verscheidene factoren. De verwachte levensduur kan worden berekend aan de hand van de ESL-factor. De ESL-factor is een indicator van de impact van de verschillende aspecten die invloed hebben op de levensduur van een gebouw. De factor maakt het mogelijk om ontwerpen met een verschillende levensduur te vergelijken.

De verwachte levensduur van een gebouw worden berekend door de ESL-factor te vermenigvuldigen met de levensduur van het gebouw. Wanneer bijvoorbeeld, zoals in GreenCalc+, voor een kantoorgebouw een levensduur van 35 jaar als standaard wordt genomen en de ESL-factor voor het ontwerp 1,0 is, geeft dit aan dat de het gebouw kwalitatief en technisch in staat is om deze levensduur te halen. Een ESL-factor kleiner dan 1,0 geeft aan dat de verwachte levensduur kleiner is dan 35 jaar en een hogere factor dan 1,0 geeft de verwachting aan het gebouw langer dan 35 jaar zal functioneren. Toegepast in formule 4.02, wordt de berekening van de jaarlijkse milieukosten als volgt:

$$e = a + (I + D)/(ESL * L) \quad <4.03>$$

De bepaling van de ESL-factor van een gebouw is mogelijk aan de hand van drie methoden:

1. Exacte berekening op basis van kwantitatieve factoren.
2. Onderbouwde inschatting door een expert of groep van experts.
3. Het gebruik van ESL categorieën, gebaseerd op beslissende factoren voor de levensduur van een gebouw.

De eerste methode is nauwelijks mogelijk aangezien er vele factoren zijn die de levensduur beïnvloeden. Daarnaast is deze methode niet geschikt voor het beoogde doel van de te ontwerpen tool. Deze dient namelijk op een eenvoudige wijze een goede beoordeling te geven betreffende de duurzaamheid. De tweede methode is tevens ongeschikt, aangezien de beoordeling afhankelijk is van

de experts en daardoor in meer of mindere mate een partijdige beoordeling zal geven. De laatste methode is tevens gebaseerd op inschatting, maar dan op een meer gestructureerde wijze. Deze methode is daarom ook het meest geschikt om een inschatting van de ESL te maken.

6.2.2 ESL van de draagconstructie

De ESL-factor voor een gebouw is afhankelijk van de volgende kwaliteiten

- Basis kwaliteiten (technische kwaliteit, functionele kwaliteit, gezondheid)
- Flexibiliteit
- Ecologische kwaliteit
- Architectonische kwaliteit
- Omgevingskwaliteit

Wanneer deze kwaliteiten betrokken worden op de draagconstructie van een gebouw, kunnen een aantal aspecten buiten beschouwing worden gelaten.

Voor nieuwe gebouwen kan ervan worden uitgegaan dat deze basiskwaliteiten gelijk zullen zijn voor alle gevallen, aangezien het geen zin heeft om een nieuw gebouw slechte eigenschappen te geven. De ecologische kwaliteit van een gebouw komt terug in de berekeningen van het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik van een gebouw. Om deze reden wordt dit aspect niet meegenomen in bepaling van de ESL-factor.

De architectonische kwaliteit van een gebouw is moeilijk te bepalen. De beoordeling is kwalitatief en bovendien subjectief. In het geval van de draagconstructie is deze beoordeling nog problematischer, aangezien het uiterlijk van het gebouw in de ontwerpfase vaak nog niet bekend is. De invloed van architectuur op de levensduur van een gebouw kan echter groot zijn. Het meenemen van de architectonische kwaliteit in de berekening van de ESL-factor zal dus onderzocht moeten worden. De omgevingskwaliteit betreft de omgeving van het gebouw en niet het gebouw zelf. Er is geen relatie met de draagconstructie van een gebouw en daarom zal deze kwaliteit buiten beschouwing worden gelaten.

Geconcludeerd kan worden dat voor de bepaling van de ESL-factor voor de draagconstructie alleen de aspecten architectonische kwaliteit en flexibiliteit meetellen. In het kader van dit onderzoek wordt echter in plaats van flexibiliteit gesproken over veranderbaarheid, waaronder flexibiliteit en aanpasbaarheid vallen.

6.3 Vergelijkingsmethode voor de tool

Het doel van de te ontwerpen tool is het vergelijken van verschillende constructief ontwerpen op duurzaamheid. Concluderend uit de voorgaande paragrafen is gebleken dat de jaarlijkse milieukosten een goede basis zijn voor het vergelijken van een gebouw. Het bepalen van de jaarlijkse milieukosten bestaat uit twee onderdelen:

1. Het bepalen van de totale milieukosten van het gebouw
2. Het bepalen van de werkelijke levensduur van het gebouw

6.3.1 Totale milieukosten

Op basis van het constructief ontwerp zullen de totale milieukosten moeten worden berekend. De milieukosten worden hoofdzakelijk bepaald door het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik. Hergebruik heeft hierin tevens een grote rol. Op basis van een constructief ontwerp kan een inschatting gemaakt worden van het materiaalgebruik. De draagconstructie zelf beslaat ongeveer 60% van het totale materiaalgebruik van een gebouw, zie 3.3.2. Aan de hand van de geometrie van het ontwerp en enkele gemiddelden, kan tevens het materiaalgebruik in de gevel en overige elementen bepaald worden. Vervolgens kunnen de milieukosten voor het materiaalgebruik worden bepaald. Voor het energie- en waterverbruik kan op eenzelfde wijze worden omgegaan bij het bepalen van de hoeveelheden en de milieukosten.

Het is waarschijnlijk dat er systematische afwijkingen voorkomen in deze methode. Deze kunnen deels worden opgelost, door te werken met relatieve scores, zie 6.1.

Het onderzoek naar de methode voor de bepaling van de milieukosten van een gebouw, op basis van het constructieve ontwerp, wordt in hoofdstuk 7 behandeld.

6.3.2 De werkelijke levensduur

De werkelijke levensduur wordt berekend door de levensduur van een gebouw te vermenigvuldigen met de ESL-factor. In 'The Sustainable Office' (Dobbelsteen van de, 2004) worden een aantal mogelijkheden voorgesteld voor het bepalen van de ESL-factor. Zo kan bijvoorbeeld een factor worden berekend voor het horizontale draagvermogen, door het draagvermogen van de vloeren van het ene ontwerp te delen door die van het andere ontwerp. Op deze wijze wordt een factor verkregen voor het horizontale draagvermogen. Deze methode kan op meerdere onderdelen van de draagconstructie worden toegepast. Saari & Heikilä (2003) introduceerden de 'Flexibility Degree' (FlexD). Deze factor wordt berekend door de verhouding tussen de kosten van renovatie en de bouwkosten voor een nieuw gebouw van 1,0 af te trekken.

Beide methoden zijn niet geschikt voor de beoogde toetsingsmethode. De bedoeling is om voor een losstaand constructief ontwerp een inschatting te maken van de jaarlijkse milieukosten. Door deze jaarlijkse milieukosten te vergelijken met een alternatief constructief ontwerp, kan op basis hiervan een beoordeling worden gegeven van de ontwerpen. Bij de eerste methode zijn meerdere ontwerpen nodig om de factoren te berekenen. Het bepalen van de FlexD is te ingewikkeld en tevens heeft de hierbij verkregen factor geen enkele relatie met de levensduur van een gebouw.

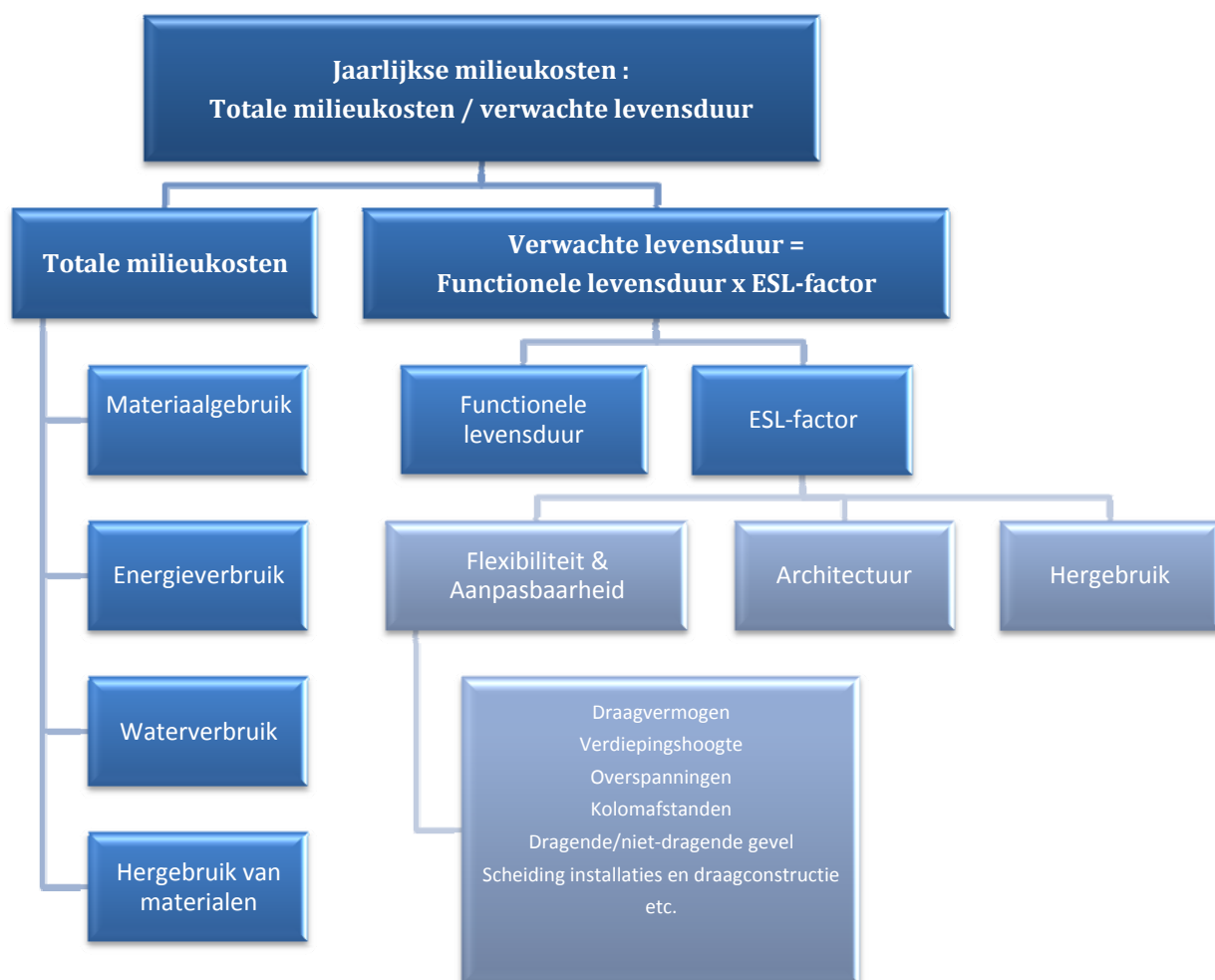
De ESL-factor zal op een andere wijze bepaald moeten worden. Het onderzoek hiernaar wordt behandeld in hoofdstuk 8.

6.4 Schema beoordelingsmethode

Met het verkregen inzicht over het beoordelen van de draagconstructie op duurzaamheid, is schematisch een overzicht gemaakt van de beoordelingsmethode, zie Figuur 6.7 op de volgende pagina.

De werking is als volgt:

Op basis van het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik en het hergebruik van materialen worden de totale milieukosten bepaald. Daarnaast wordt de ESL-factor bepaald uit de verschillende aspecten die invloed hebben op de levensduur van een gebouw. De verwachte levensduur wordt bepaald door de functionele levensduur van het gebouw te vermenigvuldigen met de ESL-factor. Vervolgens kunnen de jaarlijkse milieukosten worden uitgerekend door de totale milieukosten te delen door de verwachte levensduur. Verschillende constructief ontwerpen kunnen op basis van deze jaarlijkse milieukosten worden vergeleken.



Figuur 6.7: Schematische weergave van de beoordelingsmethode

7 Bepaling milieukosten

De milieukosten van een gebouw kunnen worden bepaald uit het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik. Omdat een constructief ontwerp wordt beoordeeld en niet het gebouw als geheel, zijn niet alle onderdelen, welke van invloed zijn op de milieukosten, bekend.

Het materiaalgebruik in kantoren wordt voor ongeveer 60% bepaald door de draagconstructie, zie 3.3.2. Aan de hand van een constructief ontwerp is het mogelijk dit materiaalgebruik te berekenen. Met gegevens van het NIBE, waarin het materiaalgebruik wordt gekoppeld aan de milieukosten, kunnen de milieukosten worden berekend. Vervolgens moet een inschatting worden gemaakt van de overige materiaalkosten voor het gebouw. Deze bestaan voor ongeveer 15% uit de afbouw van de constructie, voor ongeveer 10% uit de ingebouwde componenten, voor 16,7% uit de afwerking en voor 1,4% uit terreinverharding. Daarnaast dient tevens het hergebruik van materialen in beschouwing te worden genomen. Over de installaties betreffende de energie- en watervoorziening is in het geval van een constructief ontwerp weinig informatie bekend. Ook hier zal dus een inschatting moeten worden gedaan.

De methode voor het bepalen van de milieubelasting van een gebouw op basis van een constructief ontwerp wordt in dit hoofdstuk onderzocht. Allereerst volgt een korte uiteenzetting over de milieueffecten die worden meegenomen in de berekening van de milieukosten. Vervolgens wordt er gekeken naar de methode voor het bepalen van de milieukosten van een gebouw, op basis van een constructief ontwerp. De werking van GreenCalc+ is hierbij het startpunt van het onderzoek⁶.

7.1 Milieueffecten en milieukosten

Op basis van de toegepaste hoeveelheden materiaal en het jaarlijkse energie- en waterverbruik worden voor een gebouw de hierbij optredende milieueffecten bepaald. Zoals in 4.3 is vermeld, maken de huidige toetsingsinstrumenten (nu nog) gebruik van verschillende milieudata. Dit is ongewenst, aangezien dit leidt tot afwijkingen in de resultaten tussen de verschillende methoden bij het bepalen van de milieuscore van een gebouw. De harmonisatie van de milieudata, op initiatief van de marktpartijen, heeft geresulteerd in een nationale materialendatabase waaruit de verschillende toetsingsinstrumenten binnenkort hun gegevens uit halen. Tevens heeft de harmonisatie ervoor gezorgd dat bestaande verschillen tussen de milieueffecten, die het TWIN²⁰⁰²-model en de MRPI meenemen in de beoordeling van een product niet meer bestaan.

De huidige beoordeling in GreenCalc+ is gebaseerd op het TWIN²⁰⁰²-model. Dit model beoordeelt de bouwmaterialen, bouwproducten en bouwelementen over de gehele levensduur op de volgende milieueffecten:

Milieueffecten	Eenheid
Emissies	
Broeikaseffect (100j)	kg CO ₂ eq.
Ozonlaagaantasting	kg CFC-11 eq.
Humane toxiciteit	kg 1.4-DB eq.
Aquatische toxiciteit (zoet water)	kg 1.4-DB eq.
Terrestische toxiciteit	kg 1.4-DB eq.
Fotochemische oxidantvorming	kg C ₂ H ₄ eq.
Verzuring	kg SO ₂ eq.

⁶ GreenCalc+ is in een gelijklopend onderzoek gekozen als de beste methode om de te ontwikkelen tool in te integreren, zie 9.1. Om deze reden zal de werking van GreenCalc+ worden onderzocht.

Eutrofiering	kg PO4 eq.
Uitputting	
Biotische grondstoffen	mbp
Abiotische grondstoffen	kg Sb eq
Energiedragers	kg Sb eq
Landgebruik	PDF.m2.jr
Hinder t.g.v.	
Stank	OTV m3
Geluid door wegtransport	DALY
Geluid door productieprocessen	mbp
Licht	mbp
Kans op calamiteiten	mbp

Tabel 7.1: Milieueffecten die door GreenCalc+ worden meegenomen

Met de harmonisatie van de milieudata is een standaard bepaald voor de, in de beoordeling mee te nemen, milieueffecten. De onderstaande tabel geeft deze milieueffecten weer. In tegenstelling tot het TWIN²⁰⁰²-model worden de aspecten 'Hinder' en 'Landgebruik' niet meer meegenomen in de beoordeling. Daarnaast is de uitputting van de biotische grondstoffen en energiedragers buiten beschouwing gelaten. Tot slot wordt de aquatische toxiciteit nu voor zowel zoet als zout water beoordeeld.

Voor elk van de onderstaande milieueffecten is een schaduwprijs bepaald. Dit zijn de kosten die gemaakt zouden moeten worden om de milieueffecten te compenseren. Een verplichting om die kosten feitelijk te maken, bestaat nog niet, maar kan in de toekomst worden overwogen. Aan de hand van de schaduwrijzen en de berekende materiaalhoeveelheden in de draagconstructie kunnen de milieukosten voor de draagconstructie worden berekend. Hiervoor worden de materiaalhoeveelheden omgerekend naar hoeveelheden milieueffecten. De in de ontwerptool gehanteerde gegevens voor de berekening van de milieueffecten komen uit de harmoniseerde materialendatabase. In bijlage 2.2 zijn deze gegevens weergegeven. Opvallend is dat de schaduwprijs voor aquatische toxiciteit (zout water) op nul is gesteld. Het effect wordt op dit moment dus niet doorberekend in de milieukosten.

Milieueffecten	Eenheid	Schaduwprijs [€ / kg equivalent]
Emissies		
Broeikaseffect (100j)	kg CO2 eq.	€ 0,05
Ozonlaagaantasting	kg CFC-11 eq.	€ 30,-
Humane toxiciteit	kg 1.4-DB eq.	€ 0,09
Aquatische toxiciteit (zoet water)	kg 1.4-DB eq.	€ 0,03
Aquatische toxiciteit (zout water)	kg 1.4-DB eq.	€ 0,-
Terrestische toxiciteit	kg 1.4-DB eq.	€ 0,06
Fotochemische oxidantvorming	kg C2H4 eq.	€ 2,-
Verzuring	kg SO2 eq.	€ 4,-
Eutrofiering	kg PO4 eq.	€ 9,-
Uitputting		
Abiotische grondstoffen	kg Sb eq	€ 0,16

Tabel 7.2: Nederlandse schaduwrijzen (weegfactoren) voor de milieueffect-categorieën, genoemde getallen zijn onderdeel van veranderingsprocessen. Gegevens verkregen van dhr. Michiel Haas.

7.2 Berekening milieukosten van een gebouw met GreenCalc+

GreenCalc+ biedt met de 'Gebouw Wizard' de mogelijkheid om aan de hand van de invoer van het gebouwtype, gebruiksfunctie, aantal gebruikers en vervolgens de gebouwafmetingen en het aantal bouwlagen een beoordeling te geven over de milieuprestatie van een gebouw. Hiervoor worden de instellingen van een voorbeeldgebouw gekoppeld aan de ingevoerde gegevens. De laatste stap van de invoer is het instellen van het energie- en waterconcept, waarmee de toegepaste installaties worden vastgelegd.

Op basis van de bovengenoemde invoer wordt een gebouw samengesteld. Van dit gebouw worden de milieukosten van de toegepaste materialen, het energie- en waterverbruik over de gehele levensduur van het gebouw berekend. Indien benodigd kunnen de ingevoerde gegevens worden aangepast en is het hiermee mogelijk om invloed uit te oefenen op de milieuprestatie. Hieronder worden de berekeningen van het materiaalgebruik nader toegelicht. Voor de berekening van het energie- en waterverbruik wordt verwezen naar 4.3.1.2.

7.2.1 Materiaalgebruik

Voor het bepalen van de milieubelasting ten gevolge van het materiaalgebruik in een gebouw wordt, op dit moment, gebruik gemaakt van het TWIN²⁰⁰²-model. Op basis van de hoeveelheden toegepast materiaal worden de milieukosten berekend. De materiaalhoeveelheden kunnen op verschillende wijzen worden ingevoerd. Door de gegevens, ingevoerd in de 'Gebouw Wizard', te koppelen aan een voorbeeldgebouw worden automatisch de bijbehorende toegepaste materiaalhoeveelheden berekend. Deze materiaalhoeveelheden kunnen uiteraard naar eigen inzicht worden aangepast. Het is tevens mogelijk om de 'Gebouw Wizard' over te slaan en zelf alle benodigde gegevens in te voeren. Daarnaast kan van het ingevoerde gebouw een referentiegebouw worden gegenereerd, zodat er een vergelijking kan worden gemaakt van de milieuprestatie van het gebouw ten opzichte van hetzelfde gebouw, maar dan gebouwd met de materialen en methoden uit 1990, zie 7.2.1.2.

Bij het gebruik van GreenCalc+ is het belangrijk om de achtergrond van de berekeningen te kennen. De berekeningen van de materiaalhoeveelheden voor de voorbeeldgebouwen en de referentiegebouwen zullen hieronder dan ook nader worden toegelicht.

7.2.1.1 Voorbeeldgebouwen

In de gebouwcatalogus kan er gekozen worden uit verschillende voorbeeldgebouwen met verschillende materiaalindex-ranges. De volgende typen voorbeeldgebouwen zijn beschikbaar:

- Kantoor
- Basisschool
- Rijwoning
- Twee-onder-één kap
- Vrijstaand
- Appartementgebouw

De materiaalindex geeft een bepaald duurzaamheidsniveau aan voor de toegepaste materialen. Door een voorbeeldgebouw te kiezen met een bepaalde index-range, wordt het in de wizard gemodelleerde gebouw opgebouwd met materialen die een index binnen de gekozen range genereren.

De toegepaste materiaalhoeveelheden zijn gebaseerd op reeds gerealiseerde gebouwen, waarvan het materiaalgebruik in GreenCalc is ingevoerd en bewaard. Van dit materiaalgebruik zijn de materiaalhoeveelheden van de fundering, gevels, binnenwanden, vloeren, daken en inrichting van het voorbeeldgebouw teruggerekend naar hoeveelheden per m² BVO, met uitzondering van de producten die een schilfunctie hebben. Deze zijn teruggerekend naar hoeveelheden per m² begane grondvloer, dak en gevel. De toegepaste installaties zijn hierin niet opgenomen, evenals de gegevens

betreffende energie, water en mobiliteit. Deze zullen met de 'Gebouw Wizard' opnieuw worden ingevoerd.

Naast de standaard voorbeeldgebouwen met de index-ranges is het mogelijk om eigen gebouwen toe te voegen aan de gebouwcatalogus. Hierop wordt later teruggekomen.

7.2.1.2 Referentiegebouwen

Van een gebouwoontwerp is het mogelijk om een referentiegebouw te genereren. Voor een kantoorgebouw is dit referentiegebouw bijvoorbeeld een kantoorgebouw uit het jaar 1990. Het is een fictief gebouw dat voor hetzelfde aantal mensen is ontworpen, met als verschil dat het gebouwd is volgens een aantal standaardprincipes uit het jaar 1990. Qua ontwerp is het referentiekantoor traditioneel gebouwd, met een betonnen draagstructuur en met traditionele gemetselde gevels. Functioneel is het gebouw ingedeeld in 'kantoorcellen'. De installaties en de isolatiewaarde zijn niet zo goed als tegenwoordig is vereist. De levensduur van het referentiekantoor is standaard 35 jaar.

Voor het automatisch bepalen van de milieukosten van het referentiegebouw wordt gebruik gemaakt van de zogenoemde getrapte 'glijdende' referentie (gebaseerd op het model van Ir. A. van den Dobbelsteen, TU Delft.), ook wel de FTE referentie genoemd, zie 6.1.1.

Bij een automatisch gegenereerde referentiekantoor wordt het aantal fulltime-equivalent (FTE) van het te beoordelen gebouw als basis genomen voor de referentie. Afgestemd op dit aantal FTE wordt vervolgens een fictief gebouw ontworpen. Het ontwerp van het te beoordelen gebouw wordt, indien dit afwijkt van de vorm van het referentiegebouw, niet overgenomen. Hieruit volgt dat het referentiegebouw een andere geometrie, gevelinvulling en inrichting heeft, maar hetzelfde aantal FTE als het te beoordelen gebouw.

Het referentiegebouw voor kantoren is een langwerpig rechthoekig gebouw. Voor het berekenen van de materiaalhoeveelheden zijn formules bepaald, welke een benadering geven van de hoeveelheden toegepast materiaal. De belangrijke parameters hierin zijn het bruto vloeroppervlak (BVO) en het aantal bouwlagen. De formules zijn dusdanig gekozen dat de constructie 'groeit' naarmate het te beoordelen gebouw meer verdiepingen krijgt. Veel van deze formules zijn gebaseerd op benaderde gegevens uit het kostenmodel PARAP, dat i.o.v. de Rijksgebouwendienst is ontwikkeld. Indien de vorm van het beschouwde ontwerp afwijkt van het referentiegebouw dient men te beseffen dat een vergelijking tussen beiden niet correct is. De functionele eenheid komt in dit geval niet overeen.

7.2.2 Conclusie

Door gebruik te maken van de 'Gebouw Wizard' en de voorbeeldgebouwen uit de gebouwcatalogus, kan op een eenvoudige wijze een gebouw worden gegenereerd en de milieukosten voor het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik worden berekend.

Aan de hand van de voorbeeldgebouwen kunnen de totale milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik worden bepaald. Deze bepaling is een benadering van de werkelijkheid, aangezien het ontwerp van het voorbeeldgebouw zal afwijken van het te beschouwen gebouw. Voor een benadering van de onbekende 40% van de materiaal-milieukosten is deze berekeningswijze goed toepasbaar. Door het gebruik van de wizard worden de kosten voor elk ontwerp op een eenvoudige en eenduidige wijze berekend en is de afwijking voor elk ontwerp gelijk.

Voor de bepaling van de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie is een berekening met behulp van een voorbeeldgebouw echter niet geschikt. De materiaalkosten van de draagconstructie vormen een belangrijk aandeel in de totale milieukosten van een gebouw. De voorbeeldgebouwen uit de gebouwcatalogus berekenen op basis van het bruto vloeroppervlak en het geveloppervlak de toegepaste materiaalhoeveelheden. Gezien het grote aandeel van de draagconstructie op de milieukosten, is een gedetailleerde berekening van het materiaalgebruik noodzakelijk, in plaats van een globale berekening zoals die nu wordt uitgevoerd.

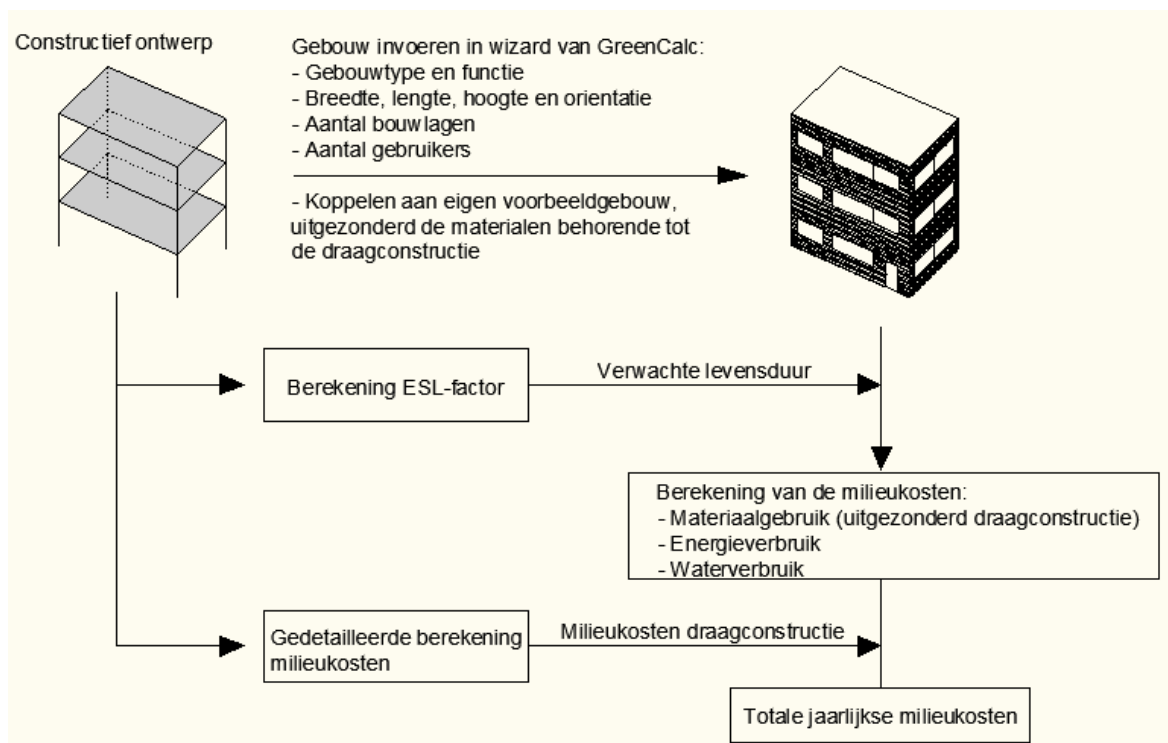
7.3 Model voor de berekening van de milieukosten

Op basis van een constructief ontwerp zal een beoordeling moeten worden gegeven over de duurzaamheid van een gebouw. Deze beoordeling zal worden gebaseerd op de jaarlijkse milieukosten, zie paragraaf 6.3. Deze jaarlijkse milieukosten resulteren uit de verwachte levensduur, zie hoofdstuk 8, van het gebouw en de totale milieukosten van het gebouw. Het model voor de bepaling van de totale milieukosten is hieronder beschreven.

Voor het bepalen van de totale milieukosten van een gebouw zullen de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik moeten worden bepaald. De benodigde invoer hiervoor dient echter eenvoudig en niet tijdrovend te zijn. De GreenCalc+ methodiek is in dit opzicht hiervoor uitermate geschikt.

Uit de vorige paragraaf is gebleken dat een gedetailleerde berekening van het materiaalgebruik in de draagconstructie is vereist, gezien het aandeel ervan op het totale materiaalgebruik in een gebouw ($\pm 60\%$). Van het overige materiaalgebruik in het gebouw zal een benadering moeten worden gemaakt.

Omdat het materiaalgebruik van de draagconstructie gedetailleerd dient te worden uitgerekend, zal gebruik worden gemaakt van de mogelijkheid om eigen voorbeeld gebouwen te creëren. Door de elementen, behorende tot de draagconstructie van het gebouw, te verwijderen uit een voorbeeldgebouw kunnen de totale milieukosten, met uitzondering van het materiaalgebruik van de draagconstructie, worden berekend. Door vervolgens de milieukosten ten gevolge van het materiaalgebruik in de draagconstructie apart gedetailleerd te berekenen, en hierbij de berekende milieukosten van GreenCalc+ te voegen, zijn de totale milieukosten voor het beschouwde gebouw op de juiste wijze bepaald. Inclusief het meenemen van de verwachte levensduur van een gebouw leidt dit tot een model, waarmee de jaarlijkse milieukosten kunnen worden bepaald en daarmee de duurzaamheid van een constructief ontwerp kan worden beoordeeld, zie onderstaande figuur.



Figuur 7.1: Model van de berekening van de totale milieukosten van een constructief ontwerp

7.4 Uitwerking model

Op basis van een constructief ontwerp zullen de milieukosten worden berekend voor het te realiseren gebouw. Hierbij zal gebruikt worden gemaakt van GreenCalc+ om het gebouw, uitgezonderd de draagconstructie, door te rekenen en de milieukosten ervan te bepalen. Daarnaast zullen de milieukosten van de draagconstructie op een eenvoudige en gedetailleerde wijze moeten worden bepaald. Hiervoor zal een programma worden ontwikkeld, dat in de te ontwikkelen tool wordt ondergebracht.

7.4.1 GreenCalc+

Met behulp van de 'Gebouw Wizard' wordt het beschouwde gebouw ingevoerd. Vervolgens wordt het gebouw gekoppeld aan één van de aangepaste voorbeeldgebouwen. Deze zijn zodanig aangepast, dat de onderdelen van de draagconstructie zijn verwijderd uit de constructie. Aangezien sommige onderdelen van de draagconstructie een schilfunctie hebben, beïnvloed het verwijderen van deze elementen de energiehuishouding. Dit kan echter worden voorkomen door het toevoegen van fictieve elementen, met eenzelfde Rc-waarde als de verwijderde elementen. De milieukosten van deze elementen zijn op nul gesteld, zodat deze niet bijdragen aan de totale milieukosten van het gebouw. Aan de hand van deze methode blijft het energieverbruik gelijk en is de draagconstructie verwijderd uit de berekening.

Na de koppeling van het ingevoerde gebouw aan een voorbeeldgebouw, kan er een energie- en waterconcept worden gekozen. In principe is de gebruiker vrij in de keuzes ter bepaling van het energie- en waterconcept. Voor de vergelijking van de constructieve alternatieven dienen deze instellingen echter wel gelijk te zijn. Door te kiezen voor milieuvriendelijke installaties en voorzieningen zullen de milieukosten ten gevolge van het energieverbruik lager uitvallen dan bijvoorbeeld middelmatige milieuvriendelijke voorzieningen. Als gevolg hiervan neemt het belang van de materiaalkosten in de totale milieukosten toe.

7.4.1.1 Uitvoer GreenCalc+

GreenCalc+ berekent de milieukosten voor de onderdelen materiaalgebruik, energieverbruik, waterverbruik en mobiliteit. Mobiliteit wordt echter niet meegenomen bij de beoordeling van een gebouw. Vanuit GreenCalc+ kunnen de resultaten geëxporteerd worden naar Excel. Een voorbeeld van zo'n geëxporteerde berekening is te zien in bijlage 2.1.

De uitvoer van de berekening wordt als volgt gepresenteerd:

- Enkele kenmerken van het gebouw.
- De totale milieukosten van het gebouw, opgesplitst in milieukosten per jaar per onderdeel (materiaalgebruik en energie- en waterverbruik en mobiliteit) en de milieukosten voor het ontwerp per milieueffectcategorie.
- Overzicht van de milieukosten per onderdeel.

De geëxporteerde resultaten zullen geïmporteerd moeten kunnen worden in de ontwerptool, zodat deze kunnen worden verwerkt in de berekening van de jaarlijkse milieukosten. De ontwerptool maakt gebruik van gegevens uit de geharmoniseerde database, terwijl de gegevens van GreenCalc+ gebaseerd zijn op het TWIN²⁰⁰²-model. Daarnaast verschillen tevens de gehanteerde schaduw prijzen. Hierdoor kunnen de resultaten van GreenCalc+ niet rechtstreeks worden overgenomen⁷.

Aangezien de herkomst van de jaarlijkse milieukosten voor het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik niet uit de resultaten van GreenCalc+ valt te halen, worden deze gegevens wel rechtstreeks overgenomen. De milieukosten voor het ontwerp kunnen worden herberekend door de effecten, welke behoren bij de nieuwe standaard, over te nemen en te vermenigvuldigen met de

⁷ Met de aankomende update van GreenCalc+, gepland eind 2010, zal de geharmoniseerde database worden geïmplementeerd.

schaduw prijzen uit Tabel 7.2. Deze gegevens zullen vervolgens aan de milieukosten, berekend voor het materiaalgebruik in de draagconstructie, worden toegevoegd.

7.4.2 Berekening materiaalhoeveelheden draagconstructie

De materiaalhoeveelheden van de draagconstructie dienen op een eenvoudige en gedetailleerde wijze te worden bepaald. Voor een eenduidige vergelijking van de verschillende constructieve ontwerpen is het belangrijk dat de functionele eenheid voor elk ontwerp gelijk is. De gehanteerde functionele eenheid is: een volledig functionerend en afgewerkt gebouw. Bij de bepaling van het materiaalgebruik zal hiermee rekening moeten worden gehouden. Dit aspect komt naar voren bij de bepaling van benodigde invoergegevens voor de gevel (7.4.2.4) en de stabiliteitsvoorzieningen (7.4.2.5).

De berekening van de milieukosten van de draagconstructie kan worden opgesplitst in de verschillende onderdelen van de draagconstructie. Per onderdeel dienen de materiaalhoeveelheden te worden berekend. Deze materiaalhoeveelheden zullen vervolgens worden verwerkt tot milieukosten. De draagconstructie wordt opgesplitst in de volgende onderdelen:

- Fundering
- Kolommen
- Wanden
- Liggers
- Vloeren/Dak
- Gevel
- Stabiliteitsvoorzieningen

De benodigde invoer voor de bovenstaande onderdelen wordt hieronder vastgelegd en zal als basis dienen voor de ontwerptool.

7.4.2.1 Fundering, kolommen en liggers

De benodigde invoer voor de fundering, kolommen en liggers is afhankelijk van de doorsnede van het in te voeren element en van de materiaalkeuze. De standaard invoer voor alle elementen is:

- Lengte element [m]
- Aantal stuks [-]

Doorsnede element

De doorsnede van het in te voeren element bepaald, samen met de materiaalkeuze, de benodigde invoer. De meest voorkomende bouwelementen hebben een rechthoekige of ronde doorsnede of hebben een bepaald profiel. Indien er een rechthoekig element wordt ingevoerd is de benodigde invoer:

- Breedte [mm]
- Hoogte [mm]

Voor een element met een ronde doorsnede is dit:

- Straal [mm]

Indien een stalen profiel wordt ingevoerd is de benodigde invoer:

- Gewicht [kg/m]

Materiaalkeuze

De keuze uit de materialen is afhankelijk van de beschikbare gegevens uit de materialen database, welke zijn weergegeven in bijlage 2.2. Indien er gekozen wordt voor een betonnen element zullen de volgende gegevens moeten worden ingevoerd, naast de benodigde invoer welke afhankelijk is van de doorsnede van het element:

- Wapeninghoeveelheid [kg/m^3]
- Hoeveelheid toegepast betongranulaat [%]

Bij een keuze voor een ander materiaal, hout of staal, is de invoer enkel afhankelijk van de doorsnede van het element.

7.4.2.2 Wanden

De benodigde invoermogelijkheden zijn als volgt:

- Breedte [mm]
- Hoogte [mm]

In een constructief ontwerp kan er gekozen worden voor dragende en niet-dragende wanden. Standaard worden door GreenCalc+ niet-dragende binnenwanden meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik in het gebouw. Indien dragende wanden zijn toegepast, zal een correctie moeten plaatsvinden op de milieukostenberekening betreffende de materiaalhoeveelheden in de niet-dragende wanden. Dit ten behoeve van het behoud van de functionele eenheid.

7.4.2.3 Vloeren - Dak

De invoermogelijkheden, behorende bij de fundering, kolommen en liggers, zijn tevens bij de invoer van de vloeren en het dak noodzakelijk, zodat de mogelijkheden voor het invoeren van de elementen maximaal zijn. Daarnaast zullen verschillende vloerentypen moeten worden kunnen ingevoerd. De standaard invoer voor de vloeren en het dak is:

- Oppervlak van de vloer/dak [m^2]
- Aantal stuks [-]

In het geval het geval van een in situ gestorte vloer of een prefab vlakke plaatvloer, zijn de extra benodigde invoergegevens:

- Dikte vloer [mm]
- Wapeningshoeveelheid [kg/m^3]
- Hoeveelheid toegepast betongranulaat [%]

Indien de vloer is opgebouwd uit prefab elementen zijn de volgende gegevens benodigd:

- Gewicht inclusief voegvulling [kg/m^2]
- Wapeningshoeveelheid [kg/m^3]
- Hoeveelheid toegepast betongranulaat [%]

7.4.2.4 Gevel

In een constructief ontwerp kan er gekozen worden voor een dragende en een niet-dragende gevel. Een dragende gevel bestaat uit een dragend binnenblad, met daarop aangebracht het isolatiemateriaal en daarvoor het buitenblad. Het dragende binnenblad zal worden meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik in de draagconstructie. Indien een niet-dragende gevel is toegepast, behoort het binnenblad niet tot de draagconstructie. Ten behoeve van het behoud van de functionele eenheid zal echter toch het binnenblad moeten worden meegerekend.

Voor zowel de dragende als de niet-dragende gevel is de benodigde invoer het volgende:

- Geveloppervlak [m^2]
- Verhouding openingen in gevel met geveloppervlak [%]
- Dikte binnenblad [mm]
- Materiaal
- Aantal [-]

Omdat in het geval van een dragende gevel het binnenblad vaak met een console over de lengte van de gevel is uitgevoerd, is het mogelijk om tevens rechthoekige elementen in te voeren.

7.4.2.5 Stabiliteitsvoorzieningen

De keuze voor de stabiliteitsvoorzieningen bestaan uit windverbanden, portaalwerking, stabiliteitskernen en stabiliteitswanden. Indien in het ontwerp de stabiliteit wordt verzorgd door een kern, zal erop moeten worden gelet dat de functionele eenheid behouden blijft. In tegenstelling tot een betonnen kern, is in het geval van een stalen uitvoering de kern namelijk een skelet. In dit geval zal de kern met binnenwanden worden dichtgezet. Met het oog op het behoud van de functionele eenheid, zullen deze wanden moeten worden meegenomen in de beoordeling.

De benodigde invoer indien de stabiliteit wordt verzorgd door een kern is als volgt:

- Oppervlakte van de doorsnede van de kern [m^2]
- Hoogte van de kern [m]
- Verhouding sparingen in kern met kernoppervlak [%]
- Materiaal
- Aantal [-]

In het geval van een stalen kern geldt de bovenstaande invoer voor de niet-dragende binnenwanden en zullen daarnaast de stalen profielen moeten worden ingevoerd. De windverbanden en stabiliteitswanden kunnen worden ingevoerd als rechthoekige en ronde elementen en als profielen. De benodigde invoer voor deze elementen is gegeven in 7.4.2.1.

8 Bepaling ESL-factor

De verwachte levensduur van een gebouw is te bepalen aan de hand van de ESL-factor, zie 6.2.1. De ESL-factor is een indicator van de impact van de verschillende aspecten die invloed hebben op de levensduur van een gebouw. De factor zal worden bepaald aan de hand van de volgende methode:

- Het gebruik van ESL categorieën, gebaseerd op beslissende factoren voor de levensduur van een gebouw.

Voor het bepalen van de ESL-factor wordt uitsluitend gekeken naar de veranderbaarheid en de architectuur van een gebouw, zie 6.2.2. Aangezien er vele factoren zijn die in meer of mindere mate invloed hebben op de levensduur van een gebouw en deze niet allemaal kunnen worden onderzocht in het tijdsbestek van dit afstudeeronderzoek, is het belangrijk om een afbakening te maken in de te onderzoeken factoren.

8.1 Onderdelen ESL-factor

De levensduur van een gebouw kan worden verlengd wanneer het gebouw geschikt is voor hergebruik. Hergebruik van een gebouw is afhankelijk van de mate van veranderbaarheid en de architectonische kwaliteit, zie 5.3.1.1 en 5.3.1.2. Door in het ontwerp rekening te houden met toekomstige ontwikkelingen, zoals functiewisselingen en/of uitbreidingen, wordt de economische en technische levensduur van het gebouw verlengd. Een gebouw zal dan niet gesloopt of ingrijpend verbouwd worden, maar tegen relatief lage kosten kunnen worden aangepast om aan de vernieuwde eisen te voldoen.

8.1.1 Functiewisseling

In het kader van dit onderzoek wordt niet naar alle mogelijke gebruiksfuncties gekeken, maar worden enkel de meest relevante gebruiksfuncties behandeld. De mogelijke gebruiksfuncties zijn de volgende:

- Woonfunctie
- Kantoorfunctie
- Winkelfunctie
- Logiesfunctie
- Onderwijsfunctie

Bij hergebruik van gebouwen is afstemming en aanpassing van het gebouw en de functie op elkaar van belang. Interne flexibiliteit, ofwel de herinrichtbaarheid, functionele flexibiliteit en aanpasbaarheid hebben invloed op de mogelijkheid tot functiewisseling. Om te voldoen aan de eisen die het gebruik stelt aan een gebouw, moet worden voldaan aan twee primaire voorwaarden:(17)

1. Om een gebouw te kunnen gebruiken moet het gebouw de voor de functie benodigde ruimten bevatten.
2. Het gebouw moet voldoende sterk zijn om de door de functie veroorzaakte krachten en gewicht te kunnen weerstaan.

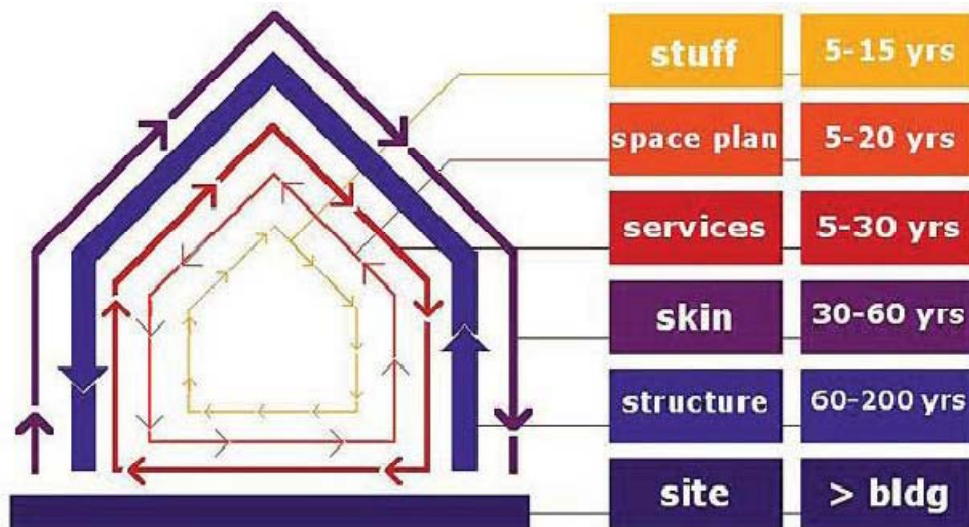
Aan deze voorwaarden kan nog een derde voorwaarde worden toegevoegd, namelijk:

3. De voor het gebruik benodigde installaties dienen aanwezig te zijn in het gebouw of aangebracht kunnen worden.

Om de eigenschappen van de constructie meer in detail te kunnen beoordelen en te kwantificeren, kan een eenvoudig gebouwmodel worden gebruikt. Steward Brand (1994) en Bernard Leupen (2002) definieerden al eerder gebouwmodellen waarin verschillende 'gebouwlagen' worden onderscheiden, elk met een eigen specifieke functie. Met deze modellen wordt het mogelijk (on)veranderbaarheid en levensduur nader te beschouwen. De hier onderscheiden 'gebouwlagen' zijn:

- Constructie: kolommen, balken, dragende vloeren, fundering, enz.

- Gebouwschil: gevels, dak, scheiding tussen binnen en buiten
- Installaties: leidingen, systemen voor energie, water, enz. en de ruimten waar ze zich bevinden.
- Ruimteplan: Scheidingswanden, deuren, plafonds, inrichting, afwerking
- Ontsluiting: trappen, liften, gangen en galerijen



Figuur 8.1: De gebouwlagen die Brand onderscheidt(18)

Op basis van de drie bovengenoemde voorwaarden en de onderscheiden 'bouwlagen', is er gekozen om de beoordeling van een constructief ontwerp op duurzaamheid, te baseren op de volgende aspecten:

- Draagvermogen
- Verdiepingshoogte
- Overspanningen
- Dragende elementen in de plattegrond
- Positie van schachten en trappen
- Flexibele integratie of scheiding van draagconstructie en installaties
- Stramienmaten: constructie, gevel, ramen
- Meerdere ingangen, trappenhuizen, liften en faciliteitgroepen en schachten.

De architectonische kwaliteit kan van grote invloed zijn op de levensduur van een gebouw. Dit aspect wordt apart behandeld, zie 8.4.1.

8.1.2 Uitbreiding

Het rekeningen houden met toekomstige uitbreiding is mogelijk door een overmaat te creëren in ruimte. Daarnaast is het mogelijk om voorbereidingen te treffen in het ontwerp op een mogelijke uitwaartse, horizontale of verticale uitbreiding. Dit betreft de externe flexibiliteit. Ook hier kunnen enkele primaire voorwaarden worden opgesteld voor het mogelijk maken van een uitbreiding.

1. Bij horizontale en verticale uitbreiding moet het gebouw voldoende sterk zijn om de extra veroorzaakte krachten te kunnen weerstaan.
2. De uitbreidingen moeten zonder ingrijpende verbouwing mogelijk zijn.

Uit deze voorwaarden kan worden opgemaakt dat de volgende aspecten van groot belang zijn op de levensduur van een gebouw. Dit zijn:

- Voorbereidingen treffen op toekomstige uit- of opbouw
- Draagvermogen.

8.2 Methode voor kwantificering factoren

Voor de bovengenoemde aspecten zal de invloed op de levensduur van een gebouw worden beoordeeld. Hierbij komen een aantal problemen/uitdagingen naar voren, waarmee op een verstandige wijze dient te worden omgegaan.

De verwachte levensduur van een gebouw is afhankelijk van het uitgangspunt voor de levensduur van een gebouw. In GreenCalc+ bijvoorbeeld, wordt voor een kantoorgebouw de standaard levensduur op 35 jaar⁸ gesteld. Echter is de keuze voor deze levensduur niet goed onderbouwd. Toch zal de tool deze gegevens, in overeenkomst met GreenCalc+, toepassen in de berekeningen. Hierbij is aangenomen dat deze gegevens de gemiddelde levensduur van een gebouw, afhankelijk van de gebruiksfunctie, benaderen, zie ook 8.3.

De formule voor de berekening van de ESL-factor is als volgt opgebouwd: $ESL\text{-factor} = A * B * C * \dots$. De factoren A, B, C etc. behoren bij de te behandelen aspecten. Een wetenschappelijke onderbouwing van de verschillende factoren is moeilijk realiseerbaar. Ten eerste omdat de levensduur van een gebouw afhankelijk is van vele factoren, onderlinge verbanden van factoren en invloeden van buitenaf. Dit maakt het moeilijk om een validatie uit te voeren om te controleren of het model correct is en de werkelijkheid benaderd. Daarnaast is het tijdsbestek van dit afstudeeronderzoek een beperkende factor. Elk afzonderlijk te beoordelen aspect is in principe geschikt voor een afstudeeronderzoek naar de wetenschappelijke onderbouwing van de invloed ervan op de levensduur. Verder is er nauwelijks literatuur, betreffende dit onderwerp. Veelal wordt er gesproken over de flexibiliteit van een gebouw, maar een koppeling van dit aspect aan de levensduur blijft achterwege.

Met deze problemen is op de volgende wijze omgegaan: Op basis van uitgangspunten en aannamen is getracht overzichtelijkheid en eenvoud in het model te creëren. Bij de beoordeling van de verschillende factoren zullen deze uitgangspunten en aannamen beschreven worden. De invloed van de verschillende factoren is gemodelleerd door voor elk van deze factoren een bereik te bepalen, zie 8.5. Met het bereik van de factoren voor de verschillende aspecten worden de minimale en maximale waarden van deze factoren vastgelegd. Op basis van de ingevoerde gegevens wordt per aspect een factor bepaald binnen het bijbehorende bereik. Vervolgens kan de ESL-factor worden berekend voor het gebouw.

8.3 Gemiddelde levensduur per gebruiksfunctie

De berekening van de verwachte levensduur heeft als uitgangspunt de gemiddelde levensduur van het gebouw. De gemiddelde levensduur wordt vervolgens vermenigvuldigd met de ESL-factor, welke is gebaseerd op de gebouwspecifieke eigenschappen.

De gemiddelde levensduur is afhankelijk van de gebruiksfunctie van een gebouw. GreenCalc+ neemt in de berekening van de milieukosten voor een gebouw een levensduur mee, welke gekozen is op basis van inschatting. Deze levensduur is een benadering van de gemiddelde levensduur. Aangezien de tool gebruik maakt van gegevens, berekend met GreenCalc+, is ervoor gekozen om de waarden uit Tabel 8.1 over te nemen. Per gebruiksfunctie geldt dan de volgende gemiddelde levensduur:

Gebruiksfunctie	Uitgangspunt gemiddelde levensduur
Woonfunctie	75 jaar
Kantoorfunctie	35 jaar
Winkelfunctie	35 jaar
Logiesfunctie	75 jaar
Onderwijsfunctie	75 jaar

Tabel 8.1: Levensduur gebouw, per gebruiksfunctie, zoals in GreenCalc+ wordt aangenomen.

⁸ Met de aankomende harmonisatie van de verschillende tools en databases zal deze levensduur worden gewijzigd (informatie uit een gesprek met mevr. Kuijpers-van Gaalen, adjunct directeur bij DGMR).

8.4 Uitwerking verschillende aspecten

De volgende aspecten zullen hieronder worden behandeld, waarbij de uitwerking van de berekening van de factoren in de bijlagen is te vinden:

- Architectuur
- Draagconstructie
- Draagvermogen
- Overmaat
- Stramienmaten
- Installaties
- Gevel
- Ontsluiting
- Demontabel bouwen

8.4.1 Architectuur

De architectuur kan een grote invloed hebben op de levensduur van een gebouw. Hierbij zijn de volgende aspecten van groot belang: Innovatie, bouwstijl en geschiedenis.

Een gebouw zoals de voormalige Van Nelle fabriek (Figuur 8.2) is hier een duidelijk voorbeeld van. Dit gebouw geldt als een van de voornaamste industriële monumenten in Nederland. De fabriek, ontworpen door Leendert van der Vlugt en Mart Stam van het architectenbureau J.A. Brinkman & L.C. van der



Vlugt, is een schoolvoorbeeld van het nieuwe bouwen en is gebouwd tussen 1927 en 1929. De fabriek behoort tot de top 100 der Nederlandse UNESCO-monumenten.

Hergebruik en transformatie van een gebouw komt tot stand als een of meer actoren zich bewust zijn van de (mogelijke) kwaliteiten van een gebouw en/of zijn omgeving. Bij de overwegingen of een gebouw getransformeerd zal worden of niet, speelt de belevingswaarde van het gebouw een belangrijke rol. Belevingswaarde heeft te maken met emotie. Deze emotie vertaalt zich in de kwaliteiten die men een gebouw toedicht: cultureel, historisch, maatschappelijk, qua vormgeving of functie. Belevingswaarde is de waarde die een individu of een groep in een bepaalde tijd en binnen een bepaalde context aan een gebouw toeschrijft (19).

Een inschatting van deze kwaliteiten van een nieuw gebouw is moeilijk realiseerbaar. Gezien het feit dat de ontwerptool in eerste instantie ontwikkeld wordt voor het vergelijken van constructieve alternatieven waarvan de architectonische kwaliteit onderling weinig zal verschillen, zal het aspect architectuur buiten beschouwing gelaten in de beoordeling.

8.4.2 Draagconstructie

Het draagsysteem van constructies is over het algemeen onder te verdelen in een kolommenskelet en een wandenskelet. De stabiliteit wordt geboden door kernen, stabiliteitswanden, windverbanden of portaalwerking. Het draag- en stabiliteitssysteem hebben invloed op de volgende aspecten:

- De indelingsvrijheid van de gevel.
- De indelingsvrijheid van de plattegrond

De indelingsvrijheid van de gevel wordt beoordeeld in 8.4.7. De indelingsvrijheid van de plattegrond hangt af van de niet-verplaatsbare elementen binnen het gebouw. Voor de beoordeling van de indelingsvrijheid van de plattegrond wordt gekeken naar de stramienstructuur, waarop de verticale dragende elementen zich bevinden. Dit wordt verder behandeld in 8.4.6.1. Daarnaast dient er gekeken te worden naar de overige niet-verplaatsbare elementen in de constructie. Dit zijn de kernen en stabiliteitswanden.

Stabiliteitssysteem

Voor het verzorgen van de stabiliteit van een gebouw zijn de volgende systemen mogelijk:

- Stabiliteitskern
- Stabiliteitswanden
- Windverbanden
- Portaalwerking
- Een combinatie van de bovenstaande systemen.

Uit het onderzoek naar verschillende transformatieprojecten, zie bijlage 1, is gebleken dat de kernen vaak als uitgangspunt worden genomen in een nieuw ontwerp voor het gebouw. In alle gevallen zijn de bestaande kernen behouden. Dit geeft aan dat de kern niet als belemmerende factor wordt gezien en slechts een beperkte invloed hebben op de indelingsvrijheid van de plattegrond. Tevens is te zien dat een stabiliteitswand een beperkte invloed heeft op de indelingsvrijheid van de gevel/plattegrond. Voor windverbanden geldt in principe hetzelfde. De indelingsvrijheid van de gevel neemt af, door de plaatsing van windverbanden. In principe zorgt portaalwerking voor de grootste indelingsvrijheid van de plattegrond, aangezien de stabiliteit wordt gecreëerd in de momentvaste verbindingen.

De invloed van het stabiliteitssysteem op de indelingsvrijheid is dus gering. Dit is terug te zien in het bijbehorende factorbereik. In bijlage 1.2.1 wordt de bepaling van het factorbereik behandeld.

Verwerking in de tool

De benodigde invoer voor de bepaling van de factor betreffende het stabiliteitssysteem zijn de stabiliteitsvoorzieningen voor zowel de X- , als de Y-richting. Het gemiddelde van de bijbehorende factoren geeft vervolgens de factor die wordt meegenomen in de ESL-berekening.

Stabiliteitssysteem	Factor
Kern	1,0
Stabiliteitswanden	0,9
Windverbanden	0,95
Portaalwerking	1,1

Tabel 8.2: Factoren voor het stabiliteitssysteem

8.4.3 Sparingsflexibiliteit van de vloeren

Bij het herbestemmen van gebouwen is het soms noodzakelijk dat er een extra trappenhuis moet komen ten behoeve van de ontsluiting, bijvoorbeeld om een extra vluchtroute te creëren. Daarnaast zijn vaak extra schachten benodigd ten behoeve van vernieuwde en benodigde installaties.

Een hoge sparingsflexibiliteit van vloeren heeft een positieve invloed op de indeelbaarheid van een gebouw. Het maken van kleine sparings in vloervelden ten behoeve van installaties en ook het realiseren van grote sparings ten behoeve van nieuwe vides op trapgaten kan relatief eenvoudig zijn, als er weinig of geen krachten moeten worden omgeleid. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer er hele vloervelden tussen bestaande dragende balken kunnen worden weggehaald. Een grote ingreep heeft zo weinig gevolgen voor de krachtswerking. Het tegendeel, een kleine ingreep met grote gevolgen kan ook voorkomen: indien een beoogde sparing of doorvoer constructieve

zones met veel wapening of voorspanstrengen kruist, kan een nieuwe sparing van geringe afmetingen al problematisch worden. Dergelijke sparingen kunnen niet zonder aanvullende constructieve maatregel worden uitgevoerd.

Uit het onderzoek naar de verschillende transformatieprojecten is gebleken dat een lage sparingsflexibiliteit een beperkende factor is voor het herbestemmen van een gebouw. De bepaling van de factor en zijn bereik is te vinden in bijlage 1.2.2.

Verwerking in de tool

De volgende vraag dient te worden beantwoord:

- Tot welke grootte kunnen sparingen worden aangebracht in de vloeren?
 - ☐ < 1 m²
 - ☐ 1 - 3 m²
 - ☐ 3 - 10 m²
 - ☐ >10 m²

Sparing oppervlak	Opmerking	Factor
0 - 1 m ²	Het toepassen van kleine leidingschachten is mogelijk.	0,8
1 - 3 m ²	Het toepassen van kleine tot iets grotere schachten is mogelijk.	1
3 - 10 m ² :	Het toepassen van een liftschacht (met leidingschachten) is mogelijk.	1,1
>10 m ² :	Het toepassen van een trappenhuis is mogelijk.	1,2

Tabel 8.3: Factoren voor de sparingsflexibiliteit

8.4.4 Draagvermogen

Het draagvermogen van de constructie beïnvloedt de mogelijkheid tot functiewisseling in het gebruik van het gebouw/gebouwdeel. Daarnaast is het draagvermogen ook van belang bij een uitbreiding van het gebouw, waarbij het gebouw met één of enkele verdiepingen wordt opgetopt. Voor het beoordelen van de invloed van het draagvermogen op de levensduur van een gebouw, wordt er gekeken naar de volgende constructieonderdelen: Vloeren, kolommen, liggers, wanden en de fundering.

8.4.4.1 Functiewisseling

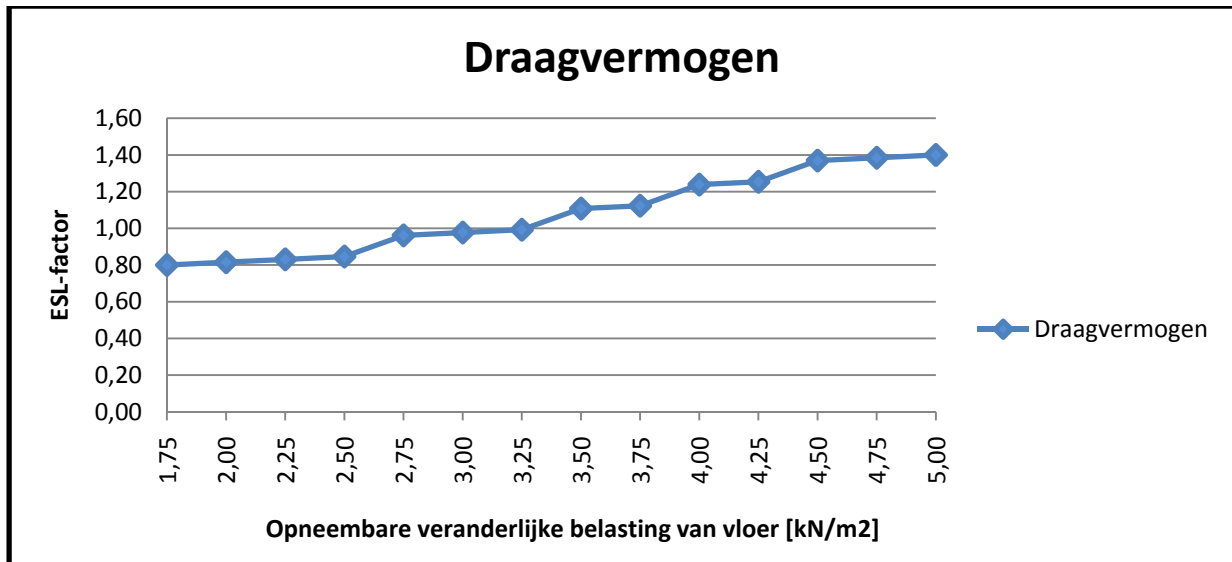
De vloer is de bepalende factor voor de mogelijkheid tot functiewisseling in het gebruik van het gebouw. Afhankelijk van de gebruiksfunctie dient er een bepaalde vloerbelasting in rekening te worden gebracht. Wanneer een vloer is berekend op een bepaalde belasting, dan zijn de overige constructieonderdelen tevens berekend op deze in rekening gebrachte belasting. De beoordeling van het draagvermogen in relatie met de mogelijkheid tot functiewisseling is dus afhankelijk van de belasting waarop de vloeren zijn berekend. Hierbij wordt het eigen gewicht van de vloeren buiten beschouwing gelaten.

Verwerking in de tool

Een eenvoudige en doeltreffende wijze van beoordelen wordt verkregen op de volgende wijze. Allereerst dient er worden ingevoerd uit hoeveel verdiepingen het gebouw bestaat. Vervolgens dient er per vloer worden aangegeven of deze is opgebouwd uit één of meerdere secties voor de in rekening gebrachte belasting. Standaard kan hiervoor één sectie worden aangehouden. Indien de vloer bestaat uit meerdere secties, zal net als voor de verschillende vloeren, per sectie de volgende invoer worden gevraagd:

- De belasting waarop de betreffende vloer is berekend.
- Het vloeroppervlak van de betreffende vloer/sectie.

Op basis hiervan wordt vervolgens de factor berekend voor het draagvermogen in relatie met de functiewisseling. De bepaling en berekening van deze factor wordt in bijlage 1.2.3 behandeld.



Figuur 8.3: Relatie tussen de opneembare veranderlijke belasting van vloeren en de bijbehorende factor

8.4.4.2 Verticale uitbreiding

Bij een verticale uitbreiding (optoppen) van een gebouw, dient de constructie hierop berekend te zijn. Doormiddel van optoppen wordt extra vloeroppervlak gerealiseerd, wat mogelijk maakt dat een organisatie kan uitbreiden zonder dat er een nieuw gebouw benodigd is. Aangezien de invloed van het extra oppervlak verkregen gebruiksoppervlak bij optoppen op de factor 'draagvermogen' afneemt bij een groot aantal verdiepingen en gezien het feit dat in eerste instantie het gebruiksoppervlak niet aanwezig is en mogelijk nooit aanwezig zal zijn, kan dit aspect buiten beschouwing worden gelaten in de berekening.

8.4.5 Overmaat

Het bieden van overmaat in een ontwerp beïnvloedt de veranderbaarheid ervan in positieve zin. Overmaat kan worden geboden in het draagvermogen. Daarnaast is overmaat van toepassing op de volgende aspecten in een constructief ontwerp, welke hierna worden behandeld:

- Benodigd vloeroppervlak
- Verdiepingshoogte

8.4.5.1 Benodigd gebruiksoppervlak

In de ontwerpfase van een gebouw kan er rekening worden gehouden met toekomstige ontwikkelingen door een overmaat te creëren in het benodigde vloeroppervlak. Deze toekomstige ontwikkelingen kunnen uitbreidingen zijn, waarbij meer gebruiksoppervlak wordt vereist voor bijvoorbeeld extra gebruikers, installatieruimte of een andere indeling. Tevens kan een optionele overmaat worden geboden, door in het ontwerp rekening te houden met een mogelijke uitbreiding, in verticale of horizontale richting.

De verhoudingen tussen het netto- en bruto vloeroppervlak is per type gebouw verschillend. Indien verschillende constructieve ontwerpen voor hetzelfde gebouw worden vergeleken, is het verschil tussen deze verhoudingen te verwaarlozen. Voor de berekening van de factor wordt het bruto vloeroppervlak meegenomen. Hiervoor is gekozen om de invoer eenvoudig te houden.

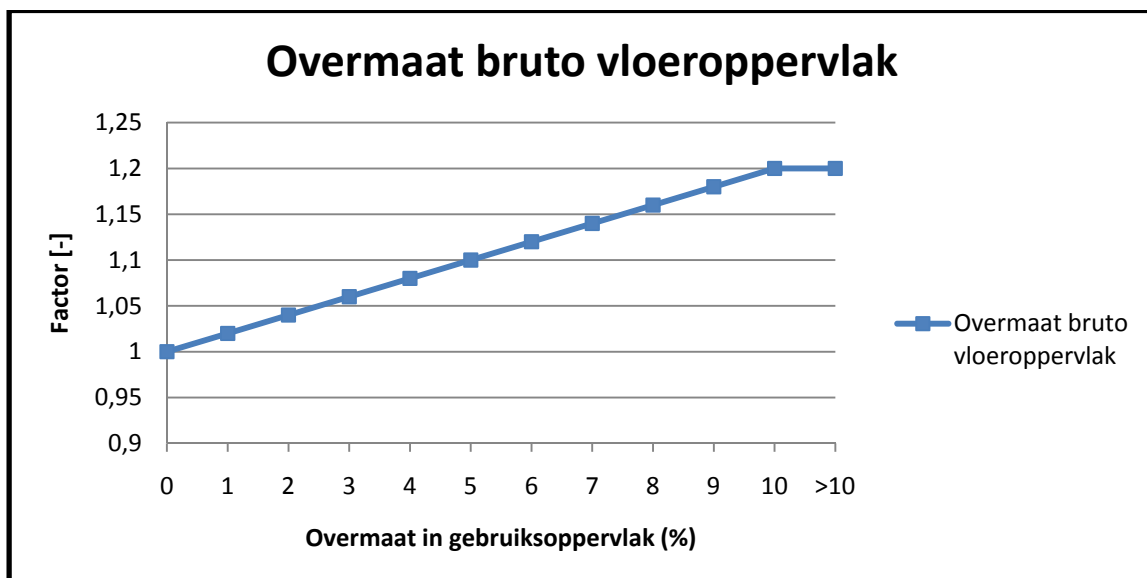
De berekening van de factor voor de aanwezige overmaat is gebaseerd op de verhouding tussen het benodigde en het extra aanwezige gebruiksoppervlak. Indien er een mogelijkheid tot verticale uitbreiding wordt geboden in het ontwerp, zal ook voor het optionele gebruiksoppervlak een factor worden bepaald, zie ook 8.4.4.2. Voor de mogelijkheid tot optoppen is een factor voor de levensduurverlenging geschat. Hierbij is rekening gehouden met de kans dat het optionele gebruiksoppervlak ook daadwerkelijk wordt gebruikt.

De mogelijkheid tot uitbreiding in horizontale richting wordt niet meegenomen in de beoordeling van een gebouw. De reden hiervoor is de volgende: Uit kostenoverweging wordt over het algemeen de voorkeur gegeven aan een later aan te leggen nieuwe fundering. De kosten van een later aan te leggen extra fundering, ten opzichte van het gelijk aanleggen van de fundering, lopen weinig uiteen. Omdat het niet zeker is of de optionele capaciteit benut zal worden in de toekomst, wordt er daarom in de praktijk gekozen om de fundering aan te leggen op het moment dat het nodig is.

De berekening van de factor wordt behandeld in bijlage 1.2.4.1.

Verwerking in de tool

De overmaat in gebruiksooppervlak wordt op de volgende wijze meegenomen in de beoordeling: Er wordt gevraagd of er een overmaat in bruto vloerooppervlak aanwezig is. Indien er een overmaat is, kan het percentage overmaat worden ingevoerd. Aangenomen is dat de maximale factor wordt behaald indien de overmaat groter dan 10% is van het benodigde gebruiksooppervlak. Tussen de 0% en 10% wordt rechtlijnig geïnterpoleerd tussen de waarden binnen het gekozen bereik. De relatie tussen de overmaat in bruto vloerooppervlak is weergegeven in de onderstaande figuur. Indien de mogelijkheid tot optoppen aanwezig is, zal op basis van de kans dat optoppen benodigd is, een extra factor in rekening worden gebracht voor het optionele bruto gebruiksooppervlak. De factor hiervoor bedraagt: 1,20 [-].



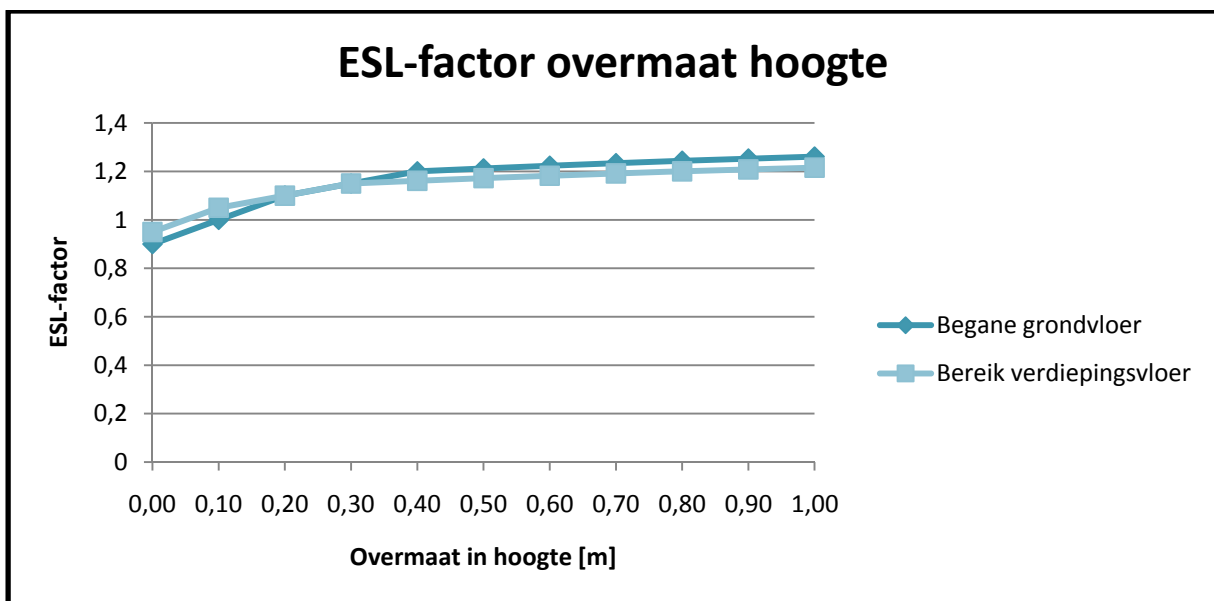
Figuur 8.4: Relatie tussen de overmaat in bruto vloerooppervlak en de bijbehorende factor

8.4.5.2 Verdiepingshoogte

Afhankelijk van de gebruiksfunctie zijn eisen gesteld aan de benodigde vrije hoogte van een bouwlaag. De vrije hoogte wordt berekend door de verdiepingshoogte te verminderen met het totale vloerpakket. Het vloerpakket bestaat uit de constructie, afwerking, installaties en isolatie. De hoogte van de vloer is afhankelijk van de integratie van de verschillende elementen. Bij woningen worden de installaties over het algemeen in de vloer gestort. Voor kantoren geldt echter dat de installaties onder of boven de vloer worden aangebracht. Het instorten van installaties in de vloer heeft een negatieve invloed op de aanpasbaarheid van een gebouw, aangezien het na oplevering van het gebouw niet meer mogelijk is om deze te vervangen. Dit aspect wordt meegenomen in 8.4.8: Installaties. Indien de installaties ingestort zijn, zullen bij hergebruik en/of transformatie van het gebouw de benodigde installaties boven of onder de vloer worden aangebracht. Deze benodigde ruimte wordt meegenomen in de berekening van de vrije hoogte. De benodigde ruimte voor installaties is afhankelijk van de functie.

Het Bouwbesluit 2003 stelt dat, voor de beschouwde functies, de minimale vrije hoogte minimaal 2,6 m bedraagt. Uit een studie naar de transformatie van kantoorgebouwen(19) is gebleken dat in veel gevallen de ruime verdiepingshoogte bevorderlijk is geweest voor de haalbaarheid van de transformatie en het hergebruik van een bestaand gebouw. Meer verdiepingshoogte betekent meer ruimte voor installaties. Daarnaast wordt een grote verdiepingshoogte over het algemeen als positief ervaren door de gebruiker.

Er kan gesteld worden dat een overmaat in vrije hoogte een positief effect heeft op de betreffende factor. Een grotere vrije hoogte heeft echter een nadelig effect op het materiaalgebruik in de gevel en op het energieverbruik. Deze aspecten worden meegenomen in de berekening van de milieukosten. De bepaling van de factor voor de vrije hoogte is terug te vinden in bijlage 1.2.4.2 en bijlage 1.3, wat heeft geresulteerd in de volgende grafiek:



Figuur 8.5: Relatie tussen de overmaat in vrije hoogte en de bijbehorende factor

Verwerking in de tool

Op basis van de volgende gegevens wordt de overmaat in vrije hoogte berekend:

- Verdiepingshoogte
- Het wel of niet instorten van de installaties
- Totale dikte vloerpakket

De berekende overmaat in vrije hoogte per bouwlaag wordt vervolgens gekoppeld aan een factor. Voor het gebouw wordt op basis van de verkregen factoren en de bijbehorende oppervlakten per bouwlaag een gemiddelde factor uitgerekend, welke representatief is voor het gebouw.

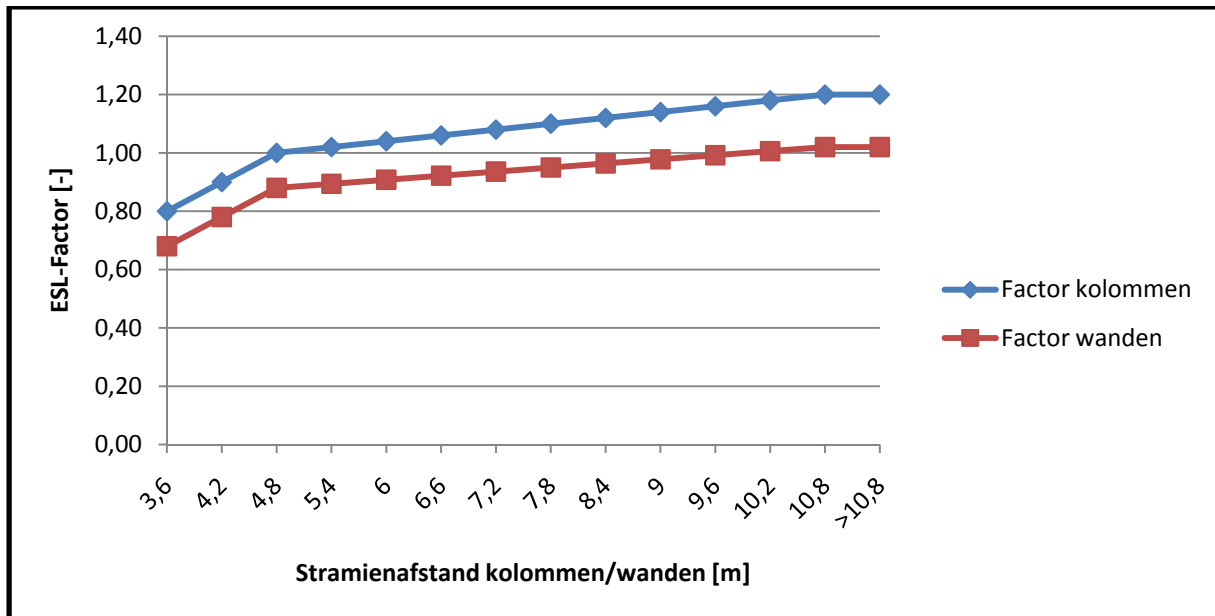
8.4.6 Stramienmaten

De indelingsvrijheid van een gebouw wordt beïnvloed door de stramienafstanden van de verticale dragende elementen. Daarnaast heeft de stramienmaat van de raamkozijnen in de gevel invloed op de plaatsing en aansluiting van de binnenwanden op de gevel. Beide aspecten zullen hieronder worden behandeld. De bepaling van de factoren is te vinden in bijlage 1.2.5 en bijlage 1.3.

8.4.6.1 Stramienafstand verticale dragende elementen

De verticale dragende elementen van de constructie hebben invloed op de mate van flexibiliteit voor functiewisseling. Verschillende functies vereisen verschillende indelingen van de ruimte en dus een bepaalde indelingsvrijheid. De verticale dragende elementen, zoals kolommen en wanden, beperken deze indelingsvrijheid.

De factoren die worden toegeschreven aan het aspect 'stramienafstand' zijn afhankelijk van het type draagsysteem. Afhankelijk van het draagsysteem, waarin onderscheid is gemaakt in een wandskelet (hoofdzakelijk woningbouw) en een kolommenskelet, is een bereik gekozen voor de ESL-factor. Bij de beoordeling van de indelingsflexibiliteit is de volgende stelling genomen: naarmate de stramienafstand van de kolommen/wanden toeneemt, neemt tevens de indelingsvrijheid toe. In de onderstaande grafiek is het verloop van de factoren te zien.



Figuur 8.6: Relatie tussen de stramienafstanden van de draagconstructie en de bijbehorende factor

Verwerking in de tool

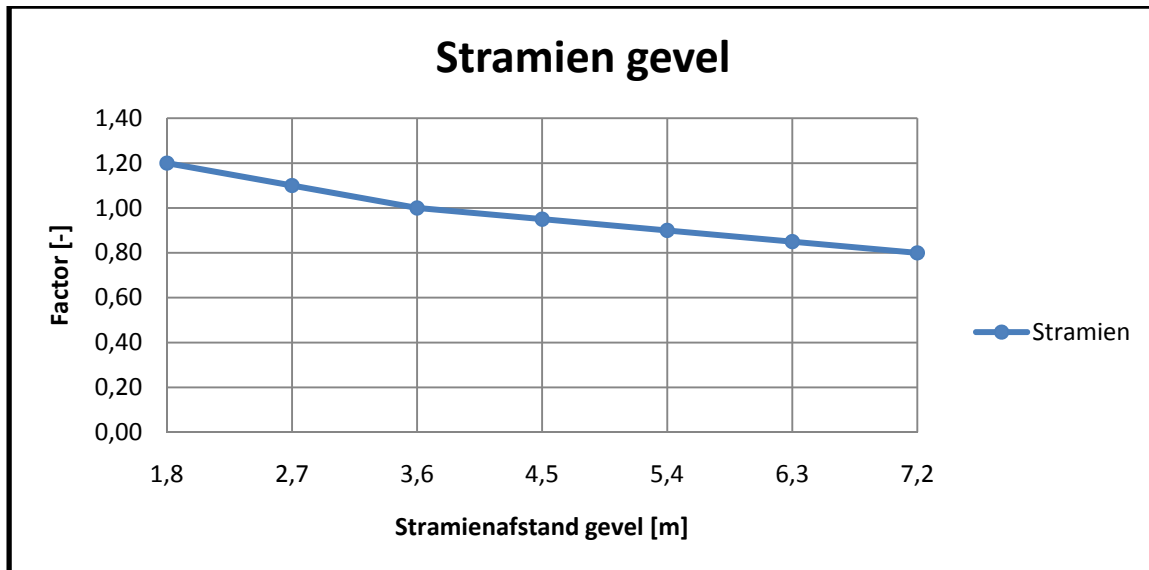
Vanwege de vele combinaties, mogelijkheden en variabelen betreffende de indeling van een bouwlaag, is ervoor gekozen om de factor op de volgende wijze te bepalen:

Indien er een duidelijke stramienmaat is voor de verticale dragende elementen, zal de factor worden gebaseerd op deze stramienmaat. Indien deze stramienmaat niet duidelijk aanwezig is, zal een gemiddelde stramienmaat moeten worden bepaald.

De stramienafstanden van de draagstructuur worden voor zowel de X- als de Y-richting gevraagd. Door de verkregen factoren voor de X- en Y-richting met elkaar te vermenigvuldigen wordt een factor verkregen voor de bouwlaag. Voor het gehele gebouw is een gemiddelde factor te berekenen, door het BVO van de bouwlaag te koppelen aan deze factor.

8.4.6.2 Stramienmaat gevels

Het stramien van de ramen in een gevel is in het geval van een herbestemming van een gebouw een belangrijke factor. Een kleine stramienmaat van de raamkozijnen maakt een vrije indeling van binnenwanden mogelijk. Hierbij biedt een stramien van 1,8 m een optimale indelingsvrijheid. Bij een toenemende stramienafstand neemt deze flexibiliteit af. De bepaling van de bij de stramienafstand behorende factor is in bijlage 1.2.5.2 beschreven.



Figuur 8.7: Relatie tussen het gevelstramien en de bijbehorende factor

Verwerking in de tool

De invloed van de stramienafstand van de gevels op de indelingsvrijheid wordt op eenzelfde wijze meegenomen als die van de verticale dragende elementen. De benodigde invoer is de stramienmaat van de gevel. Indien deze niet duidelijk is, wordt volstaan met een gemiddelde stramienmaat.

8.4.7 Gevel

De gevel heeft een grote invloed op transformaties van gebouwen. Het is een van de meest beeldbepalende elementen van het gebouw en verzorgt de scheiding tussen het buiten- en binnenklimaat. Wanneer een bestaande gevel in de situatie na de beoogde transformatie voldoet, kan deze op eenvoudige wijze behouden blijven. Meestal echter zullen bij een transformatie nieuwe eisen en wensen met betrekking tot het binnenklimaat worden doorgevoerd. Tevens kunnen, als gevolg van functiewisseling of een andere indeling van het gebouw en daarmee een gewijzigde ontsluiting, aanpassingen aan de gevel worden vereist. In veel gevallen vraagt een nieuwe functie (ingrijpende) dus aanpassingen aan de gevel.

Een gevel kan zowel dragend als niet-dragend worden uitgevoerd. Een dragende gevel combineert de dragende functie met een scheidende functie. Hierdoor is de dragende gevel moeilijk aan te passen en te vervangen. Een niet-dragende gevel is in dit opzicht flexibeler dan de dragende gevel.

De factoren zijn als volgt vastgelegd, zie ook bijlage 1.2.6:

- Dragende gevel: 0,7 [-]
- Niet-dragende gevel: 1,4 [-]

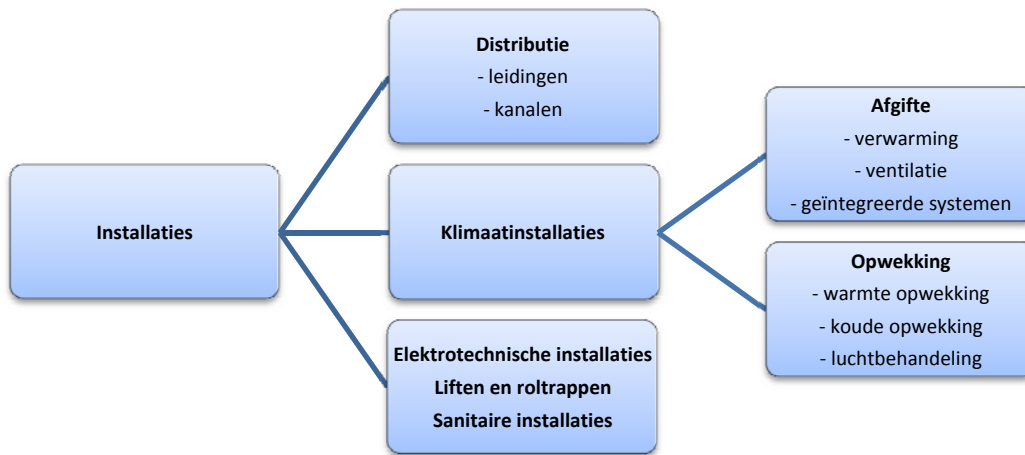
De stramienmaat van de gevel heeft invloed op de indelingsvrijheid. Dit aspect is reeds behandeld in 8.4.6.2.

Verwerking in de tool

De tool biedt de keuze aan tussen een dragende gevel en niet-dragende gevel. Afhankelijk van de keuze wordt één van de bovenstaande factoren in rekening gebracht.

8.4.8 Installaties

Veranderingen in de ruimtelijke indeling (voor kantoorgebouwen na 3-5 jaar) van een gebouw hebben invloed op het leidingwerk. Daarnaast zullen de algemene installaties na 10-15 jaar moeten worden vervangen. De installaties kunnen als volgt worden onderverdeeld:



Figuur 8.8: Verschillende soorten installaties (19)

Een gebouw is flexibel indien op eenvoudige wijze de installaties kunnen worden aangepast op de eisen van de gebruiker. Dit betekent dat de installaties bereikbaar en aanpasbaar moeten zijn. Installaties zijn goed bereikbaar en aanpasbaar indien deze gescheiden zijn van elementen met een andere functie, bijvoorbeeld een dragende functie in geval van vloeren of wanden. Dit aspect zal getoetst moeten worden. Verder zijn installaties aanpasbaar indien deze kunnen worden uitgebreid. Overmaat in gebruiksoppervlak biedt ruimte voor uitbreiding. Hieronder kan tevens de uitbreiding van de benodigde installatieruimte worden beschouwd. Dit aspect wordt meegenomen in 8.4.5.1. Daarnaast biedt overmaat in verdiepingshoogte ruimte voor benodigde installaties. Toegepast in een verlaagd plafond of een verhoogde vloer, zijn deze installaties tevens goed bereikbaar en aanpasbaar. Dit aspect wordt meegenomen in 8.4.5.2.

Afhankelijk van de gebruiksfunctie worden verschillende eisen gesteld aan de installaties. In een onderzoek naar de communicatie over en de beoordeling van flexibiliteit tussen gebouwen en installaties van de Stichting BouwResearch (SBR)(20) wordt onderscheid gemaakt in vier flexibiliteitsaspecten: verkavelbaar, aanpasbaar, uitbreidbaar en multifunctioneel. Verkavelbaarheid is de mogelijkheid om op eenvoudige wijze installatiesystemen te splitsen, te herverdelen of samen te voegen in verschillende kavels of ruimtelijke eenheden. Op grond hiervan kan de flexibiliteit van gebouwinstallaties en eventueel hun onderdelen bepaald worden. De aanpasbaarheid van een installatie is de mogelijkheid om installatiesystemen op eenvoudige wijze in overeenstemming te brengen met een gewijzigde gebruiksvraag. Uitbreidbaarheid is de mogelijkheid om installatiesystemen op eenvoudige wijze in overeenstemming te brengen met een uitgebreide gebruikersvraag. Multifunctionaliteit is de mogelijkheid om installatiesystemen of componenten voor meerdere functies te gebruiken of in te zetten.

Uitgangspunt voor de beoordeling is het constructieve ontwerp. Over de toegepaste installaties en de implementatie ervan in het gebouw, is in het geval van een constructief ontwerp nauwelijks informatie beschikbaar. Om deze reden zal de beoordeling van de installaties zich beperken tot de volgende punten:

- Aanpasbaarheid: bereikbaarheid
- Uitbreidbaarheid: positionering

8.4.8.1 Aanpasbaarheid: bereikbaarheid

Het leidingwerk kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd in de constructie. In woningbouw wordt het leidingwerk over het algemeen ingestort in de vloeren. Bij kantoren echter is het gebruikelijk om de installaties in de ruimte van een verlaagd plafond of een verhoogde vloer aan te brengen. Daarnaast zijn bij woningen de installaties vaak decentraal uitgevoerd en bij kantoren juist

centraal. Duidelijk is dat elke functie zijn eigen kenmerken heeft wat betreft de toegepaste installaties.

De technische levensduur van een draagconstructie is met gemiddeld 75-100 jaar⁹ groter dan de technische levensduur van de installaties. De installaties zijn dus eerder aan vervanging toe. Door het scheiden van installaties en de draagconstructie wordt onafhankelijkheid van beide 'gebouwlagen' bewerkstelligd. Deze scheiding maakt het mogelijk om de installaties aan te passen, te vernieuwen en vervangen, zonder dat dit invloed heeft op de draagconstructie. Het instorten van installaties in vloeren of het inbouwen ervan in wanden heeft dus een negatieve invloed op de aanpasbaarheid van een gebouw.

8.4.8.2 *Uitbreidbaarheid: positionering*

Een goede positionering van leidingzones en schachten is gunstig voor de flexibiliteit van het installatiesysteem. Van groot belang is het onderscheid tussen lokale en centrale voorzieningen (de splitsing in primaire en secundaire leidingstelsels). Wanneer bouwkundige leidingzones en schachten zowel lokaal (kavel) als centraal (gebouwniveau) voorkomen, wordt dit als gunstig beoordeeld. Wanneer er sprake is van alleen lokale voorzieningen wordt dit als neutraal beoordeeld. Voorzieningen, enkel op centraal niveau, wordt als ongunstig beschouwd.

Verwerking in de tool

Door de gebruiker van de tool zal naar een inschatting worden gevraagd over de bereikbaarheid van de installaties en de positionering van de benodigde leidingzones en schachten. Op basis van deze inschatting wordt een factor bepaald. Het bereik van de factor is vastgesteld op: 0,80 – 1,20. De berekening van deze factor wordt in 1.2.7 behandeld.

8.4.9 **Ontsluiting**

Ontsluiting is een belangrijk onderdeel in het ontwerp van een gebouw. Het heeft betrekking op de toegankelijkheid van een gebouw, maar ook op de brandveiligheid. Een nieuw gebouw voldoet aan de eisen in het Bouwbesluit. In geval van functiewisseling, meerdere gebruikers en/of wijzigingen in het ontwerp zal er opnieuw moeten worden gekeken of er wordt voldaan aan de eisen.

Een belangrijk onderdeel van de ontsluiting en van de veranderbaarheid van een gebouw, welke tot nu toe nog niet is vermeld is, is de parkeergelegenheid. Indien de benodigde parkeerruimte toeneemt, bijvoorbeeld door extra gebruikers als gevolg van optoppen of door functiewisseling van bijvoorbeeld kantoorfunctie naar woonfunctie (veel voorkomend), kan een tekort aan parkeerruimte een negatieve invloed hebben op het hergebruik en transformatie van het gebouw. In sommige gevallen is het mogelijk om parkeerruimte te creëren in de kelder van een gebouw. Dit aspect zou kunnen worden meegenomen in de beoordeling. Aangezien de parkeergelegenheid vooral afhankelijk is van de omgeving rondom een gebouw is er echter gekozen om dit onderdeel toe te schrijven aan de omgevingskwaliteit van een gebouw, zie 6.2.2, en wordt het dus buiten beschouwing gelaten.

Veranderbaarheid zorgt voor de mogelijkheid tot aanpassing aan scherpere eisen. Ontsluiting wordt dus voor een groot gedeelte meegenomen in de hierboven beschreven aspecten die hier allen invloed op hebben. Aangezien het niet mogelijk is om in detail naar de ontsluiting te kijken, wordt aangenomen dat dit onderdeel, middels de beoordeling van de overige aspecten, voldoende is meegenomen in de beoordeling.

⁹ Bron: SBR rapport (1998): Levensduur van Bouwproducten

8.4.10 Demontabel bouwen

In 5.3.2 is vermeld dat door middel van demontabel bouwen het materiaalgebruik in constructies sterk kan worden verminderd, aangezien demontabel bouwen hergebruik en recycling in de toekomst mogelijk maakt. Het is een bouwmethode waarbij de constructieve verbindingen zodanig zijn uitgevoerd, dat de onderdelen van de constructie zonder of met geringe destructie kunnen worden gedemonteerd en voor hergebruik in aanmerking komen. Hierdoor kunnen bouwdelen en bouwmaterialen na de sloop opnieuw worden ingezet en hoeven deze niet worden gestort.

Wanneer een constructie of constructiedeel demontabel gebouwd is, levert niet direct een vermindering van de materiaalhoeveelheden in de constructie op. Het biedt enkel de mogelijkheid tot hergebruik en recycling in de toekomst. Indien een onderdeel van de constructie wordt hergebruikt, wordt de levensduur van het element verlengd. De jaarlijkse milieukosten voor dit element zullen hierdoor afnemen, waarbij men dient te beseffen dat het effect van het demontabel bouwen op de jaarlijkse milieukosten wordt beïnvloed door de berekende verwachte levensduur voor het gebouw.

In deze versie van de ontwerptool is het aspect 'Demontabel bouwen' niet verwerkt in de berekening van de jaarlijkse milieukosten. Hiervoor is gekozen omdat bij het in rekening brengen van het aspect een beoordeling van de constructie op elementniveau moet worden gegeven, terwijl de ESL-factor van toepassing is op de gehele constructie. Gezien de mogelijke invloed van het demontabel bouwen op de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de constructie, is een onderzoek naar de verwerking van het aspect 'Demontabel bouwen' in de milieukosten berekening aan te bevelen.

Hoewel het aspect dus nu nog niet verwerkt is in de ontwerptool, wordt er in de beoordeling van de constructieve alternatieven op duurzaamheid, zie 10.2, wel aandacht aan besteed.

8.5 Kalibreren factoren ter bepaling van de ESL-factor

De factoren, voor de in paragraaf 8.4 behandelde aspecten, vormen samen de ESL-factor. Het bereik van deze factoren is vastgesteld op basis van inschatting, met behulp van de opgedane kennis gedurende dit onderzoek. Voor een meer wetenschappelijke onderbouwing is het van belang dat de bepalingmethode van de verwachte levensduur wordt getest en gekalibreerd.

8.5.1 Methode voor het kalibreren

Het kalibreren van de factoren kan op verschillende wijzen. Er kan een onderzoek worden gedaan naar reeds gesloopte gebouwen¹⁰. Op basis van de levensduur van de hierin beschouwde gebouwen, de gebouwspecifieke eigenschappen en de redenen voor het besluit tot sloop van het gebouw kunnen de verschillende factoren worden afgestemd, zodat deze tot een realistische verwachte levensduur komen. Voor het vergaren van de benodigde informatie kan bijvoorbeeld contact worden gezocht met de Rijksgebouwen Dienst.

Een variatie op de bovenstaande methode is een onderzoek naar de verschillende transformatieprojecten, waarnaar al eerder is verwezen in dit rapport, zie ook bijlage 1.

De laatstgenoemde methode heeft als nadeel dat de exacte uiteindelijke levensduur van de beschouwde gebouwen niet bekend is, in tegenstelling tot die van de gesloopte gebouwen. Daar tegenover staat dat de methode een groot voordeel heeft ten opzichte van een onderzoek naar gesloopte gebouwen. Zo is bij de transformatieprojecten de benodigde informatie grotendeels beschikbaar, doordat de projectgegevens zijn gebundeld in het boekwerk 'Transformatie van kantoorgebouwen' (19). De achtergronden van de transformatie zijn beschreven, evenals de gebouwspecifieke kenmerken. Hierdoor is het goed mogelijk om een totaalbeeld te creëren van het transformatieproces. Het vergaren van de benodigde informatie zal, in het geval van het onderzoek naar de gesloopte gebouwen, erg veel tijd in beslag nemen.

In het kader van dit onderzoek is ervoor gekozen om de verschillende factoren te kalibreren op basis van het onderzoek naar de transformatieprojecten. Het tijdsaspect speelt in deze keuze een belangrijke rol. Het vergaren van de benodigde informatie is tijdrovend. Daarnaast het onduidelijk of alle benodigde gegevens wel beschikbaar zijn. Het boek 'Transformatie van kantoorgebouwen' bevat het grotendeel van de benodigde informatie. Dit biedt zekerheid dat het kalibreren van de factoren resulteert in een realistische berekening van de verwachte levensduur. Voor een vervolgonderzoek is het onderzoek naar gesloopte gebouwen, voor het afstemmen van de ESL-berekening, natuurlijk wel aan te bevelen.

Het nadeel van de gekozen methode is dat de exacte uiteindelijke levensduur van de gebouwen niet bekend is. Dit aspect wordt ondervangen met een duidelijke aanname over de levensduurverlenging na een transformatie. Er wordt aangenomen dat een gebouw na de transformatie nog vijftig jaar in gebruik zal zijn. Op basis van deze aanname wordt de levensduur van het beschouwde gebouw geschat en vergeleken met de berekende verwachte levensduur. Deze vergelijking zal voor verscheidene projecten worden uitgevoerd. Vervolgens zullen de factoren zo worden ingesteld dat voor elk beschouwd gebouw de berekende verwachte levensduur zoveel als mogelijk de 'exacte levensduur' van het gebouw benaderd.

¹⁰ Advies van dhr. Prof.dr.ir. A.A.J.F. van den Dobbelsteen, hoogleraar Building Technology, Bouwkunde.

8.5.2 Overzicht van het valideren en kalibreren van de ESL-berekening

Voor het kalibreren van de factoren zijn van enkele projecten, welke uitgebreid beschreven zijn in het boek 'Transformatie van kantoorgebouwen'(19), de gegevens ingevoerd in de ESL-berekening. Vervolgens zijn de resultaten geanalyseerd en is de berekening op een aantal punten gewijzigd. Een uitgebreide omschrijving van dit proces is te vinden in bijlage 1.3. Gedurende het kalibreren is het factorbereik voor de 'overmaat in hoogte' en de 'stramienafstand van de draagconstructie' bijgesteld. Tevens is bij de formule voor de berekening van de factor voor de 'overmaat in hoogte' een kleine wijziging doorgevoerd. In de onderstaande tabel zijn de resultaten van het kalibreren van de factoren weergegeven.

	Voor kalibratie		Na kalibratie
Stabiliteitssysteem			
Portaalwerking	1,10		1,10
Kern	1,00		1,00
Stabiliteitswanden	0,90		0,90
Windverbanden	0,95		0,95
Geveelfunctie			
Dragend	0,70		0,70
Niet-dragend	1,40		1,40
Gevelstramien	0,80 – 1,20		0,80 – 1,20
Stramienafstand			
Draagconstructie	0,70 – 1,30		<u>0,80 – 1,20</u>
Verhouding kol/wanden	0,85		0,85
Sparingsflexibiliteit vloeren			
< 1,0 m ²	0,80		0,80
1,0 >< 3,0 m ²	1,00		1,00
3,0 >< 10,0 m ²	1,10		1,10
> 10,0 m ²	1,20		1,20
Draagvermogen vloeren	0,80 – 1,40		0,80 – 1,40
Bruto overmaat vloeroppervlak	1,00 - 1,20		1,00 - 1,20
Kans op optoppen* Levensduurverlenging	0.80 x 1.50 = 1,20		0.80 x 1.50 = 1,20
Overmaat hoogte			
Bereik begane grond	0,70 – 1,30		<u>0,90 – 1,30</u>
Bereik verdieping	0,80 – 1,20		<u>0,95 – 1,25</u>
Installaties	0,80 – 1,20		0,80 – 1,20
Gemiddelde afwijking levensduurverwachting	30,8%		6%

Tabel 8.4: Overzicht van het factorbereik, voor en na het kalibreren

Aan de hand van de bovenstaande factorbereiken is per transformatieproject de verwachte levensduur berekend. Deze is vervolgens vergeleken met de uiteindelijke aangenomen levensduur, welke is bepaald door de levensduur van een gebouw tot het moment van de transformatie te verlengen met 50 jaar. Per project is de afwijking op deze aangenomen uiteindelijke levensduur van het gebouw berekend en is de gemiddelde afwijking over de zes behandelde projecten bepaald. Voor het kalibreren was deze afwijking 30,8%. Na het bijstellen van de ESL-berekening bedroeg deze echter nog maar 11,8%. Het buiten beschouwing laten van de projecten 'Westplant' en 'Granida', aangezien de eigenschappen van deze transformaties afwijken van de overige transformatieprojecten, resulteert in een gemiddelde afwijking van 6%. Een overzicht van de resultaten van de berekening wordt getoond op de volgende bladzijde.

	De Stadhouders	De Grote Enk	Westplantsoen	Wilhelminastaete	Granida	Twentec Residentie
Berekende ESL-factor	2.11	3.11	2.62	2.50	2.15	2.46
Verwachte levensduur (jaar)	73.68	108.85	91.81	87.10	75.20	86.02
Aanname uiteindelijke levensduur (jaar)	81	100	74	88	98	90
Afwijking van de verwachte levensduur op de aangenomen uiteindelijke levensduur	9%	8,9%	24,2%	1%	23,3%	4,4%
Gemiddelde afwijking	6%					

Tabel 8.5: Overzicht van de resultaten van de ESL-berekening, na het kalibreren van de factoren

9 De ontwerptool

Ten behoeve van de kwaliteit van het ‘Duurzaam Construeren’ is het belangrijk dat de te ontwerpen tool daadwerkelijk op de markt komt. Als losstaand hulpmiddel zal dit niet gemakkelijk kunnen worden bewerkstelligd. Door de tool te integreren in één van de bestaande methoden kan veel sneller een groter bereik op de markt worden gerealiseerd. Allereerst zal dus moeten worden bepaald in welk toetsingsinstrument de ontwerptool wordt geïntegreerd. Vervolgens kunnen de eisen ten aanzien van de tool worden opgesteld, omdat deze eisen afhankelijk zijn van het gekozen toetsingsinstrument.

9.1 Integratie van de ontwerptool

Een goede integratie van deze ontwerptool is afhankelijk van een aantal aspecten. Het doel van de ontwerptool dient overeen te komen met die van de beoordelingsmethodiek, waarvan het onderdeel zal worden (de doelmethode). Daarnaast moet het onderwerp van de beoordeling voor beide toetsingsmethodieken overeenkomen. De werking van de doelmethode heeft ook een grote invloed op de integratie van de ontwerptool. De mogelijkheid tot het importeren en exporteren van gegevens is hierbij van groot belang. De uitvoer van de doelmethode en de te ontwerpen tool zal in zekere mate overeen moeten komen, zodat de methoden een eenheid vormen. Verder moet het toepassen van de doelmethode laagdrempelig zijn, zodat de te ontwerpen tool daadwerkelijk veelvuldig zal worden gebruikt voor de beoordeling van draagconstructies. De kosten van de doelmethode hebben hier invloed op.

9.1.1 Beoordeling van de toetsingsmethodieken

De behandelde toetsingsmethodieken: GreenCalc+, BREEAM-NL en GPR Gebouw, worden op de bovengenoemde aspecten beoordeeld¹¹. Vervolgens wordt met behulp van een multi criteria analyse (MCA) de doelmethode gekozen.

9.1.1.1 Doel

De ontwerptool zal een constructief ontwerp beoordelen op duurzaamheid en dient als hulpmiddel in de ontwerpfase.

GreenCalc+ en GPR Gebouw zijn ontwikkeld om te dienen als hulpmiddel in de ontwerpfase en voor het geven van een beoordeling van de duurzaamheid van een gebouw. BREEAM-NL daarentegen is ontwikkeld om het hele proces van de realisatie van een gebouw te beoordelen, van ontwerp tot management. De methode is verder niet gericht om te dienen als hulpmiddel in de ontwerpfase.

9.1.1.2 Onderwerp beoordeling

De te ontwerpen tool zal zich voornamelijk richten op gebouwen in de utiliteitsbouw. Zowel GreenCalc+, BREEAM-NL en GPR Gebouw zijn gericht op het beoordelen van deze doelgroep.

9.1.1.3 Werking

GreenCalc+ en GPR Gebouw zijn beiden redelijk gebruiksvriendelijk. De hoeveelheid in te voeren data verschilt per methode. Het materiaalgebruik kan voor beide methoden gedetailleerd ingevoerd worden. GreenCalc+ maakt het mogelijk om heel gedetailleerd het gebouwontwerp in te voeren. GPR Gebouw maakt de invoer, uitgezonderd het materiaalgebruik, eenvoudiger door te gebruiker te laten kiezen uit een aantal opties per onderdeel. Tevens is er de mogelijkheid om forfaitaire waarden te gebruiken.

GreenCalc+ biedt de mogelijkheid om gegevens te importeren en te exporteren, in tegenstelling tot GPR Gebouw. Verder maakt het gebruik van een database, waarmee het materiaalgebruik kan worden ingevoerd. Op basis van het TWIN²⁰⁰²-model wordt de milieubelasting ten gevolge van het materiaalgebruik berekend. GPR Gebouw maakt hiervoor gebruik van de LCA-methode.

¹¹ Eco-Quantum kan buiten beschouwing worden gelaten, omdat deze niet meer op de markt is.

BREEAM-NL is geen programma, maar een beoordelingsrichtlijn. Bewijsvoering is benodigd om een beoordeling te geven. Aangezien de te ontwikkelen beoordelingstool op een eenvoudige wijze de duurzaamheid van een constructief ontwerp moet kunnen beoordelen, is het gebruik van bewijsvoering niet aan te bevelen.

9.1.1.4 Uitvoer

Op basis van een constructief ontwerp wordt een benadering gegeven van de gemiddelde jaarlijkse milieukosten van een gebouw. GreenCalc+ geeft in de uitvoer van de resultaten inzicht in deze milieukosten. GPR Gebouw geeft als beoordeling een rapportcijfer, waardoor de uitvoer niet overeenkomt met die van de tool.

9.1.1.5 Kosten van de beoordeling

De kosten van de methode zijn van invloed op het markt bereik. Een beoordeling met BREEAM-NL is erg duur. De kosten een beoordeling met GreenCalc+ of GPR Gebouw liggen niet ver uit elkaar.

9.1.2 Multi Criteria Analyse van de toetsingsmethodieken

De toetsingsmethodieken zijn beoordeeld op de volgende aspecten:

1. Doel
2. Onderwerp van de beoordeling
3. Werking
4. Uitvoer
5. Kosten van de beoordeling

Per onderdeel kan een score van -2, -1, 0, 1 en 2 worden behaald. Deze scores worden vermenigvuldigd met wegingsfactoren, welke in de tabel zijn vermeld. Omdat de kosten van de methode minder belangrijk worden geacht in vergelijking met de overige aspecten, is er gekozen om de kosten een wegingsfactor: 1 en de overige aspecten een wegingsfactor: 2 te geven.

Toetsingsmethodieken	1	2	3	4	5
GreenCalc+	2	1	2	1	0
GPR Gebouw	2	1	1	-1	0
BREEAM-NL	-1	1	-2	-2	-1
Weegfactoren	2	2	2	2	1

Tabel 9.1: Beoordeling van de toetsingsmethodieken

Vermenigvuldigd met de weegfactoren, is de totaalscore als volgt:

Toetsingsmethodieken	1	2	3	4	5	Totaalscore
GreenCalc+	4	2	4	2	0	12
GPR Gebouw	4	2	2	-2	0	6
BREEAM-NL	-2	2	-4	-4	-1	-9

Tabel 9.2: Totaalscore per toetsingsmethode

9.1.3 Conclusie

Uit het resultaat van de MCA kan de conclusie worden getrokken dat GreenCalc+ het meest geschikt is als doelmethode. GreenCalc+ scoort goed op alle aspecten en biedt dus de beste basis voor een goede integratie van de te ontwerpen tool. Op basis van deze keuze is het programma van eisen voor de te ontwerpen tool opgesteld.

9.2 Programma van eisen

Het programma van eisen voor de te ontwerpen tool is opgesteld voor de volgende aspecten:

- Werking
- Invoer
- Uitvoer
- Uiterlijk
- Gebruiksvriendelijkheid
- Aanpasbaarheid

Werking:

- De werking van de tool dient overeen te komen met die van GreenCalc+. Het moet mogelijk zijn om gegevens te importeren en te exporteren.
- Het moet mogelijk zijn om een project aan te maken en daarin meerdere ontwerpen met elkaar te vergelijken.

Invoer:

- Het invoeren van de benodigde gegevens dient eenvoudig en niet tijdrovend te zijn.

Uitvoer:

- Het resultaat van de berekeningen zijn de jaarlijkse milieulasten van een ontwerp.
- De uitvoer dient inzicht te geven in de milieukosten. Hierbij is het belangrijk om te laten zien waaruit de jaarlijkse milieukosten zijn opgebouwd.
- Het programma moet in staat zijn verschillende vergelijkingen te presenteren.

Uiterlijk:

- Het uiterlijk van het programma dient overeen te komen met het uiterlijk van GreenCalc+.

Gebruiksvriendelijkheid:

- Het programma moet eenvoudig in gebruik zijn. Dit houdt in dat er gemakkelijk tussen de verschillende vormen van invoer en uitvoer kan worden geschakeld.
- De lay-out van het programma moet overzichtelijk zijn.
- Er dient een help-file te worden ontworpen, waarin de werking van het programma wordt uitgelegd.

Aanpasbaarheid:

- Dit afstudeeronderzoek zal als basis dienen voor vervolgonderzoeken. Het is dan ook waarschijnlijk dat de tool verder zal worden ontwikkeld. Om deze reden is het belangrijk dat de tool gemakkelijk kan worden aangepast, ter bevordering van toekomstige onderzoeken.

9.3 Uitwerking van de ontwerptool

Op basis van het model in Figuur 7.1 en de uitwerking ervan in 7.4 is de ontwerptool ontwikkeld. In deze paragraaf wordt globaal het programma en de werking ervan beschreven. In bijlage 3.1 wordt daarnaast het gehele programma doorlopen en aan de hand van screenshots een duidelijke impressie gegeven over de werking en het uiterlijk. Verder wordt er aandacht besteed aan het programmeerproces en de programmacode in bijlage 3.2.

De ontwikkelde tool biedt de mogelijkheid om verschillende constructieve alternatieven in te voeren voor een bepaald project. Er kan een nieuw project worden aangemaakt, met een directory op elke gewenste locatie op de harde schijf. Daarnaast kan een bestaand project worden geopend. Binnen een project kunnen constructieve ontwerpen worden toegevoegd, verwijderd en gedupliceerd. Per constructief alternatief kan de ESL-factor worden berekend, waarmee de verwachte levensduur van het gebouw kan worden bepaald. Verder kunnen de toegepaste materiaalhoeveelheden van de draagconstructie worden ingevoerd. De ontwerptool is zo ontworpen dat de invoer van de gegevens eenvoudig is en weinig tijd in beslag neemt.

Het programma is als volgt opgebouwd:

Aan de linkerkant van het scherm bevinden zich twee tabbladen, waarmee geschakeld kan worden tussen de invoer van de benodigde gegevens en de uitvoer van de gewenste resultaten. Elk tabblad beschikt over een boomstructuur, waarin de verschillende onderdelen van het programma zijn weergegeven. De invoergegevens respectievelijk berekeningsresultaten van een geselecteerd item uit de boom worden rechts in het scherm weergegeven.

9.3.1 Invoer

Het tabblad voor de invoer van de gegevens bevat de verschillende constructieve alternatieven. Elk aangemaakt alternatief bestaat uit de volgende onderdelen:

- Berekening ESL-factor:
 - o Invoerblad ESL
- Milieukosten draagconstructie:
 - o Fundering
 - o Kolommen
 - o Wanden
 - o Liggers
 - o Vloeren – Dak
 - o Gevel
 - o Stabiliteitsvoorzieningen

9.3.1.1 Berekening ESL-factor

De ESL-factor kan op een vrij eenvoudige wijze worden berekend. Voor de verschillende factoren, welke samen de ESL-factor bepalen, kunnen de benodigde gegevens worden ingevoerd. Vervolgens worden de factoren berekend op basis van de methoden welke bepaald zijn in hoofdstuk 0. Indien er voor een bepaald onderdeel niets wordt ingevoerd, wordt hiervoor een factor 1,00 [-] aangehouden. Het effect van bepaalde keuzes is meteen zichtbaar door het veranderen van de bijbehorende factor en bovenin het scherm door het veranderen van de berekende ESL-factor en daarmee de berekende verwachte levensduur. Een voorbeeld van het invoerscherm wordt getoond in bijlage 3, Figuur 3.5.

9.3.1.2 Berekening milieukosten draagconstructie

De invoer van de draagconstructie is opgesplitst in de verschillende onderdelen binnen de constructie. Hiermee blijft het overzicht behouden gedurende het invoeren van de benodigde data. In Figuur 9.1 is het invoerscherm voor de kolommen weergegeven. Voor elke onderdeel zal de indeling van het invoerscherm hetzelfde zijn.

Afhankelijk van de gekozen opties in type en materiaalsoort, onder in het invoerscherm, wordt de benodigde invoer aangepast. De afbeelding aan de rechterzijde biedt duidelijkheid gedurende de invoer van de materiaalhoeveelheden.

De ingevoerde gegevens verschijnen onderin in een tabel. Deze kan naar wens worden aangepast. Rijen kunnen worden toegevoegd, verwijderd en invoergegevens kunnen worden aangepast. Dit maakt de invoer van de gegevens gebruiksvriendelijk. De tabel zorgt ervoor dat het geheel overzichtelijk blijft.

Gegevens kolomnr : 8

Rechthoek

Steenachtig: Beton

Afm. 1 : mm Aantal : stuks

Afm. 2 : mm Lengte: m

Wapening : kg/m3

Betonggranulaat : %

Afm. 1: Breedte [mm]
Afm. 2: Hoogte [mm]

Kolomnr.	Materiaal	Type	Afm. 1	Afm. 2	Lengte	Wapening	Aantal
1	Steenachtig: Bet...	Rechthoek	300	500	3	40	2
2	Steenachtig: Kal...	Rechthoek	200	3000	20		1
3	Hout: Vuren, duu...	Rond	200		4		20
4	Staal: Staal	IPE140 A	10.1		12		13
5	Staal: Staal	CHS 406,4	97.8		1		1
6	Staal: Staal	HEA450A	99.7		3		1
7	Staal: Staal	HEA300	88.3		3		2

Figuur 9.1: Invoerscherm voor het onderdeel 'Kolommen'

Indien men een profiel wil invoeren, is het mogelijk om deze uit een database te halen. Tevens is het mogelijk om zelf een profiel in te voeren. Dit geldt ook voor de invoer van de vloeren.

Ook de toe te passen materialen worden uit een database opgeroepen. Deze database is samengesteld op basis van de materialen uit de geharmoniseerde materialen database. De keuze bestaat uit 'steenachtige' materialen, staal en hout.

De databases zijn opgebouwd in Excel-bestanden. Deze kunnen naar wens worden aangevuld en up-to-date worden gehouden.

Opslaan van de ingevoerde gegevens

Binnen de projectmap wordt per alternatief een map aangemaakt, waarin voor alle onderdelen van de invoer een tekstbestand wordt aangemaakt met de ingevoerde gegevens. Deze gegevens kunnen vervolgens worden opgeroepen en verwerkt in de berekening van de totale milieubelasting van elk constructief ontwerp.

9.3.2 Uitvoer

Het tabblad voor de uitvoer bevat de resultaten van de berekening van de milieukosten. De boomstructuur bestaat uit de volgende onderdelen:

- Resultaten van de GreenCalc+ berekening
- Resultaten per alternatief:
 - o Overzicht van de berekening van de ESL-factor
 - o Milieukosten van de draagconstructie
 - o Totale milieukosten (inclusief de milieukosten, berekend met GreenCalc+)
- Vergelijking van de resultaten voor de verschillende varianten

9.3.2.1 Resultaten GreenCalc+

Het eerste onderdeel van de uitvoer bevat de resultaten van de berekening met GreenCalc+. Deze gegevens zijn opgesplitst in jaarlijkse milieukosten en de milieukosten over de gehele levenscyclus van een gebouw, met uitzondering van de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie. De gegevens kunnen vanuit GreenCalc+ geëxporteerd worden naar een Excel-bestand. Deze kan vervolgens geïmporteerd worden in de ontwerptool. De gegevens worden uitgelezen uit het Excel-bestand en vervolgens weergegeven in een tabel, zie onderstaande figuur.

	1	2	3	4
Overzicht milieukosten				
Kantoorvilla				
		Milieukosten per jaar	Eigen	
			Index	
		Ontw.		
Materiaal	1235,00	-		
Energie	18599,00	-		
Water	376,00	-		
Totaal	20210,00	-		
		Milieukosten [euro]	Milieu-effecten	
		Ontw.	Ontw.	
Emissies	18058,00			
Broeikasemissie (100j)	14316,00		157736.4	kg CO2 eq.
Ozonlaagaantasting	45,00		0.0079	kg CFC-11 eq.
Humane toxiciteit	1312,00		27104.5	kg 1.4-DB eq.
Aquatische toxiciteit (zo...	24,00		489.5	kg 1.4-DB eq.
Terrestrische toxiciteit	7,00		134.3	kg 1.4-DB eq.
Fotochemische oxidant...	64,00		14.5	kg C2H4 eq.
Verzuring	684,00		251.1	kg SO2 eq.
Eutrofiering	1608,00		29.5	kg PO4 eq.

Figuur 9.2: Overzicht van de werking van de ontwerptool, met rechts een deel van de geïmporteerde data

9.3.2.2 Per alternatief

Overzicht berekening ESL-factor

In principe is de weergave bij de invoer voor de berekening van de ESL-factor duidelijk. Voor de overzichtelijkheid is ervoor gekozen om daarnaast een overzicht bij de uitvoer te presenteren.

Milieukosten draagconstructie

De berekende milieukosten van de draagconstructie kunnen op verschillende wijzen worden gepresenteerd. De gegevens kunnen in tabelvorm worden weergegeven. Daarnaast kunnen de milieukosten van de draagconstructie worden getoond in een overzichtelijk grafiek, met de kosten per onderdeel van de draagconstructie.

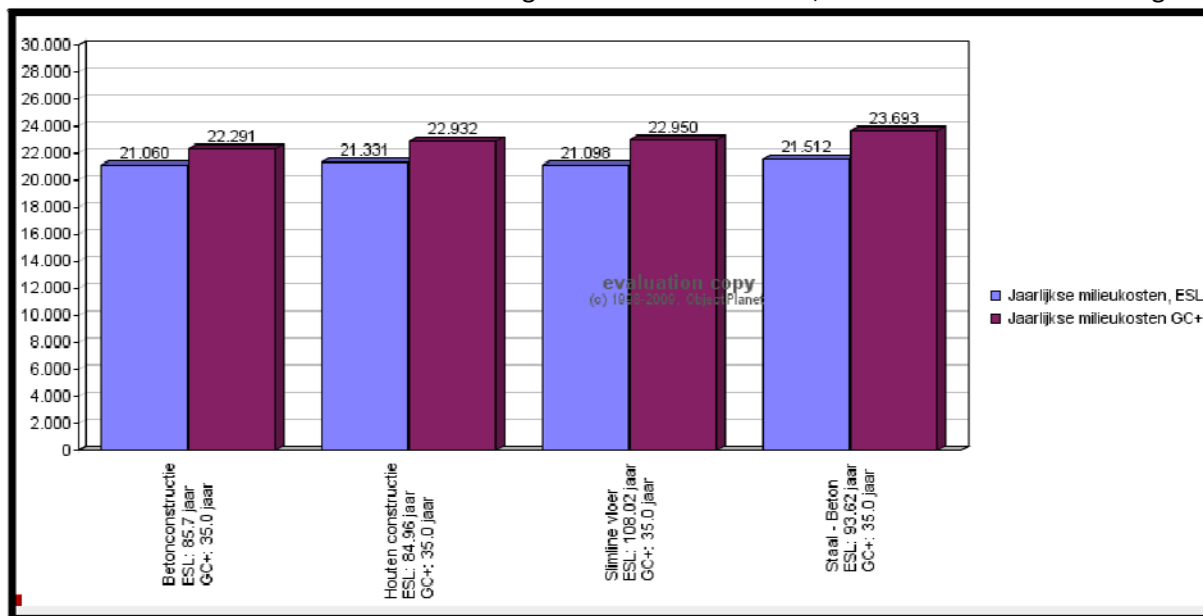
Op basis van de geïmporteerde milieukostenberekening van GreenCalc+ en de berekende verwachte levensduur van het gebouw, worden ook de totale milieukosten en de jaarlijkse milieukosten voor het ontwerp berekend. Ook deze kunnen in tabelvorm en in overzichtelijke grafieken worden weergegeven. Verder is het mogelijk om de resultaten van de milieukostenberekening te exporteren naar een Excel-bestand in de map van het betreffende alternatief. De resultaten zullen dan op eenzelfde wijze worden getoond als de uitvoergegevens van de in GreenCalc+ gemaakte milieukostenberekening (een voorbeeld is te vinden in bijlage 2).

9.3.2.3 Vergelijking van de verschillende varianten

De resultaten van de milieukostenberekening voor de verschillende constructieve alternatieven worden hier in overzichtelijke grafieken weergegeven. De gegevens kunnen op de volgende wijzen worden weergegeven:

- Vergelijking van de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie voor de verschillende ontwerpen, opgesplitst per onderdeel van de constructie
- Vergelijking van de totale milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie.

- Vergelijking van de jaarlijkse milieukosten voor de verschillende ontwerpen, berekend op basis van de berekende verwachte levensduur
- Vergelijking van de jaarlijkse milieukosten per ontwerp, berekend met de verwachte levensduur en de door GreenCalc+ gehanteerde levensduur, zie onderstaande afbeelding.



Figuur 9.3: Vergelijking van de jaarlijkse milieukosten per ontwerp, berekend met de verwachte levensduur en de door GreenCalc+ gehanteerde levensduur.

9.4 Conclusie over gebruik van de tool

Voordat begonnen is met de ontwikkeling van de ontwerptool, is een programma van eisen opgesteld. Er kan geconcludeerd worden dat de tool geheel voldoet aan deze eisen.

De werking van de tool komt redelijk overeen met die van GreenCalc+. Gegevens kunnen zowel geïmporteerd als geëxporteerd worden. Het importeren van de milieukosten, berekend met GreenCalc+ is eenvoudig. Het exporteren maakt het mogelijk om resultaten met derden te delen. Verder is het mogelijk om projecten aan te maken met verschillende ontwerpen.

De invoer is eenvoudig en niet tijdrovend, doordat de gegevens gemakkelijk kunnen worden ingevoerd, aangepast of verwijderd. Dit is gebleken uit het invoeren van de verschillende constructieve ontwerpen, zie hoofdstuk 10.

De resultaten van de milieukosten berekening kunnen per alternatief zowel in tabelvorm of in een grafiek worden getoond. Daarnaast kunnen de resultaten in absolute waarden worden getoond of in percentages. Verder kunnen verschillende totaaloverzichten worden getoond, zodat de gewenste gegevens eenvoudig uit de resultaten kunnen worden gedestilleerd.

Qua uiterlijk en indeling lijkt het programma redelijk op GreenCalc+. Het navigeren tussen de verschillende onderdelen doormiddel van een boomstructuur komt overeen met de werking van GreenCalc+.

Bij de ontwikkeling van de tool is rekening gehouden met het feit dat de tool zal worden doorontwikkeld. Het is dan belangrijk dat bepaalde aspecten gemakkelijk kunnen worden aangepast. Door de tool gebruikt maakt van verschillende databases die zijn opgebouwd in Excel, kunnen de gegevens gemakkelijk worden aangevuld en up-to-date worden gehouden.

Er is veel aandacht besteed aan de werking van de tool. Wanneer deze immers niet gebruiksvriendelijk is zal er maar weinig gebruik van worden gemaakt. Dit heeft geresulteerd in een ontwerptool waarvan gesteld kan worden dat deze zeer gebruiksvriendelijk is.

10 Constructieve alternatieven

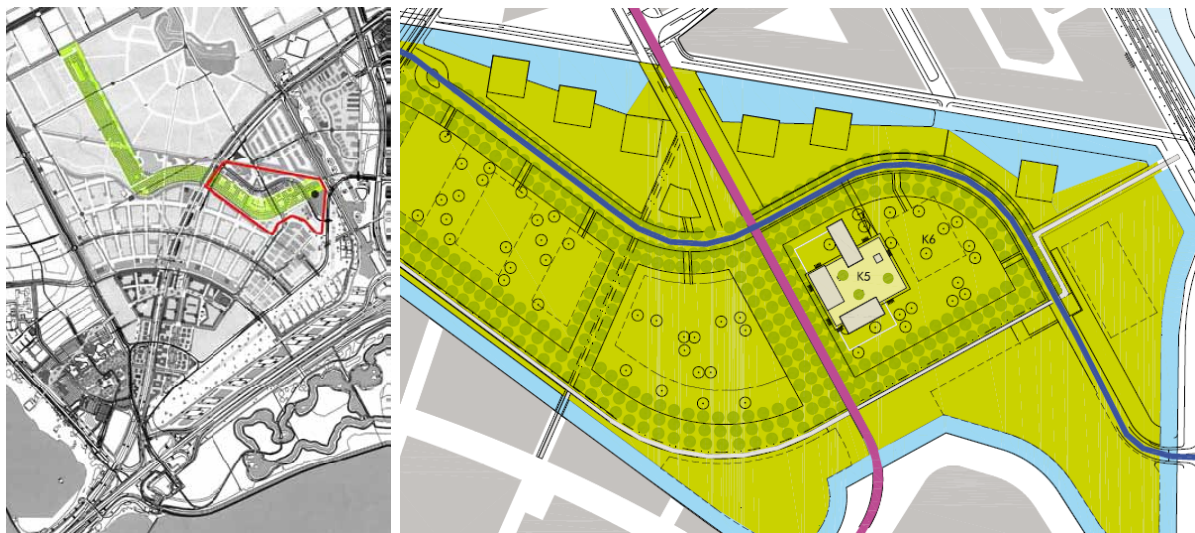
Naast het ontwikkelen van de ontwerptool ter beoordeling van de duurzaamheid van een constructief ontwerp, is voor het toetsen gekozen om enkele constructieve alternatieven voor een bepaald kantoorgebouw te ontwerpen. Deze constructieve alternatieven zullen met de tool worden getoetst op duurzaamheid. Daarnaast kan hiermee de werking van de tool worden beoordeeld. Allereerst dient er een project en gebouw worden gekozen waarvoor de alternatieven worden ontwikkeld. Aangezien dit afstudeeronderzoek in het teken staat van duurzaamheid, is het interessant om project te kiezen waarbij dit onderwerp als basis is genomen. Het bovengenoemde in beschouwing genomen is er gekozen voor het volgende project: Campus Villa's Cascade Park te Almere¹².

10.1 Campus Villa's Cascade Park te Almere

Om innovaties op het gebied van duurzaamheid te versnellen heeft Dura Vermeer Vastgoed begin 2008 een samenwerking gesloten met de Technische Universiteit Delft. Deze samenwerking komt voort uit de gezamenlijke ambitie om klimaatneutraal vastgoed te realiseren, dat geen milieubelastende erfenis voor toekomstige generaties achterlaat. Om de ontwikkelde kennis direct toe te passen is samen met de TU Delft een aantal pilotprojecten gestart. Eén van deze pilotprojecten is het plan voor drie kantoorvilla's in Almere Poort.

Het ontwikkelingsplan voor Cascadepark Oost is erop gericht duurzaamheid in al haar facetten tot uiting te laten komen. De ambities ten aanzien van setting, architectuur en duurzaamheid liggen dan ook op een hoog niveau. Naast aandacht voor groen en functiemenging, zijn duurzaam gebruik van materialen en energie, gebruikscomfort en bereikbaarheid belangrijke thema's. Het Cascadepark moet een inspirerend voorbeeld worden op het gebied van duurzaamheid.

Het kavel waarop de drie villa's worden gerealiseerd, kavel K5, maakt onderdeel uit van het meest oostelijk gelegen kamer in de groene bomenslinger van Cascadepark en heeft een oppervlakte van ongeveer 5.000 m². Het plan voor de drie campusvilla's bestaat uit ruim 6.500 m² kantoren met een gebouwde parkeervoorziening op eigen terrein.

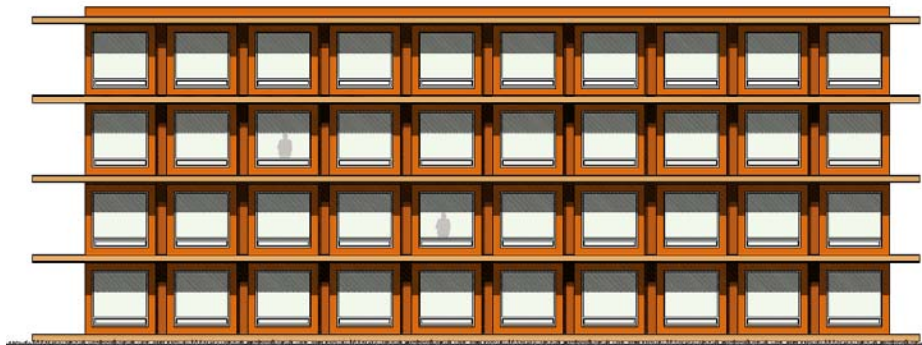


Figuur 10.1: Overzicht van het gebied en het project

¹² Deze keuze is gemaakt in overleg met dhr. Pim Peters. Aangezien duurzaamheid centraal staat in het project, adviseerde hij om aan dit project te werken.

10.1.1 Architectuur

In de architectuur is gezocht naar een vertaling van een nieuw duurzaam kantoorconcept en een duidelijke relatie met het park. Grote glazen puien brengen het daglicht tot diep in de kantoren en maken een optimale beleving van de natuurlijke omgeving mogelijk. De zeer grote houten kozijnen bevatten individueel te openen delen, zodat gebruikers hun binnenklimaat kunnen regelen. De uitstraling van de kantoorvilla's wordt daarnaast sterk bepaald door de houten luifels, die behalve als zonwering dienst doen als bordes voor gevelonderhoud. Door de gebouwen in hout uit te voeren wordt aansluiting gezocht bij het park en krijgen de kantoren een natuurlijke uitstraling. Duurzaamheid is dan ook alom in het interieur en exterieur zichtbaar en keert in de paviljoens terug in vele vormen: compacte volumes, flexibiliteit in gebruik, bewust materiaalgebruik, optimaal gebruik van daglicht en maximaal gebruikscomfort. Kortom, een inspirerende werkomgeving, gericht op uiteenlopende gebruiksmogelijkheden.

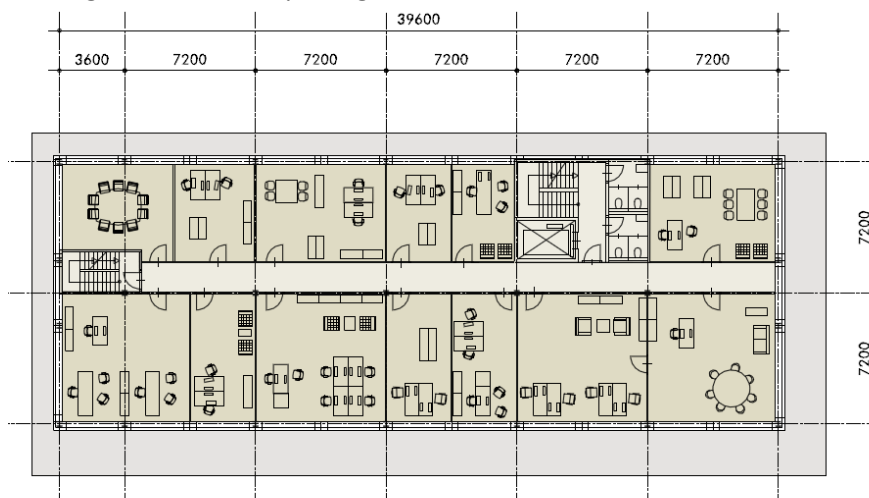


Figuur 10.2: Impressie uiterlijk gebouw.

10.1.2 De kantoorvilla's

Twee van de drie kantoorvilla's, Villa I en Villa III, zijn opgezet als multi-tenant gebouw, voor meerdere gebruikers per gebouw of deelgebruik per verdieping. Deze multi-tenant kantoren zijn in twee verschillende dieptematen uitgevoerd, zodat alle typen kantoorconcepten kunnen worden ondergebracht, afhankelijk van de gebruikswensen. Beide kantoren bestaan uit vier lagen. Villa II is bedoeld voor één gebruiker. Dit kantoor heeft een diepte van 16,20 m en biedt alle mogelijkheden voor toekomstgerichte kantoorconcepten en uiteenlopende functies. Het kantoor heeft een lengte van 36,0 m en bestaat uit drie lagen.

Bij het ontwerp van de villa's vormt een compacte gebouwmassa het uitgangspunt, zodat een efficiënte en energiezuinige plattegrond ontstaat. De onderstaande afbeelding toont een mogelijke indeling van de kantoorplattegrond:



VILLA I

Figuur 10.3: Mogelijke indeling van de kantoorplattegrond

10.1.3 Opzet constructieve alternatieven

De constructieve ontwerpen zullen voor Villa I worden gemaakt. De kantoorvilla heeft een lengte van 39,6 m en een breedte van 14,4 m. De hoogte van het gebouw kan variëren per ontwerp.

Om uiteindelijk interessante resultaten te kunnen analyseren, is ervoor gekozen om in totaal vier constructieve ontwerpen te maken. Bij de ontwikkeling van de constructieve alternatieven zal de, gedurende het afstudeeronderzoek, verkregen kennis over duurzaam construeren worden toegepast. De constructieve ontwerpen zullen vervolgens worden ingevoerd in de ontwerptool. Hiermee kunnen de ontwerpen worden getoetst en vergeleken en tevens kan de werking van de tool worden beoordeeld.

Voor de verschillende constructieve ontwerpen is gekozen voor de volgende varianten:

- Betonnen variant
- Staal-beton variant
- Houten variant
- Staal-beton variant, gericht op een flexibel ontwerp

10.1.3.1 Materiaalkeuze

Voor de milieukostenberekening zijn de verschillende constructieve ontwerpen doorgerekend bij zowel een uitvoering in standaard als een uitvoering in duurzame materialen.

De standaard materiaalkeuze betekent het toepassen van:

- Hout, standaard bosbouw
- Beton, zonder aanvulling met betongranulaat
- Staal, 37% secundair en 63% primair staal (in overeenkomst met de Nat. materialendatabase)

De duurzame materiaalkeuze betekent het toepassen van:

- Hout, duurzame bosbouw
- Beton, waarvan 20% betongranulaat
- Staal, 37% secundair en 63% primair staal (in overeenkomst met de Nat. materialendatabase)

10.1.3.2 Vloersystemen

Uit een onderzoek van CUR (21) naar het toepassen van beton in diverse delen van constructies, is gebleken dat de verdeling van de betonvolumes van constructies in woon- en industriebouw als volgt is:

- | | |
|-------------------|-----|
| - Fundering | 22% |
| - Dragende wanden | 4% |
| - Kolommen | 5% |
| - Platen | 59% |
| - Diversen | 10% |

Er valt wat betreft materiaalbesparing dus een grote winst te behalen in de keuze voor de uitvoering van de vloeren.

Voor de uitvoering in beton zijn twee verschillende vloersystemen bekeken. Het materiaalgebruik wordt door de toepassing van deze vloeren verminderd en daarnaast zijn de vloersystemen geschikt voor de gewenste grote overspanningen. De beschouwde vloersystemen zijn:

- De kanaalplaatvloer
- De Airdeck vloer

Aangezien de bovengenoemde vloersystemen interessant zijn voor de beoordeling van de duurzaamheid, is ervoor gekozen om het Airdeck vloersysteem toe te passen in het constructieve

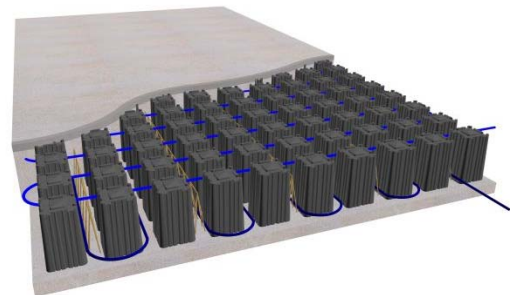
ontwerp welke volledig is uitgevoerd in beton. De kanaalplaatvloer is als uitgangspunt genomen in het ontwerp welke is uitgevoerd in staal en beton. Voor de houten variant is gekozen voor het Lignatur vloersysteem en voor de staal-beton variant, welke is gericht op een flexibel ontwerp, is gekozen voor het Slimline vloersysteem. De vloersystemen worden nader toegelicht bij het desbetreffende constructieve alternatief.

10.1.4 Uitwerking constructief ontwerp 1: Beton

Op basis van de hieronder beschreven constructie zijn de materiaalhoeveelheden berekend. De berekeningen voor het constructieve ontwerp zijn te vinden in bijlage 4.2. Hieronder worden kort de belangrijkste keuzes en aspecten in het ontwerp toegelicht. De in de ontwerptool ingevoerde gegevens voor de bepaling van de materiaalhoeveelheden zijn weergegeven in bijlage 4.2.3.

Zoals in 10.1.3.2 is vermeld, is het uitgangspunt voor dit ontwerp de kanaalplaatvloer. De Dycore Airdeck vloer is een breedplaatvloer, die is voorzien van betonsparende sparende elementen (verder airboxen genoemd). De airboxen worden middels een robot op de breedplaat elementen geplaatst waar dat constructief verantwoord is, zodat in het werk minder beton voor de constructieve druklaag benodigd is. De vloer is daardoor lichter in vergelijking met een massieve plaatvloer, waardoor bij gelijke belasting minder wapening benodigd is, dan wel een grotere overspanning kan worden gerealiseerd. Bij gebouwen met meerdere verdiepingvloeren kan dit tevens leiden tot een lichtere ondersteuningsconstructie en een lichtere fundering.

Een Airdeck-plaat element heeft een lengte van maximaal 9,0 m en is standaard 3,0 m breed. Gedurende de montage zijn de plaat elementen onderstempeld.



Overzicht van enkele voordelen van het vloersysteem:

- Besparing op het beton van de in het werk te storten druklaag
- Grote vrijheid van ontwerpen en vormgeven voor architecten;
- Lichtere draagconstructie en fundering bij meerverdiepingsbouw;
- Minder wapening door lichtere vloer, of hogere belastbaarheid, of grotere overspanningen;
- Gave en vlakke onderzijde met een kleine strakke v-naad;
- Snelle montage door standaardbreedte van 3000 mm;
- Bovenwapening eenvoudig aan te brengen.

Er is gekozen voor redelijk grote overspanningen. Dit resulteert in een kolomstramien in de lengterichting van 1x 7,2 m en 4x 8,1 m. Het kolomstramien in de breedterichting is 7,2 m. Een prefab betonnen kern en een windverband in de gevel voorzien in de stabiliteit van het gebouw.

Vloeren

De begane grondvloer is opgebouwd uit geïsoleerde kanaalplaatvloeren. Deze kanaalplaten kunnen maximaal 10,0 m overspannen(22). Er is gekozen voor de isolatieplaatvloer 200 met een overspanning van 7,2 m.

Voor de verdiepingvloeren en het dak is gekozen voor een Airdeck(23) vloer. Op basis van de kolomafstanden en de belastingen, zie bijlage 4.2.1, is er gekozen voor een Airdeck vloer met een hoogte van 390 mm, inclusief druklaag. Vervolgens is de wapening in de vloer gecontroleerd. Het toegepaste wapeningspercentage ligt binnen het economische wapeningspercentage, voor vloeren: $0,3 < \omega_0 < 0,7\%$. De controle op het ponsen van de vloer is gedaan na de bepaling van de minimale kolomafmetingen.

Kolommen

De kolommen zijn beschouwd als aan beide zijden scharnierend. De afmetingen van de kolommen zijn bepaald op de maatgevende kolommen in de gevel en in as-B, zie plattegrond in bijlage 4.2.

Kolom as-B:

De minimale afmetingen voor de maatgevende kolom in as-B op de begane grond zijn berekend op $350 \times 350 \text{ mm}^2$. Ter plaatse van de kolommen worden geen airboxen in de Airdeck vloer geplaatst, dit ter voorkoming van het doorponsen van de vloer. De afmetingen van de kolommen zijn bepalend bij de controle van pons van de vloer. Uit de controle blijkt dat bij de minimale kolomafmetingen de toelaatbaar optredende schuifspanning wordt overschreden. De mogelijkheid om een kolomplaat aan te brengen of extra wapening is beschouwd. Gekozen is om de kolomafmetingen te vergroten naar $400 \times 400 \text{ mm}^2$ en om extra vloerwapening aan te brengen ter plaatse van de kolom. De kolommen op bovenliggende verdiepingen kunnen verjongd worden. Er is echter gekozen om de afmetingen gelijk te houden en het wapeningspercentage te verminderen.

Gevelkolom:

De minimale afmetingen voor de maatgevende middenkolom op de begane grond zijn berekend op: $200 \times 200 \text{ mm}^2$. Met het oog op brandveiligheid is er gekozen om de kolommen $300 \times 300 \text{ mm}^2$ uit te voeren. Uit de controle van de pons blijkt dat de optredende schuifspanning kleiner is dan de maximaal toelaatbare schuifspanning: $\tau_d = 0,55 \text{ N/mm}^2 < \tau_1 = 1,12 \text{ N/mm}^2$.

Fundering

De afmetingen voor de funderingsbalken zijn: $350 \times 650 \text{ mm}^2$. Voor de oplegging van de kanaalplaten op de funderingsbalk wordt de balk aan de onderkant aan beide zijdes met 100 mm verbreed. Voor de kolom-balk aansluiting is ter plaatse van de kolom een verbreding benodigd. Bij de verbinding van de funderingspalen met de funderingsbalk is voldoende ruimte beschikbaar voor paalafwijkingen (100 mm).

Funderingspalen

De lengte van de funderingspalen is aangenomen op 15 m. Aangezien er geen grondgegevens bekend zijn, is de maximaal toelaatbare grondspanning aangenomen op 7 N/mm^2 .

In as-B worden per kolom vier funderingspalen $450 \times 450 \text{ mm}^2$ toegepast. Ter plaatse van de kern zullen tevens funderingspalen $450 \times 450 \text{ mm}^2$ worden toegepast. Ter plaatse van de kolommen in de gevel (lange zijde) kan worden volstaan met twee funderingspalen $400 \times 400 \text{ mm}^2$ per kolom.

Stabiliteitsvoorzieningen

De kernafmetingen zijn globaal bepaald. De prefab betonnen kern heeft een wanddikte van 250 mm. Ter voorkoming van rotatie van de constructie is een windverband aangebracht in de as-1, tussen as-B en as-C.

Een overzicht van de constructie en enkele detailtekeningen zijn te vinden in bijlage 4.2.5.

10.1.5 Uitwerking constructief ontwerp 2: Beton en staal

De berekeningen voor het constructieve ontwerp zijn te vinden in bijlage 4.3. Hieronder worden kort de belangrijkste keuzes en aspecten in het ontwerp toegelicht. De in de ontwerptool ingevoerde gegevens voor de bepaling van de materiaalhoeveelheden zijn weergegeven in bijlage 4.3.3.

Zoals in 10.1.3.2 is vermeld, is het uitgangspunt voor dit ontwerp de kanaalplaatvloer. De kanaalplaatvloer wordt veelvuldig toegepast in de utiliteitsbouw. De vloeren kunnen een grote afstand overspannen, bij een redelijk hoge belasting en een laag eigen gewicht. Door eenvoudige verwerkbaarheid en directe belastbaarheid is een hoog bouwtempo mogelijk. In de elementen zijn

kanalen aangebracht waardoor de vloer een laag eigen gewicht heeft en in combinatie met voorspanning zijn overspanningen tot ca. 18,00 m¹ mogelijk. Enkele voordelen van het vloersysteem:

- Vlakke vloer met een laag eigen gewicht;
- Vrije overspanningen mogelijk tot 18,00 m¹;
- Hoge toelaatbare belastingen;
- Gaaf en strak voegdetail.

Gezien de afmetingen van het gebouw (14,4 m breed) is ervoor gekozen om de gehele breedte te overspannen, waarmee de kwaliteiten van de kanaalplaten worden benut. Het kolomstramien in de lengte-richting is vastgesteld op 5 x 7,2 m + 1 x 3,6 m. Met dit kolomstramien wordt een hoge indelingsvrijheid gerealiseerd. Dit heeft een positief effect op de ESL-factor. De kanaalplaten zijn opgelegd op doorgaande stalen liggers. De kolommen zijn tevens stalen profielen. Een stalen kern voorziet in de stabiliteit.

10.1.5.1 Berekeningen

Vloeren

De begane grondvloer is opgebouwd uit geïsoleerde kanaalplaatvloeren. Deze kanaalplaten kunnen maximaal 10,0 m overspannen¹³. Er is gekozen voor de isolatieplaatvloer U200 met een overspanning van 7,2 m.

Voor de verdiepingvloeren en het dak is, op basis van de overspanning van 14,4 m en de werkende belasting, voor het type K400 gekozen. Boven zijn eigen gewicht is dit type kanaalplaatvloer in staat om bij een overspanning van 14,4 m een gewicht van 8,0 kN/m² te dragen.

De kanaalplaten worden opgelegd op stalen liggers. Voor de liggers is gekozen voor het type petligger. Dit profiel is zeer geschikt voor de oplegging van de kanaalplaten. Een voordeel van de petligger in combinatie met de kanaalplaten is dat de totale vloerdikte wordt beperkt. Daarnaast worden de kanaalplaten ingesloten door de stalen liggers, waardoor schijfwerking wordt ontwikkeld, zonder de toepassing van een druklaag. Het materiaalgebruik wordt hierdoor verminderd en dit heeft een positief effect op de duurzaamheid.

Liggers

Voor de gevelliggers op de lange zijde is het volgende profiel berekend:

- THQ 265 x 6 – 290 x 20 – 500 x 10

Dit profiel wordt tevens toegepast in de kern, daar waar de kanaalplaten zijn opgelegd.

De gevelliggers op de korte zijde zijn uitgevoerd als U-profiel met een hoogte van 400 mm. Door deze hoogte sluit het profiel goed aan op de kanaalplaten. Dit profiel is tevens toegepast in de kern.

Kolommen

Het profiel van de kolommen is zo gekozen, dat de verbinding tussen de ligger en de kolom eenvoudig kan worden gerealiseerd. Door te kiezen voor een buisprofiel met een gelijke breedte als de koker van de petligger, is de kolom-ligger verbinding goed uitvoerbaar. Het gekozen profiel voor de kolommen is: RHS 300 x 300 x 12,5. Het is mogelijk om de kolommen te verjongen naarmate deze minder worden belast. In dit voorontwerp is er echter voor gekozen om de kolomafmetingen gelijk te houden, over de gehele hoogte van de constructie.

In de petligger zullen schotjes moeten worden aangebracht om de drukkracht uit de kolom van de bovenliggende verdieping af te dragen naar de kolom van de onderliggende verdieping.

De kolommen in de kern zijn uitgevoerd als HE300A. Hierdoor is een goede aansluiting te realiseren met de THQ-liggers en met de windverbanden in de kern.

¹³ <http://www.vbi.nl/?pageID=100&Title=Vloeren&Productgroep=4>

Fundering

De funderingsbalken in de constructie hebben de volgende afmetingen: 300 x 600 mm². Er zijn geen grondgegevens bekend, aangenomen is een benodigde paallengte van 15 m. Verder is een maximale grondspanning aangenomen van 7 N/mm². Onder de kolommen in as-B komt één funderingspaal met de afmetingen 300 x 300 mm². Onder de gevelkolommen op de lange zijde zijn drie funderingspalen 400 x 400 mm² benodigd. Per kolom in de stabiliteitskern worden 2 funderingspalen 350 x 350 toegepast.

Stabiliteitsvoorzieningen

De stabiliteit wordt verzorgd door een stalen kern en een windverband in de gevel, ter voorkoming van de rotatie van het gebouw.

Een overzicht van de constructie en enkele detailtekeningen zijn te vinden in bijlage 4.3.5.

10.1.6 Uitwerking constructief ontwerp 3: Hout

Voor de houten constructie is gekozen voor een Lignatur vloersysteem. Deze bestaat uit houten kanaalplaten. Het vloersysteem is zeer interessant met het oog op duurzame ontwikkeling.

Lignatur elementen zijn industrieel vervaardigde houtbouwelementen, die zich met name laten toepassen in dragende vloer en dak constructies. Met houten lamellen worden holle kanalen gemaakt die toepasbaar zijn als een houten kanaalplaat. Grote overspanningen en hoge belastingen worden daardoor met minimale hoogte bereikt.

De vloeren kunnen gelijktijdig een dragende, esthetische en geluidswerende functie vervullen. Verder zijn ook warmtewerende, akoestisch absorberend en brandwerende functies mogelijk. Enkele eigenschappen van het systeem zijn:

- Laag eigen gewicht
- Hoog draagvermogen
- Lage sparingsflexibiliteit
- Brandwerendheid 90 min.



Figuur 10.4: Lignatur vloersysteem: houten kanaalplaatvloer.

De constructie wordt geheel in hout uitgevoerd. Er is gekozen voor het volgende kolomstramien:

- Lengterichting: 1 x 3,6 m + 5 x 7,2 m
- Breedterichting: 7,2 m

10.1.6.1 Berekeningen

De berekeningen voor het constructieve ontwerp zijn te vinden in bijlage 4.4. Hieronder worden kort de belangrijkste keuzes en aspecten in het ontwerp toegelicht. De in de ontwerptool ingevoerde gegevens voor de bepaling van de materiaalhoeveelheden zijn weergegeven in bijlage 4.4.3.

Vloeren en dak

De kanaalplaten overspannen 7,2 m. Op basis van de belasting en de overspanning is uit de tabellen voor de Lignatur kanaalplaten gekozen voor het type LFE320. De vloer wordt voor alle bouwlagen toegepast, uitgezonderd de begane grond waar gekozen is voor een geïsoleerde betonnen kanaalplaatvloer. De houten kanaalplaten worden opgelegd op hoekliggers, die bevestigd zijn aan de houten liggers. Hierdoor kan de vloerdikte worden beperkt.

Liggers

De liggers zijn doorgaand uitgevoerd.

De afmeting van de ligger in as-B, zie Figuur 4.6, is 220 x 700 mm². De gevelliggers in as-A en as-C zijn iets minder belast. De gekozen afmeting voor de liggers is 220 x 600 mm². De gevelliggers op de korte zijde worden nauwelijks belast. Deze liggers zijn 220 x 320 mm² uitgevoerd. De hoogte is zo gekozen dat deze gelijk is aan de hoogte van de verdiepingsvloer.

Aan de liggers worden hoekprofielen 100 x 100 x 10 bevestigd, waarop de houten kanaalplaten kunnen worden opgelegd.

Kolommen

De breedte van de kolommen is afgestemd op de breedte van de liggers, namelijk 220 mm. Dit vereenvoudigd de kolom-ligger aansluiting. De kolommen zijn gedimensioneerd op druksterkte en op knikstabiliteit. De kolommen zijn aan beide zijden scharnierend. De afmetingen zijn voor alle kolommen in de constructie zijn bepaald op 220 x 400 mm².

Fundering

De afmetingen voor de funderingsbalken zijn: 300 x 600 mm². Voor de oplegging van de houten kanaalplaten op de funderingsbalk wordt de balk aan de onderkant aan beide zijdes met 100 mm verbreed.

Ter plaatste van de kolommen in as-B worden 2 x 350 x 350 mm² funderingspalen toegepast. Ter plaatste van de gevel wordt één funderingspaal 350 x 350 mm² voldoende geacht.

Bij de verbinding van de funderingspalen met de funderingsbalk is voldoende ruimte beschikbaar voor paalafwijkingen (100 mm).

Stabiliteitsvoorzieningen

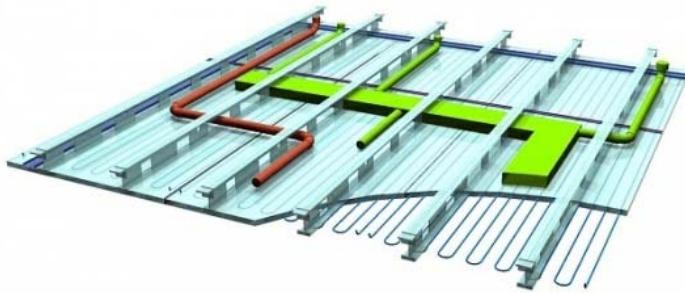
Het ontwerp voor de stabiliteitsvoorzieningen is gelijk aan die voor constructief ontwerp 2, zie bijlage 4.3.2.4. De kolommen en liggers worden nu echter in hout uitgevoerd. De kolommen in de kern zijn gelijk aan de overige kolommen in de constructie. Voor de liggers in de kern zijn de volgende afmetingen aangehouden: 220 x 320 mm².

Een overzicht van de constructie en enkele detailtekeningen zijn te vinden in bijlage 4.4.5.

10.1.7 Uitwerking constructief ontwerp 4: Slimline

De berekeningen en enkele tekeningen en details voor het constructieve ontwerp zijn te vinden in bijlage 4.5. Hieronder worden kort de belangrijkste keuzes en aspecten in het ontwerp toegelicht. De in de ontwerptool ingevoerde gegevens voor de bepaling van de materiaalhoeveelheden zijn weergegeven in bijlage 4.5.3.

Voor het laatste ontwerp is gekozen voor het toepassen van een zeer flexibel vloersysteem, namelijk het Slimline vloersysteem. Het Slimline-basiselement is een betonnen plafondplaat met ingestorte staalprofielen. De plafondplaat is ca. 70 mm dik en is meestal voorzien van leidingen, waarmee het plafond kan worden gekoeld en desgewenst verwarmd. Dankzij de dunne plaat wordt de ruimte snel gekoeld of verwarmd. Eén van de belangrijkste eigenschappen van Slimline is de optimale bereikbaarheid van leidingen en installaties via de vloer. In de praktijk is er daardoor buiten de schacht minimaal tot geen cross-over met horizontale leidingen. Veranderen van de binnenruimte wordt hierdoor aanzienlijk vereenvoudigd. Het toepassen van de Slimline-vloer verhoogt de flexibiliteit van het gebouw en heeft dus een positief effect op de duurzaamheid van het gebouw.



Figuur 10.5: Impressie van het Slimline vloersysteem.

10.1.7.1 Berekeningen

Vloeren

De begane grondvloer is opgebouwd uit geïsoleerde kanaalplaatvloeren. Deze kanaalplaten kunnen maximaal 10,0 m overspannen. Er is gekozen voor de isolatieplaatvloer U200 met een overspanning van 7,2 m. Voor de verdiepingvloeren en het dak is, op basis van de overspanning van 7,2 m en de werkende belasting, gekozen voor een Slimline vloersysteem, opgebouwd uit IPE270 profielen, die h.o.h. 900 mm zijn geplaatst.

De bevestiging van de elementen is eenvoudig te realiseren, doormiddel van aangelaste plaatjes aan de stalen liggers. De schijfwerking van de vloer wordt tot stand gebracht door voorzieningen in de betonnen plaat, welke op locatie aan elkaar worden gelast.

Liggers en kolommen

De liggers zijn doorgaand toegepast. De afmetingen zijn: 300 x 500 mm². De kolommen zijn gedimensioneerd op een brandwerendheid van 90 minuten. De afmetingen zijn gekozen op: 300 x 300 mm².

Fundering

De afmetingen van de funderingsbalken zijn vastgesteld op 300 x 600 mm² voor de funderingsbalk in as-B, met twee funderingspalen 450 x 450 mm² per kolom en 300 x 550 mm² voor de funderingsbalken in de gevel en de kern met twee funderingspalen 350 x 350 mm² per kolom.

Stabiliteitsvoorzieningen

De kernafmetingen zijn globaal bepaald. De prefab betonnen kern heeft een wanddikte van 250 mm. Ter voorkoming van rotatie van de constructie is een windverband aangebracht in de as-1, tussen as-B en as-C.

Een overzicht van de constructie en enkele detailtekeningen zijn te vinden in bijlage 4.5.5.

10.2 Vergelijking van de constructieve alternatieven op duurzaamheid

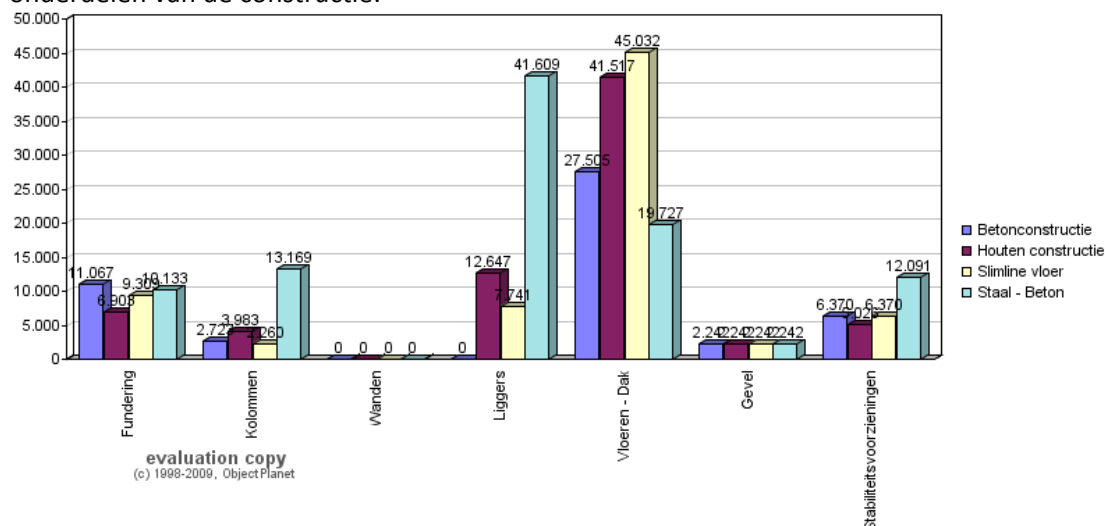
De vergelijking van de constructieve alternatieven op duurzaamheid is gebaseerd op de jaarlijkse milieukosten. Deze zijn opgebouwd uit de jaarlijkse kosten voor het materiaalgebruik en energie- en waterverbruik van het beschouwde gebouw. Voor de verschillende alternatieven zijn de jaarlijkse milieukosten voor het energie- en waterverbruik gelijk, aangezien de gegevens van het in GreenCalc+ ingevoerde gebouw op alle vier de ontwerpen van toepassing zijn. De verschillen in de milieukosten zijn te vinden in het materiaalgebruik in de constructie en in de berekende verwachte levensduur van de constructie.

Om een goed inzicht te verkrijgen voor de vergelijking van de alternatieven, worden de ontwerpen op de volgende wijze beoordeeld:

- Vergelijking op basis van het materiaalgebruik in de constructie
- Vergelijking op basis van de jaarlijkse milieukosten in de constructie

10.2.1 Vergelijking op basis van het materiaalgebruik in de constructie

In de onderstaande figuur wordt een overzicht getoond van de milieukosten in de constructie voor de vier constructieve ontwerpen bij standaard materiaalgebruik¹⁴, opgesplitst in de verschillende onderdelen van de constructie:



Figuur 10.6: Overzicht van de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de constructie bij standaard materiaalgebruik

De grafiek toont een aantal opvallende gegevens.

Allereerst wordt er gekeken naar de fundering. De milieukosten voor de vier ontwerpen zijn ongeveer gelijk. De houten constructie is de meest lichte constructie. Hierdoor vallen de milieukosten voor de fundering het laagste uit.

Bij het constructie onderdeel 'Kolommen' is een groot verschil zichtbaar in de milieukosten. De milieukosten voor de staal-betonconstructie zijn vele malen hoger dan bij de overige ontwerpen. In de staal-betonconstructie bedraagt het materiaalgebruik van het staal in de kolommen ongeveer een derde van het materiaalgebruik van beton, verwerkt in de kolommen van de betonnen en 'Slimline' constructie. Ten opzichte van de houten constructie is het gewicht ongeveer twee maal zo groot. De verhouding tussen de milieukosten [€/kg] voor staal en beton en hout zijn als volgt:

- Staal : Beton (1,5% gewapend) = 1,0 : 0,17
- Staal : Hout (standaard bosbouw)¹⁵ = 1,0 : 0,56

¹⁴ De constructies zijn zowel doorgerekend bij een standaard materiaalgebruik en duurzaam materiaalgebruik, zie 10.1.3.1.

¹⁵ Er is gerekend met vuren hout. In de houtconstructie is gelamineerd hout toegepast. De gegevens hiervan zijn echter nog niet in de ontwerptool beschikbaar. De milieukosten zullen in werkelijkheid dus iets hoger uitvallen.

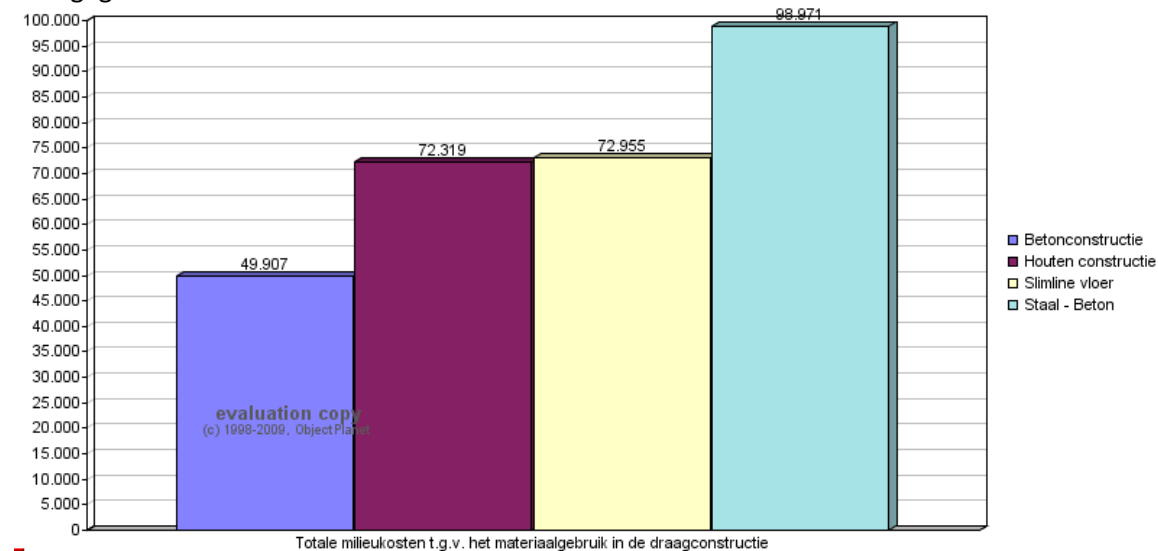
Gelet op de verhouding van de materiaalhoeveelheden in de constructie en de verhouding tussen de milieukosten per kg materiaal, is het goed te verklaren dat de milieukosten voor het onderdeel 'Kolommen' van de staal-betonconstructie hoger uitvallen dan bij de overige ontwerpen. Hetzelfde principe geldt voor het onderdeel 'Liggers'.

Interessant zijn de milieukosten voor het onderdeel 'Vloeren – dak'. Bij de betonconstructie is het Airdeck vloersysteem toegepast. Hierdoor wordt het materiaalgebruik in de vloeren flink beperkt. Echter, in vergelijking met de kanaalplaatvloer, toegepast in de staal-betonconstructie, zijn de milieukosten iets hoger. Dit komt doordat het gewicht van de Airdeckvloer (675 kg/m^2) hoger is dan het gewicht van de kanaalplaten (500 kg/m^2). Daarnaast is de hoeveelheid wapening in de kanaalplaatvloer aanzienlijk lager dan in de vlakke plaatvloer. Voor een goede vergelijking van de twee vloersystemen dienen echter de milieukosten van het onderdeel 'Liggers' mee te worden genomen, aangezien de Airdeckvloer enkel door kolommen wordt gedragen. Dan blijkt dat de Airdeck-vloer de laagste milieukosten heeft, van de twee constructies met een betonnen vloersysteem. Opvallend is dat het houten vloersysteem van Lignatur hogere milieukosten heeft t.o.v. betonnen varianten. Verder zijn de milieukosten voor de Slimline-vloer het hoogst. De Slimline vloer is opgebouwd uit een dunne betonnen schil, waarin stalen profielen zijn ingestort. Gekozen is voor stalen IPE270 profielen, h.o.h. 900 mm. Dit leidt ertoe dat het vloersysteem een aanzienlijke hoeveelheid staal bevat, wat leidt tot hoge milieukosten.

De milieukosten voor het materiaalgebruik in de gevel zijn gelijk voor alle ontwerpen, aangezien bij alle ontwerpen een niet-dragende gevel, opgebouwd uit kalkzandsteen, in rekening is gebracht. De milieukosten voor de stabiliteitsvoorzieningen verschillen met uitzondering van de stalen kern weinig per ontwerp. Een houten kern, met stalen windverbanden is de meest duurzame oplossing, gevolgd door een betonnen kern. De stalen kern is de minst duurzame oplossing.

Totale milieukosten

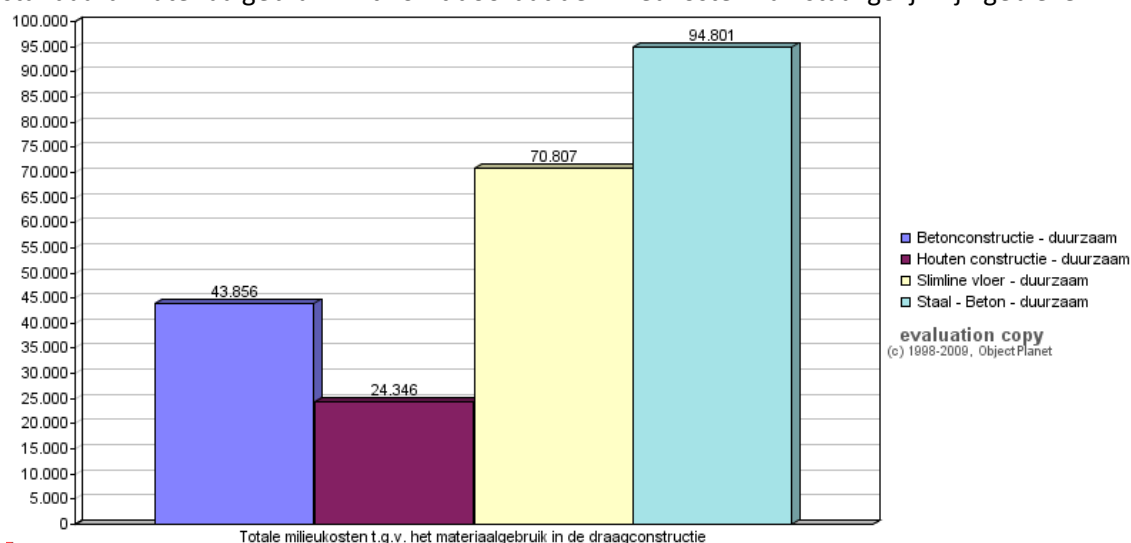
Voor de constructieve alternatieven zijn de milieukosten voor de verschillende onderdelen van de constructie behandeld. De totale milieukosten van de draagconstructie zijn hieronder per alternatief weergegeven:



Figuur 10.7: Totale milieukosten van de draagconstructie, per constructief alternatief bij standaard materiaalgebruik

Indien enkel de totale milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie in beschouwing worden genomen, kan uit de bovenstaande figuur worden gelezen dat de betonnen constructie de laagste totale milieukosten heeft, gevolgd door de houten constructie en de constructie met het Slimline vloersysteem. De milieukosten voor de staal-beton constructie zijn bijna een derde hoger dan de milieukosten van de 'Slimline' constructie en de houten constructie.

De totale milieukosten in de draagconstructie bij duurzaam materiaalgebruik zijn weergegeven in de onderstaande figuur. Hieruit blijkt dat niet de betonnen constructie, maar de houten constructie de laagste totale milieukosten heeft, gevolgd door de betonconstructie. De milieukosten voor de Slimline-constructie en de staal-betonconstructie zijn iets lager ten opzichte van de milieukosten bij standaard materiaalgebruik. Dit komt doordat de milieukosten van staal gelijk zijn gebleven.



Figuur 10.8: Totale milieukosten van de draagconstructie, per constructief alternatief bij duurzaam materiaalgebruik

10.2.2 Vergelijking op basis van de jaarlijkse milieukosten

De totale milieukosten voor een constructief ontwerp zijn interessant, maar de mate duurzaamheid van een constructie wordt bepaald aan de hand van de jaarlijkse milieukosten.

Voor de berekening van de jaarlijkse milieukosten, is per ontwerp de verwachte levensduur bepaald, zie onderstaande tabel:

Constructief ontwerp	Levensduur GC+	Verwachte levensduur
Betonconstructie	35 jaar	86 jaar
Houten constructie	35 jaar	85 jaar ¹⁶
Slimline vloer	35 jaar	108 jaar
Staal - Beton	35 jaar	94 jaar

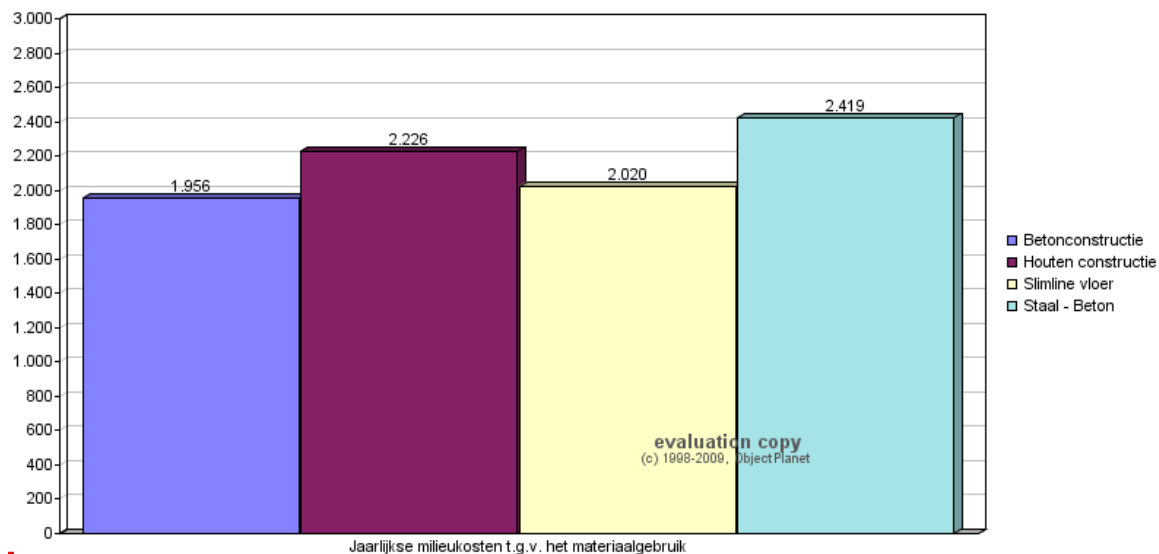
Tabel 10.1: Overzicht van de door GreenCalc+ gehanteerde levensduur en de berekende verwachte levensduur

De berekende verwachte levensduur voor de ontwerpen ontlopen elkaar niet veel. Dit komt doordat de ontwerpen veel overeenkomsten hebben. Het verschil tussen het staal-beton ontwerp en de houten en betonconstructie wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door het verschil in de vloeroverspanningen, 14,4 m t.o.v. 7,2 m. Het Slimline vloersysteem is een erg flexibel systeem. Het is gebaseerd op het integraal ontwerpen en de integratie van het leidingwerk is een belangrijk aspect van het vloersysteem. Het ontwerp wordt hierdoor als flexibeler gewaardeerd, resulterend in een hoge levensduurverwachting van het constructieve ontwerp.

In de berekening van de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw is het aspect 'Demontabel bouwen' niet meegenomen. Zoals in 8.4.10 is vermeld, wordt door middel van demontabel bouwen de verwachte levensduur van de elementen en/of constructie verlengd. Afhankelijk van de uitvoering van de constructie en hiermee de mate van demonteerbaarheid en recyclebaarheid, kan het meenemen van het aspect een reductie in de jaarlijkse milieukosten opleveren.

¹⁶ Deze levensduur is voor houten constructie hoog. Indien de constructie echter juist is uitgevoerd en zich binnen de schil van het gebouw bevindt, kan de technische levensduur van een gebouw zeer hoog zijn. Bron: Helpdesk Centrum-Hout (32).

Op basis van de milieukosten, berekend met GreenCalc+, de milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie en de berekende verwachte levensduur van de constructies zijn de jaarlijkse milieukosten bepaald. De jaarlijkse milieukosten voor het energie- en waterverbruik zijn gelijk voor de ontwerpen¹⁷, in de onderstaande tabel worden de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw getoond:



Figuur 10.9: Jaarlijkse milieukosten (€/jaar) t.g.v. van het materiaalgebruik in het gebouw bij standaard materiaalgebruik

Uit de figuur blijkt dat de betonconstructie de laagste jaarlijkse milieukosten heeft bij standaard materiaalgebruik, gevolgd door het ontwerp met het Slimline vloersysteem. De verhoudingen tussen de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw voor de betonconstructie en de overige constructieve ontwerpen zijn als volgt:

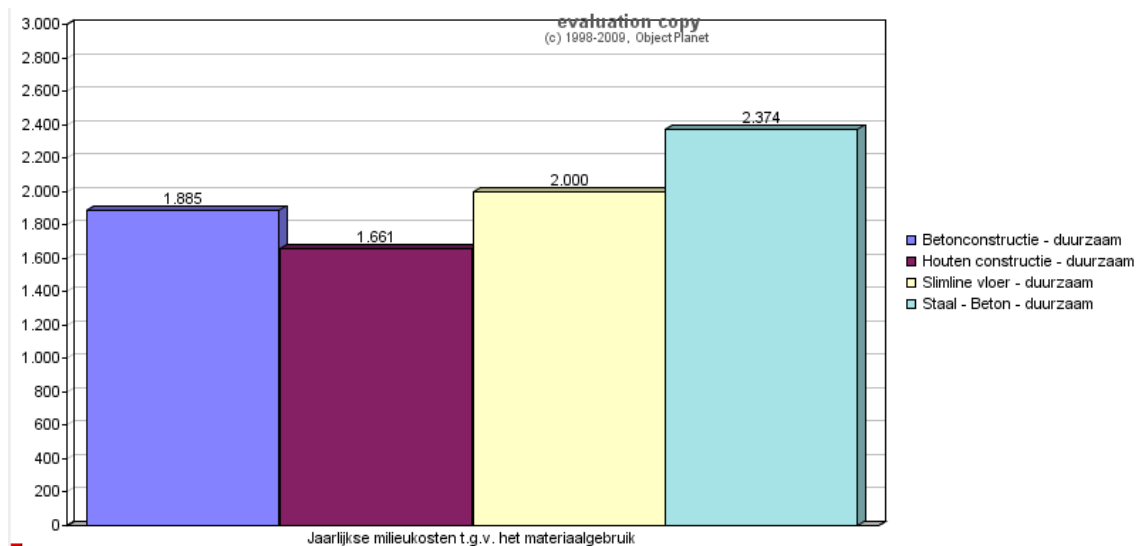
- Beton constructie : Houten constructie = 1,0 : 1,14
- Beton constructie : Slimline constructie = 1,0 : 1,03
- Beton constructie : Staal-betonconstructie = 1,0 : 1,24

Op basis van de berekende jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw kan dus geconcludeerd worden dat de betonconstructie, bij standaard materiaalgebruik, de meest duurzame constructie is voor het ontworpen kantoorgebouw. De constructie met het Slimline vloersysteem kan ongeveer als even duurzaam worden beschouwd, gezien het kleine verschil. De conclusie is zeer onverwacht, aangezien een houten constructie vaak als meest duurzaam wordt beschouwd.

Indien wordt gekeken naar de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw bij toepassing van duurzame materialen, dan blijkt dat houten constructie de meest duurzame constructie is voor het ontworpen kantoorgebouw, zie Figuur 10.10. Dit komt wel overeen met de algemene veronderstelling dat een houten constructie het meest duurzaam is. De verhoudingen tussen de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in het gebouw voor de houten constructie en de overige constructieve ontwerpen zijn als volgt:

- Houten constructie : Betonconstructie = 1,0 : 1,13
- Houten constructie : Slimline constructie = 1,0 : 1,20
- Houten constructie : Staal-betonconstructie = 1,0 : 1,43

¹⁷ Het effect van de besparing op milieukosten in energieverbruik en materiaalgebruik door vermindering van verdiepingshoogte, doormiddel van het integreren van installaties in het vloersysteem, is niet doorgerekend in de berekening van de milieukosten. Bij gelijkblijvende hoogte resulteert het integreren van installaties en vloersysteem in een hogere vrije hoogte. Dit effect is wel doorberekend in de ESL-factor, bij de berekening van de factor voor de overmaat in vrije hoogte.



Figuur 10.10: Jaarlijkse milieukosten (€/jaar) t.g.v. van het materiaalgebruik in het gebouw bij duurzaam materiaalgebruik

11 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies geformuleerd die uit dit afstudeeronderzoek kunnen worden getrokken. Aansluitend worden enkele aanbevelingen gedaan die uit dit afstudeeronderzoek voortvloeien.

11.1 Conclusies

De conclusies die getrokken zijn uit dit afstudeeronderzoek kunnen worden opgesplitst in de volgende onderdelen:

- De berekening van de ESL-factor
- De bepaling van de milieukosten
- De methode voor de beoordeling op duurzaamheid
- Beoordeling constructieve ontwerpen
- Bijdrage aan het 'Duurzaam construeren'

11.1.1 De berekening van de ESL-factor

De berekening van de ESL-factor is gebaseerd op vele aannamen en uitgangspunten. Zo is het eerste belangrijke uitgangspunt om de berekening van de ESL-factor te baseren op de draagconstructie. Hiermee worden een aantal belangrijke aspecten buiten beschouwing gehouden. De belangrijkste hiervan is de architectonische kwaliteit, zie 8.4.1. De architectuur kan een grote invloed hebben op de levensduur van een gebouw. Echter, voor het vergelijken van constructieve ontwerpen voor een bepaald gebouw kan dit aspect buiten beschouwing worden gelaten omdat deze kwaliteit voor alle ontwerpen nagenoeg gelijk zal zijn. Een tweede belangrijk uitgangspunt is om de invloed van de omgeving buiten beschouwing te houden. Ook hier geldt dat dit mogelijk is omdat de omgevingskwaliteit voor elk constructief ontwerp gelijk is, zie 6.2.2.

De berekening van de factoren van de verschillende aspecten, welke invloed uitoefenen op de levensduur van een gebouw, is ook gebaseerd op aannamen en vereenvoudigen. Deze aannamen en vereenvoudigen zijn onderbouwd aan de hand van theoretische kennis en kennis uit de praktijk. De vereenvoudigingen en aannamen hebben ervoor gezorgd dat de ESL-factor met een redelijk beperkte invoer kan worden berekend. Dit heeft een positieve invloed op de bruikbaarheid van de ontwerptool, maar leidt tevens tot onnauwkeurigheden.

Om de afwijking van de berekening van de ESL-factor tot het minimum te reduceren zijn de verschillende factor bereiken gekalibreerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van gegevens over zes transformatieprojecten van kantoorgebouwen. Voor dit onderzoek is dit aantal voldoende, echter zullen voor een betere onderbouwing meerdere typen gebouwen en grotere aantallen moeten worden beschouwd. Tevens is het noodzakelijk om een studie te doen naar reeds gesloopte gebouwen. Omdat in dit onderzoek gebruik is gemaakt van bestaande getransformeerde kantoorgebouwen, is er een aanname gedaan over de resterende levensduur na de transformatie van het gebouw.

Afgaande op het bovenstaande, kan er gesteld worden dat de methode voor de berekening van de ESL-factor nog verder moet worden doorontwikkeld. Desalniettemin toont de methode aan dat het mogelijk is om een redelijk nauwkeurige voorspelling te doen over de levensduur van een gebouw. De gemiddelde afwijking van de berekende verwachte levensduur voor de beschouwde getransformeerde kantoorgebouwen, op de uiteindelijke aangenomen levensduur bedraagt slechts 6%. In vergelijking met de standaard gehanteerde levensduur in de bestaande toetsingsinstrumenten is de berekende verwachte levensduur veel nauwkeuriger, voor de beschouwde gebouwen. Bij de door GreenCalc+ gehanteerde vaste levensduur voor kantoorgebouwen van 35 jaar is die afwijking maar liefst 60%. Hoewel bij de methode dus (nu) nog een aantal kanttekeningen kunnen worden gezet, zal een beoordeling op basis van een variabele levensduur, gebaseerd op de gebouwspecifieke kenmerken, uiteindelijk resulteren in een nauwkeurigere beoordeling van de duurzaamheid van een gebouw.

11.1.2 De bepaling van de milieukosten

De milieukosten t.g.v. van het materiaalgebruik in een gebouw zijn ongeveer als volgt verdeeld:

- 60% t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie
- 40% t.g.v. het overige materiaalgebruik in het gebouw

Het materiaalgebruik heeft een grote invloed op de totale milieukosten van een gebouw, zie 3.3.2. De verwachting is dat de milieukosten t.g.v. het energieverbruik in de toekomst zullen dalen, als gevolg van het gebruik van duurzame energiebronnen. De invloed van het materiaalgebruik op de totale milieukosten zal hierdoor sterk toenemen.

In het geval van een constructief ontwerp is enkel het materiaalgebruik in de draagconstructie bekend. Van het overige materiaalgebruik in de constructie is een inschatting benodigd. Gezien het grote aandeel van de draagconstructie op de milieukosten, is een gedetailleerde berekening van het materiaalgebruik in de draagconstructie noodzakelijk voor een goede duurzaamheidsbeoordeling, in plaats van een globale berekening zoals die nu in GreenCalc+ wordt uitgevoerd.

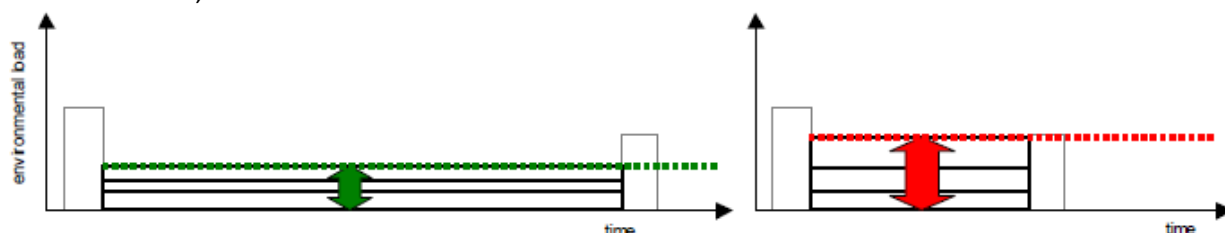
De wijze waarop de milieukosten worden bepaald in de tool, is redelijk eenvoudig. Met een beperkte invoer in GreenCalc+, gekoppeld aan een bewerkt voorbeeldgebouw, kunnen de milieukosten voor een gebouw worden bepaald, uitgezonderd de kosten t.g.v. het materiaalgebruik in de constructie. Deze bepaling is een benadering van de werkelijkheid, aangezien het ontwerp van het voorbeeldgebouw zal afwijken van het te beschouwen gebouw. Voor een benadering van de onbekende 40% van de materiaal-milieukosten is deze berekeningswijze goed toepasbaar. Het materiaalgebruik in de draagconstructie kan met de tool op een eenvoudige wijze gedetailleerd worden berekend. Door de berekende milieukosten voor de draagconstructie samen te voegen met de milieukosten, berekend in GreenCalc+, zijn de totale milieukosten bepaald voor een gebouw, op basis van het constructieve ontwerp.

Doordat het materiaalgebruik in de draagconstructie gedetailleerd wordt berekend, zullen slim ontworpen constructies met een lager materiaalgebruik beter uit de beoordeling komen ten opzichte van een minder goed doordachte constructie. Dit is precies wat gewenst is. Juist in de ontwerpfase van een gebouw dient een goede beoordeling te worden gemaakt over de duurzaamheid van een ontwerp of de verschillende constructieve alternatieven, gezien de invloed van de draagconstructie op de totale milieukosten.

Geconcludeerd kan worden dat de ontwikkelde methode voor de bepaling van de milieukosten van een gebouw gebruiksvriendelijk en doelgericht is. De methode waardeert slimme constructies, zodat in de ontwerpfase een goede duurzaamheidsbeoordeling kan worden gemaakt.

11.1.3 De methode voor de beoordeling op duurzaamheid

De initiële milieukosten van een gebouw, dit zijn de kosten voor de realisatie van het gebouw, hebben een grote invloed op de totale milieukosten van een gebouw over de gehele levensduur. Wanneer er gekeken wordt naar de jaarlijkse milieukosten, worden de realisatiekosten (en de sloopkosten) gespreid over de gehele levensduur van het gebouw. Op langere termijn (veel langer dan de levensduur van een gebouw), ervan uitgaande dat na de sloop van het oorspronkelijke gebouw en nieuw gebouw zal worden gebouwd, kan dan gesteld worden dat een aantal gebouwen met een lange levensduur leiden tot een lagere milieubelasting dan veel meer gebouwen met een korte levensduur, zie ook de onderstaande illustratie.



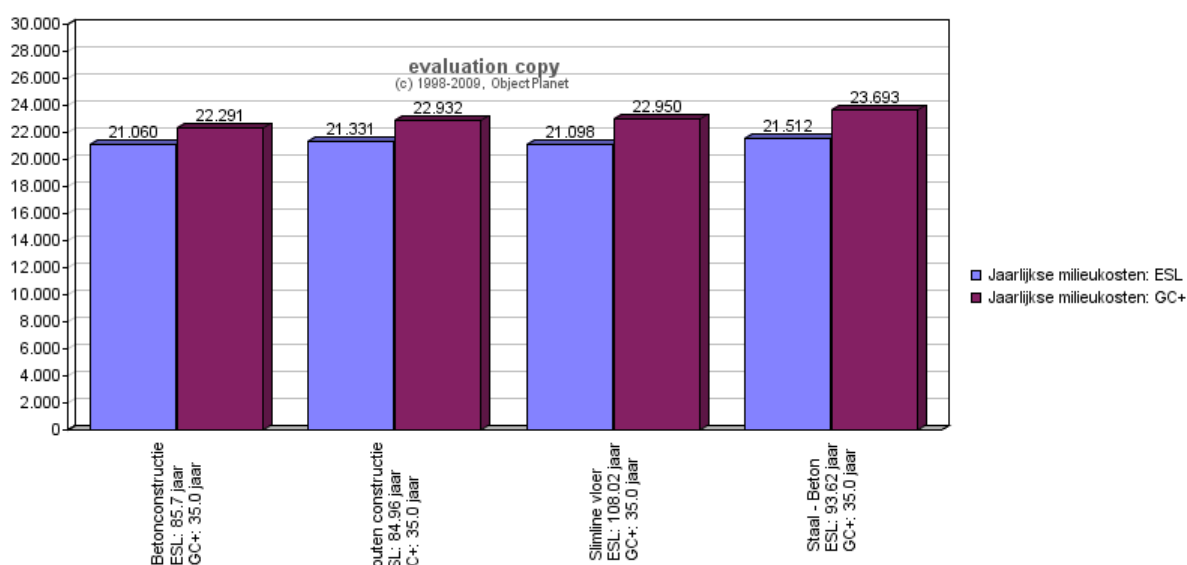
Figuur 11.1: De jaarlijkse milieukosten in geval van een lange en een korte levensduur

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het gebruik van de jaarlijkse milieukosten een beter inzicht op de duurzaamheid van een gebouw geeft, dan de berekening van de netto contante waarde van de milieukosten. Het beoordelen van de constructieve alternatieven op basis van de jaarlijkse milieukosten is dan ook de juiste methode.

Door de berekende milieukosten van het ontwerp te combineren met de berekende verwachte levensduur van het beschouwde gebouw wordt een nauwkeurigere beoordeling gegeven over de duurzaamheid van een gebouw op basis van een constructief ontwerp, in vergelijking met de bestaande toetsingsinstrumenten. De verbeterpunten op de bestaande methoden zijn:

- Een meer gedetailleerde berekening van het materiaalgebruik in de draagconstructie
- Een betere benadering van de levensduur van het beschouwde gebouw.

De verschillen tussen de jaarlijkse milieukosten, berekend met de gehanteerde standaard voor kantoorgebouwen in GreenCalc+ en de jaarlijkse milieukosten, berekend met de berekende verwachte levensduur zijn goed zichtbaar in de onderstaande figuur:



11.2: Overzicht van de berekende jaarlijkse milieukosten, op basis van de verwachte levensduur en op basis van de door GreenCalc+ gehanteerde levensduurstandaard, bij standaard materiaalgebruik.

Daar de methode voor het berekenen van de berekende verwachte levensduur nu nog niet voldoende ontwikkeld is, dient men te beseffen dat de bovenstaande resultaten slechts een indicatie geven over de milieuprestatie van de ontwerpen.

Hoewel de berekende verwachte levensduur kan afwijken van de werkelijke levensduur, zijn de verschillen tussen de jaarlijkse milieukosten, berekend met de gehanteerde standaard voor kantoorgebouwen in GreenCalc+ en de jaarlijkse milieukosten, berekend met de berekende verwachte levensduur aanzienlijk groot.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de huidige toetsingsmethoden gebouwen niet op de juiste wijze beoordelen. Voor een juiste beoordeling van de duurzaamheid is het noodzakelijk dat de levensduur voor een gebouw wordt bepaald aan de hand van gebouwspecifieke eigenschappen.

11.1.4 Beoordeling constructieve ontwerpen

Indien van de constructieve alternatieven een keuze moet worden gemaakt puur op basis van duurzaamheid, dient men onderscheid te maken tussen constructieve ontwerpen met een uitvoering in standaard en duurzame materialen.

Bij toepassing van standaard materialen is de opvallende conclusie dat niet de houten constructie, maar de betonconstructie en de constructie met het Slimline vloersysteem het meest duurzaam zijn. De Slimline constructie heeft hierbij slechts 3% hogere jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de draagconstructie dan de betonconstructie. Bij toepassing van duurzame materialen blijkt dat de houten constructie veruit het meest duurzaam is.

De aspecten bouwkosten en bouwtijd zijn bij de keuze voor een bepaald constructief ontwerp de aspecten die het zwaarst wegen in de beoordeling. De bouwkosten voor de betonconstructie zijn laagst, zie bijlage 4.6. De verhouding tussen bouwkosten van de betonconstructie en de overige constructies zijn:

- Betonconstructie : Houten constructie = 1,0 : 1,08
- Betonconstructie : Slimline constructie = 1,0 : 1,11
- Betonconstructie : Staal-betonconstructie = 1,0 : 1,45

De betonconstructie en de Slimline constructie zijn het meest duurzaam bij toepassing van standaard materialen. De bouwkosten van de Slimline constructie zijn ongeveer 11% hoger dan de betonconstructie. Op basis van deze gegevens kan gesteld worden dat bij toepassing van standaard materiaal de betonconstructie, op basis van duurzaamheid en bouwkosten, het beste constructieve alternatief is voor het ontworpen kantoorgebouw.

De houten constructie is het meest duurzaam bij toepassing van duurzame materialen. De kosten van de houten constructie zijn echter 8% hoger dan die van de betonconstructie. Een investering van 8% op de bouwkosten zal dus resulteren in het meest duurzame gebouwoontwerp. Doordat nu zowel de gegevens betreffende duurzaamheid als een indicatie van de bouwkosten beschikbaar zijn, kan de opdrachtgever een goede afweging maken in de keuze in het wel of niet investeren in een duurzame constructie.

De conclusies die zijn getrokken over de duurzaamheid van verschillende constructieve ontwerpen zijn niet tijdonafhankelijk. Het is aannemelijk dat in de toekomst de resultaten zullen wijzigingen. Deze veranderingen kunnen veroorzaakt worden door aanpassingen in de milieukosten berekening, als gevolg van nieuwe inzichten of door ontwikkelingen op het gebied van productieprocessen. Hierdoor is het mogelijk dat de milieukosten in €/kg materiaal staal en beton dichterbij elkaar komen. Er zal dan dus opnieuw moeten worden beoordeeld welk constructief ontwerp het meest duurzaam is.

11.1.5 Bijdrage aan het 'Duurzaam construeren'

Met de ontwikkeling van de methode voor de beoordeling van constructieve ontwerpen op duurzaamheid is een eerste stap gezet in de richting van een beoordeling die goed doordachte constructieve ontwerpen op juiste wijze waardeert.

Momenteel is het zo dat constructieve ontwerpen hoofdzakelijk worden beoordeeld op basis van de integratie in bouwkundig en installatieontwerp, benodigde constructiehoogte, bouwkosten en bouwtijd. Duurzaamheid wordt hierbij veelal buiten beschouwing gelaten. Een reden hiervoor is dat de huidige toetsingsinstrumenten niet in staat zijn om een exacte beoordeling te geven over de duurzaamheid van constructieve ontwerpen, omdat de milieukostenberekening in de ontwerpfase is gebaseerd op referentiegebouwen. Aangezien draagconstructies een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de duurzaamheid van gebouwen, de draagconstructie heeft immers een

doorslaggevende invloed op de hoeveelheid grondstoffen die bij een gebouw per eenheid van vloeroppervlak en tijd zijn gemoeid, is een toetsingsinstrument voor de beoordeling van constructieve alternatieven van groot belang voor de ontwikkeling van het 'Duurzaam construeren'.

Met de ontwikkelde duurzaamheidsbeoordeling is het mogelijk gemaakt om een goede beoordeling te geven van de duurzaamheid van constructieve alternatieven. Hierdoor kan het aspect 'duurzaamheid' mee worden genomen in de beoordeling van de constructieve ontwerpen.

Naast het opvullen van het gat in de markt van de toetsingsinstrumenten voor de beoordeling van gebouwen op duurzaamheid, is in de ontwikkelde methode een belangrijke aanpassing doorgevoerd. Deze aanpassing heeft betrekking tot de berekening van de jaarlijkse milieukosten voor een gebouw. Zoals eerder is vermeld baseren de bestaande toetsingsinstrumenten de jaarlijkse milieukosten op een levensduur, welke afhankelijk van het type gebouw en gebruiksfunctie is vastgesteld.

De ontwikkelde methode berekent de jaarlijkse milieukosten op basis van een variabele levensduur. Deze verwachte levensduur wordt berekend op basis van de gebouwspecifieke eigenschappen. De werkelijke levensduur van een gebouw wordt hierdoor beter benaderd, met als resultaat een nauwkeurige berekening van de jaarlijkse milieukosten.

De doorgevoerde aanpassing in de berekening van de jaarlijkse milieukosten heeft een positieve invloed op het 'Duurzaam Construeren'. Bij de huidige toetsingsmethodes is de situatie zo dat de investeringskosten voor een flexibel gebouw geen aantoonbaar effect hebben op de milieukosten van een gebouw, aangezien een vaste levensduur wordt gehanteerd voor een bepaald type gebouw met een bepaalde gebruiksfunctie. Hierdoor is het voor opdrachtgevers niet aantrekkelijk om extra geld te investeren ten behoeve van een flexibel gebouw. De ontwikkelde methode echter, zal voor een flexibel ontworpen gebouw een hogere verwachte levensduur berekenen dan voor een standaard (minder flexibel) ontwerp. Hierdoor is het effect van de extra investeringskosten zichtbaar in de jaarlijkse milieukosten. Dit leidt ertoe dat het voor de opdrachtgevers interessanter wordt om te investeren in een duurzaam gebouw.

Op dit moment dienen de milieukosten nog enkel als indicatie van de duurzaamheid. Gezien de huidige aandacht voor het onderwerp 'duurzaamheid' in de politiek en in de bouwpraktijk, zou een mogelijke ontwikkeling kunnen zijn dat milieukosten in de toekomst daadwerkelijk worden doorgerekend in de realisatiekosten van een gebouw. Indien deze situatie zich voordient, is het van groot belang dat het effect van de meerkosten in een ontwerp ten behoeve van de flexibiliteit van een gebouw, zichtbaar is in de uiteindelijke jaarlijkse milieukosten. Opdrachtgevers zullen dan eerder bereid zijn om meer te investeren in duurzame gebouwen, met als gevolg dat het 'Duurzaam construeren' wordt geïmplementeerd in de bouwpraktijk.

11.2 Aanbevelingen

Op basis van het afstudeeronderzoek kunnen een aantal aanbevelingen worden gedaan.

ESL-factor berekening

De berekening van de ESL-factor is gebaseerd op vele aannamen en enkele uitgangspunten, onderbouwd met theoretische kennis en kennis uit de bouwpraktijk. De aannamen en uitgangspunten leiden tot onnauwkeurigheden in de berekening van de verwachte levensduur. Voor een betere onderbouwing van de verwachte levensduur zal de methode moeten worden doorontwikkeld. Er zal onderzoek moeten worden gedaan naar de mogelijkheid om de architectonische en omgevingskwaliteit van een gebouw mee te nemen in de berekening. Het meenemen van de architectonische en omgevingskwaliteit in de beoordeling maakt het mogelijk om constructieve ontwerpen van verschillende gebouwen met elkaar te vergelijken. Dit biedt nieuwe mogelijkheden voor het beoordelen van constructieve alternatieven. Deze kunnen dan per gebouw onderling worden beoordeeld en daarnaast worden beoordeeld in vergelijking met een legio aan andere constructieve ontwerpen.

Verder zal er onderzoek moeten worden gedaan naar de verschillende aspecten van de draagconstructie, welke nu worden meegenomen in de berekening van de ESL-factor. De nauwkeurigheid van de berekening zal hierdoor toenemen, waardoor er meer waarde kan worden gehecht aan de uiteindelijke resultaten, namelijk de jaarlijkse milieukosten van een constructief ontwerp.

Ten behoeve van de nauwkeurigheid van de berekening zijn de factoren, die samen de ESL-factor bepalen, gekalibreerd aan de hand van zes getransformeerde kantoorgebouwen. Voor dit onderzoek wordt dit als voldoende beschouwd. Echter, voor een betere onderbouwing van de berekening van de verwachte levensduur is het noodzakelijk om een studie te doen naar meerdere typen gebouwen en een groter aantal gebouwen. Daarnaast is het aan te bevelen om een studie te doen naar reeds gesloopte gebouwen. Omdat in dit onderzoek gebruik is gemaakt van bestaande getransformeerde kantoorgebouwen, is er een aanname gedaan over de resterende levensduur na de transformatie van het gebouw. In het geval van gesloopte gebouwen is de exacte levensduur bekend, waardoor de aanname over de uiteindelijke levensduur komt te vervallen.

Demontabel bouwen

Zoals in 8.4.10 is vermeld, is het aspect 'Demontabel bouwen' niet meegenomen in de berekening van de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in een gebouw. Gezien de mogelijke invloed van het demontabel bouwen op de jaarlijkse milieukosten t.g.v. het materiaalgebruik in de constructie, is een onderzoek naar de verwerking van het aspect 'Demontabel bouwen' in de milieukosten berekening aan te bevelen.

Verdere ontwikkeling van de ontwerptool

De ontwerptool is zo ontwikkeld dat deze resultaten uit de berekening van GreenCalc+ kan importeren en verwerken in de beoordeling van constructieve alternatieven op duurzaamheid. Voor de ontwikkeling van de ontwerptool in de toekomst is het belangrijk de tool volledig geïntegreerd wordt en onderdeel zal uitmaken van GreenCalc+. Op dit moment is dit echter nog niet het geval. Het is dan ook aan te bevelen om in de verdere uitwerking van de ontwerptool stichting Sureac, opdrachtgever voor de ontwikkeling van GreenCalc+, bij de ontwikkeling te betrekken.

Bronvermelding

1. **Dobbelsteen, A. van den.** *The sustainable office*. Delft : Copie Sjob, 2004.
2. **Brundtland, G.H.** *Our common future*. sl : Oxford University, 1987.
3. **Klunder, G.** *Hoe milieuvriendelijk is duurzaam bouwen? De milieubelasting van woningen gekwantificeerd*. Delft : DUP Science, 2002.
4. **Wikipedia.** [Online] 2010. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Kyoto-protocol>.
5. **Wesselink, L.G., Eerens, H. en Vis, J.** *Planbureau voor de Leefomgeving*. [Online] 16 Januari 2008. <http://www.pbl.nl/nl/publicaties/mnp/2008/VeelmeerinspanningnodigomEUKlimaatdoelvoor2020tebereiken.html>.
6. **Hendriks, Ch.F. et al.** *Duurzame bouwmaterialen*. Best : Aeneas, 1999.
7. **Dobbelsteen, A. van den & Alberts, K.** *Bouwmaterialen, milieu & gezondheid*. Amsterdam : Weka, 2005.
8. **Hendriks, Ch.F. et al.** *Sustainable Construction*. Boxtel : Aeneas, 2001.
9. **Dicke, D. en Haas, E.M.** *Praktijkhandboek duurzaam bouwen: Dl. 1. : toepassingen met aandacht voor mens en milieu*. Amsterdam : Weka, 2004.
10. [Online] VROM. <http://www.vrom.nl/pagina.html?id=44156>.
11. **Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.** [Online] <http://www.vrom.nl/pagina.html?id=46170>.
12. *Milieuprestatie instrumenten voor gebouwen bij duurzaam inkopen*. **Haas, E.M.** 28, sl : Architectenweb Magazine, 2009.
13. **Van der Linden, K., et al.** GreenCalc - een calculatie- en communicatiemodel om milieubelasting van gebouwen meetbaar en vergelijkbaar te maken. [boekaut.] D. Dicke en E.M. Haas. *Praktijkhandboek duurzaam bouwen*. 2000.
14. [Online] BREEAM. www.breeam.nl.
15. **Hendriks, Ch.F.** *Sustainable Construction*. Boxtel : Aeneas, 2001.
16. *Duurzaam Construeren*. **Wiltjer, Remko en Peters, Pim**. Rotterdam : Cement, 2009.
17. **Rongen, C. Th. H. van.** *Veranderbaarheid en flexibiliteit van gebouwen*. Delft : Publikatieburo Bouwkunde, 1994.
18. **Brand, S.** *How Buildings Learn; what happens after they're built*. New York : Viking, 1994.
19. **Geraedts, Rob, Remøy, Hilde en Oudijk, Collin.** *Transformatie van kantoorgebouwen*. Rotterdam : Uitgeverij 010, 2007.
20. **Bouwresearch, Stichting.** *Flexis: Communicatie over en beoordeling van flexibiliteit tussen gebouwen en installaties*. Rotterdam : sn, 1996.
21. **Onderzoekscommissie, CUR.** *Rationalisatie wapening*. 1980.
22. [Online] VBI. www.vbi.nl.
23. [Online] Dycore. www.dycore.nl.
24. **Vambersky, J.N.J.A. en Te Boveldt, A.** *Ontwerpen van Gebouwen*. Delft : TU Delft, 2005.
25. **Lowe, Doug.** *Java all-in-one desk reference for Dummies*. Hoboken : Wiley Publishing, Inc., 2005.
26. [Online] Grunbauer. www.grunbauer.nl.
27. [Online] Lignatur. <http://www.lignatur.ch/produkte.html>.
28. **Dobbelsteen, A. van den, Arets M. & Nunes R.** *Sustainable design of supporting structures: Optimal structural spans and component combinations for effective improvement of environmental performance*. 2007.
29. **Sarja, A.** *Integrated life cycle design of structures*. London : Spon, 2002.
30. **Novem.** *Duurzame kantoorgebouwen: Wat leren de voorbeeldprojecten ons?* Rotterdam : Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting (SEV), 1999.
31. **Commissie, Europese.** Europa NU. [Online] 28 November 2008. www.parlement.com/93530000/1/j9vvh6nf08temv0/vi0ehga5n2z2?ctx=vhg4fsdbf2wn.
32. *Hoe milieuvriendelijk is duurzaam bouwen? De milieubelasting van woningen gekwantificeerd*.
33. [Online] Centrum Hout. <http://www.centrum-hout.nl>.