Hogebomen

Lisette de Schipper (s1396250) en Micky Faas (s1407937)

Abstract

Blablabla

1 Inleiding

AVL-bomen, splay-bomen en treaps zijn klassieke datastructuren die ingezet worden om een verzameling gegevens te faciliteren. Het zijn zelfbalancerende binaire zoekbomen die elk een vorm van ruimte en/of tijd-efficiëntie aanbieden. Er worden experimenten verricht om de prestatie van deze zelf-balancerende zoekbomen te vergelijken aan de hand van ophaaltijd van data, mate van herstructurering en het verwijderen van knopen. Ook wordt de prestatie van deze zoekbomen uitgezet tegen de ongebalanceerde tegenhanger, de binaire zoekboom.

2 Werkwijze

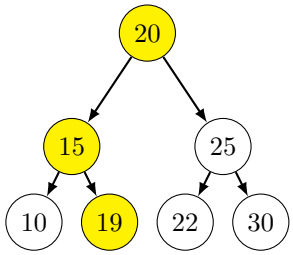
De vier bomen zijn conceptueel eenvoudig en relatief makkelijk te implementeren. Voor alle vier de bomen wordt dezelfde zoekmethode gebruikt. Deze is in het slechtste geval O($logn$).

2.1 Implementatie binaire zoekboom

De binairy zoekboom (BST) vormt de basis voor alle zogeheten *zelf-organiserende bomen*, zoals de AVL- of SplayTree. Aan de grondslag van de BST ligt de *binaire-zoekboom-eigenschap*, die zorgt dat de boom op de "gretige" manier kan worden doorzocht in plaats van een *exhaustive search*. Hierdoor is het mogelijk om een knoop in een boom met hoogte n in hooguit n stappen te vinden, maar gemiddeld genomen sneller, namelijk $\log(n)$. Kort samengevat houdt de bst-eigenschap het volgende in:

- Linker-kindknopen en hun kinderen hebben altijd een kleinere waarde dan hun ouder, rechter-kindknopen en al hun kinderen altijd een grotere waarde dan hun ouder.
- Bij een MIN-boom is dit omgekeerd. Onze implementatie is enkel een MAX-boom.
- Toevoegen kan zonder verwisselen worden uitgevoerd (in tegenstelling tot bijv. een heap).

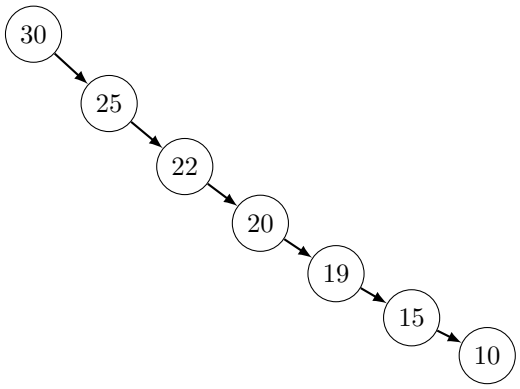
- Voor verwijderen of vervangen moet afhankelijk van de plaats van de knoop wel worden verwisseld.



In het voorbeeld is het zoekpad naar de knoop met waarde 19 weergegeven. Dit zoekpad heeft precies complexiteit $O(n)$, namelijk drie stappen/vergelijkingen voordat de gezochte knoop wordt bereikt, dat is dus gelijk aan de hoogte van de boom.

- Het zoekdomein bestaat aanvankelijk uit $2^n - 1 = 7$ knopen, want de voorbeeldboom is een *volle binaire boom*
- Aan het begin van de zoekopdracht is er alleen een pointer naar de wortel (20). We weten dat 19 kleiner is dan de wortel, dus bezoeken we zijn linkerkind. Van de complete rechtersubboom is dus van te voren bekend dat deze niet doorzocht hoeft te worden.
- Het zoekdomein wordt dus ineens van 7 naar $2^n - 1 - (2^{n-1} - 1) = 4$ verkleind. Voor een grote boom zijn dat veel knopen die nooit bezocht hoeven te worden.
- De nieuwe knoop heeft waarde 15. We hebben dus nog geen resultaat, maar er is nu wel bekend dat alleen de rechtersubboom van 15 hoeft te worden doorzocht
- Het zoekdomein is nu precies n geworden, de "worst case" bij de binair zoeken.
- Het rechterkind van 15 is vervolgens 19, de knoop is gevonden.

Binaire bomen zijn dus sneller dan gewone bomen tijdens het zoeken en correct mits de binaire-zoekboom-eigenschap wordt gehandhaafd. Tijdens een insert operatie kost dat inprinciepe geen extra rekenkracht, maar bij bijvoorbeeld het verwijderen moet de boom soms worden verschoven om de eigenschap te herstellen.
Een ander probleem is dat de binaire zoekboom eigenlijk alleen optimaal presteert als de hoogte zo gering mogelijk is voor het aantal knopen. De hoogte bepaalt namelijk de zoekcomplexiteit, niet het aantal knopen. Een binaire zoekboom met een goede balans tussen de hoogten van de subbomen is *geballanceerd*. Als er tijdens het toevoegen niets bijzonders wordt gedaan, kan een binaire zoekboom heel snel ongebalanceerd raken, afhankelijk van de volgorde waarin knopen worden toegevoegd. Neem bijvoorbeeld de bovenstaande boom. Als men de knopen in de volgorde 10, 15, 19, 20, 25, 22, 30 toegevoegd ontstaat er één lange tak naar rechts. De worst-case zoekdiepte is nu van 3 naar 7 gegaan.

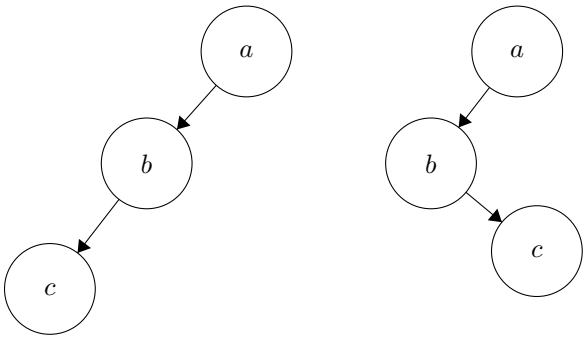


De *zelf-organiserende boom* is een speciaal soort binaire zoekboom die tijdens verschillende operaties probeert om de boom zo goed mogelijk te (her)balanceren. Uiteraard kosten deze extra operaties ook meer rekenkracht en of dit zich terugbetaald in zoeksnelheid is één van de dingen die wij zullen onderzoeken tijdens deze experimenten.

2.2 Implementatie AVL-bomen

Knopen van een AVL-boom hebben een *balansfactor*, die altijd -1, 0 of 1 moet zijn. In deze implementatie is de balansfactor de hoogte van de rechtersubboom min de hoogte van de linkersubboom. Dit houdt dus in dat de hoogte van de linkersubboom van de wortel met maar 1 knoop kan verschillen van de hoogte van de rechtersubboom van de wortel. Het moment dat de balansfactor van een knoop minder dan -1 of meer dan 1 wordt, moet de boom geherstructureerd worden, om deze eigenschap te herstellen.

Om de balansfactor voor elke knoop te berekenen, houdt elke knoop zijn eigen hoogte bij. De balansfactor van een knoop wordt hersteld door rotaties. De richting en de hoeveelheid van de rotaties hangt af van de vorm van de betreffende (sub)boom. De volgende twee vormen en hun spiegelbeelden kunnen voorkomen bij het verwijderen of toevoegen van een knoop:



In het eerste geval moet de wortel naar rechts worden geroteerd. In het tweede geval moeten we eerst naar de staat van de eerste subboom komen, door b naar links te roteren. Voor de spiegelbeelden van deze twee vormen geldt

hetzelfde alleen in spiegelbeeld.

In deze implementatie van een AVL-boom bedraagt het toevoegen van een knoop in het ergste geval O($logn$) tijd, waarbij n staat voor de hoogte van de boom. Eerst moet er gekeken worden of de data niet al in de boom voorkomt (O($logn$)) en vervolgens moet de boom op basis van de toevoeging geherstructureerd worden. Dit laatste is in het ergste geval O($logn$), omdat dan de gehele boom tot de wortel moeten worden nagelopen.

De complexiteitsgraad van het verwijderen van een knoop is gelijk aan die van het toevoegen van een knoop. In deze implementatie zoeken we in de rechtersubboom het kleinste kind en vervangen we de te verwijderen knoop met deze knoop. Dit heeft een duur van O($logn$). Als hij geen rechtersubboom heeft, wordt de node weggegooid en wordt zijn linkersubboom de nieuwe boom.

2.3 Implementatie Splay-bomen

De Splay-boom is een simpele binaire zoekboom die zichzelf herorganiseerd na elke operatie, ook na operaties die alleen lezen, zoals `find()`. Deze herorganisatiestap heet "splay" (vandaar de naam) en heeft ten doel de laatst aangesproken knoop bovenaan te zetten. Dit wordt dus de wortel. Hieronder is het gedrag kort samengevat:

- Bij zoeken wordt de gevonden knoop de wortel, mits er een zoekresultaat is.
- Bij toevoegen wordt de toegevoegde knoop de wortel
- Bij vervangen wordt de vervangen knoop de wortel
- Bij verwijderen wordt de te verwijderen knoop eerst de wortel, dan wordt deze verwijderd.

Het idee achter dit gedrag is, dat vaak gebruikte knopen hoger in de boom terechtkomen en daarom sneller toegankelijk zijn voor volgende operaties. De splay-operatie zorgt er bovendien voor dat knoop die dicht in de buurt van de *gesplayde* knoop zitten, ook hoger in de boom worden geplaatst. Dit effect ontstaat doordat *splay* eigenlijk een serie boom rotaties is. Als men deze rotaties consequent uitvoerd blijft bovendien de binairy-zoekboom-eigenschap behouden.

2.3.1 Splay

De splay-operatie bestaat uit drie operaties en hun spiegelbeelden. We gaan uit van een knoop n, zijn ouderknoop p en diens ouderknoop g. Welke operatie wordt uitgevoerd is afhankelijk van het feit of n en p linker- of rechterkind zijn. We definieren:

- De *Zig* stap. Als n linkerkind is van p en p de wortel is, doen we een rotate-right op p.
- Het spiegelbeeld van *Zig* is *Zag*.

- De *Zig-Zig* stap. Als n linkerkind is van p en p linkerkind is van g, doen we eerst een rotate-right op g en dan een rotate-right op p.
- Het spiegelbeeld van *Zig-Zig* is *Zag-Zag*
- De *Zig-Zag* stap. Als n rechterkind is van p en p linkerkind is van g, doen we eerst een rotate-left op p en dan een rotate-right op g.
- De omgekeerde versie heet *Zag-Zig*

Onze implementatie splayt op `insert()`, `replace()`, `remove()` en `find()`. De gebruiker kan eventueel zelf de splay-operatie aanroepen na andere operaties dmv de functie `splay()`.

2.4 Implementatie Treaps

Treap lijkt in veel opzichten op een AVL-boom. De balansfactor per knoop heeft echter plaats gemaakt voor een prioriteit per knoop. Deze prioriteit wordt bij het toevoegen van een knoop willekeurig bepaald. De complexiteit voor het toevoegen en verwijderen van een knoop is hetzelfde als bij de AVL-boom.

Bij het toevoegen van een knoop moet er nog steeds omhoog gelopen worden in de boom, totdat de prioriteit van de toegevoegde knoop kleiner is dan de prioriteit van de ouder. Als dit niet het geval is, blijft de toegevoegde knoop omhoog roteren. In het ergste geval kan het dus weer zo zijn dat we tot de wortel door moeten blijven lopen.

Bij het verwijderen van een knoop blijven we de betreffende knoop roteren naar het kind met de grootste prioriteit. Uiteindelijk belanden we dan in de situatie dat de knoop maar een of geen kinderen heeft. In het eerste geval verwijderen we de knoop en plakken zijn subboom terug aan de boom op zijn plek en in het tweede geval verwijderen we de knoop. In het slechtste geval duurt dit dus ook O($logn$) tijd.

3 Onderzoek

Een praktisch voorbeeld van binair zoeken in een grote boom is de spellingscontrole. Een spellingscontrole moet zeer snel voor een groot aantal strings kunnen bepalen of deze wel of niet tot de taal behoren. Aangezien er honderduizenden woorden in een taal zitten, is lineair zoeken geen optie. Voor onze experimenten hebben wij dit als uitgangspunt genomen en hieronder zullen we kort de experimenten toelichten die wij hebben uitgevoerd. In het volgende hoofdstuk staan vervolgens de resultaten beschreven.

3.1 Hooiberg

"Hooiberg" is de naam van het testprogramma dat we hebben geschreven speciaal ten behoeven van onze experimenten. Het is een klein console programma dat woorden uit een bestand omzet tot een boom in het geheugen. Deze boom kan vervolgens worden doorzocht met de input uit een ander bestand: de "naalden". De syntax is alsvolgt:

`hooiberg type hooiberg.txt naalden.txt [treap-random-range]`

Hierbij is `type` één van `bst, avl, splay, treap`, het eerste bestand bevat de invoer voor de boom, het tweede bestand een verzameling strings als zoekopdracht en de vierde parameters is voorbehouden voor het type `treap`. De bestanden kunnen woorden of zinnen bevatten, gescheiden door regeleinden. De binaire bomen gebruiken lexicografische sortering die wordt geleverd door de operatoren `<` en `>` van de klasse `std::string`. Tijdens het zoeken wordt een exacte match gebruikt (case-sensitive, non-locale-aware).

3.2 Onderzoeks(deel)vragen

Met onze experimenten hebben we gepoogd een aantal eenvoudige vragen te beantwoorden over het gebruik van de verschillende binaire en zelf-organiserende bomen, te weten:

- Hoeveel meer rekenkracht kost het om grote datasets in te voegen in zelf-organiserende bomen tov binaire bomen?
- Levert een zelf-organiserende boom betere zoekprestaties en onder welke opstandigheden?
- Hoeveel extra geheugen kost een SOT?
- Wat is de invloed van de random-factor bij de Treap?

3.3 Meetmethoden

Om de bovenstaande vragen te toetsen, hebben we een aantal meetmethoden bedacht.

- Rekenkracht hebben we gemeten in milliseconden tussen aanvang en termineren van een berekening. We hebben de delta's berekend rond de relevante code blokken dmv de C++11 `chrono` klassen in de Standard Template Library. Alle test zijn volledig sequentieel en single-threaded uitgevoerd. Deze resultaten zijn representatie voor één bepaald systeem, vandaar dat we aantal % 'meer rekenkracht' als eenheid gebruiken.
- Zoekprestatie hebben we zowel met rekenkracht als zoekdiepte gemeten. De zoekdiepte is het aantal stappen dat vanaf de wortel moet worden gemaakt om bij de gewenste knoop te komen. We hebben hierbij naar het totaal aantal stappen gekeken en naar de gemiddelde zoekdiepte.
- Geheugen hebben we gemeten met de `valgrind` memory profiler. Dit programma wordt gebruikt voor het opsporen van geheugen lekken en houdt het aantal allocaties op de heap bij. Dit is representatie voor het aantal gealloceerde nodes. Aangezien hooiberg nauwelijks een eigen geheugenvoetafdruk heeft, zijn deze waarden representatief.

3.4 Input data

Voor ons experiment hebben we een taalbestand gebruikt van OpenTaal.org met meer dan 164.000 woorden. Dit is een relatief klein taalbestand, maar voldoede om verschillen te kunnen zien. We hebben een aantal testcondities gebruikt:

- Voor het inladen een wel of niet alfabetisch gesoorteerd taalbestand gebruiken.
- Als zoekdocument hebben we een gedicht met 62 woorden gebruikt. Er zitten een aantal dubbele woorden in alsook een aantal woorden die niet in de woordenlijst voorkomen (werkwoordsvervoegingen).
- We hebben één conditie waarbij we de random-range van de Treap hebben gevariëerd.

3.5 Hypothesen

- De binairy search tree zal vermoedelijk het snelst nieuwe data toevoegen. De splay tree heeft veel ingewikkelde rotatie bij een insert, dus deze zal het traagst zijn.
- Bij het gedicht zal de splay boom waarschijnlijk het snelst zijn omdat deze optimaliseert voor herhalingen.
- De bomen die een aparte node-klasse gebruiken (avl en treap) gebruiken het meeste geheugen.
- De meest efficiënte randomfactor is afhankelijk van de grootte van de boom die geïmplementeerd gaat worden. Bij een kleine boom volstaat een kleine randomfactor, bij een grote boom volstaat een grote randomfactor.

4 Resultaten

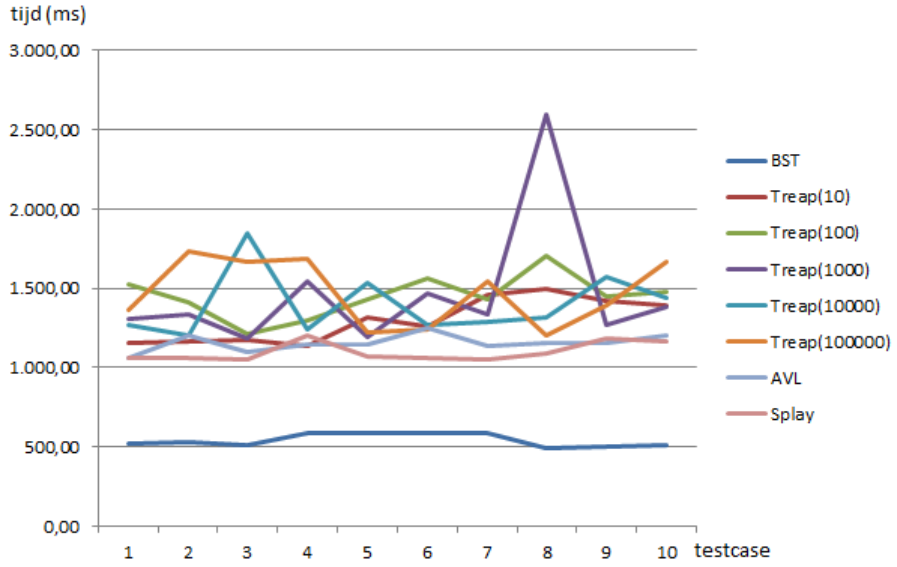
Voor elke soort boom hebben we elk experiment tien keer uitgevoerd.

4.1 Experiment 1

4.1.1 Deelexperiment 1

In dit experiment hebben we voor elke soort boom gemeten hoe lang het duurt de boom op te bouwen met het bestand `Nederlands_unsorted.txt` om deze tijden te kunnen vergelijken. Dit hebben we gemeten in miliseconden. De volgende gegevens kwamen eruit. Deze hebben we vervolgens verwerkt in een grafiek.

	BST	Treap(10)	Treap(100)	Treap(1000)	Treap(10000)	Treap(100000)	AVL	Splay
	525	1160	1526	1307	1272	1368	1063	1065
	527	1162	1409	1332	1202	1736	1207	1059
	511	1173	1215	1181	1846	1669	1102	1053
	585	1141	1298	1547	1246	1688	1150	1202
	589	1319	1427	1190	1538	1221	1146	1067
	588	1265	1560	1472	1271	1238	1251	1063
	592	1464	1428	1338	1286	1543	1136	1050
	492	1501	1704	2594	1316	1206	1155	1092
	506	1425	1449	1269	1571	1389	1153	1183
	512	1391	1474	1384	1440	1663	1203	1162
GEM	542,7	1300,1	1449	1461,4	1398,8	1472,1	1156,6	1099,6



figuur 1. Grafiek over het aantal ms voor het construeren van een graaf.

4.1.2 Deelexperiment 2

Het vullen van de boom met de alfabetische woordenlijst levert, zoals eerder beschreven, een diagonale lijn van data in de binaire zoekboom op, waar we niet efficiënt in kunnen zoeken. Treap doet het ook niet veel beter in dit gebied, waar de gemiddelde zoektijd met `gedicht.txt` bij binaire zoekbomen rond de 167,5 miliseconden ligt, ligt hij bij treap rond de 253,5 miliseconden. De gemiddelde zoektijd voor zowel AVL-bomen als splaybomen is echter nooit meer dan 1 miliseconde.
Dit verschil is overigens ook opvallend bij het vullen van de boom, waar splay en AVL gelijk presteren als in experiment 1, duurt het bij zowel de binaire zoekboom als de treap bijna een factor van 100 langer.

4.2 Experiment 2

4.2.1 Deelexperiment 1

Om de zoekprestaties van de verschillende soorten bomen te vergelijken kijken we naar zowel de totale zoekdiepte van de boom, de gemiddelde zoekdiepte van een woord in `gedicht.txt` en naar het aantal miliseconden die de gemiddelde zoekoperatie nodig had. Onze boom is opgebouwd uit `nederlands_unsorted.txt`. De gehele hoogte van de boom die dit opleverd en de gemiddelde zoekdiepte van een woord uit `gedicht.txt` staan in onderstaande tabel weergegeven. Het gemiddelde aantal miliseconden dat nodig was voor de zoekoperaties van elk woord bedroeg nooit meer dan 1 miliseconden en dook zelfs vaak onder de halve miliseconde.

Type	totale zoekdiepte	gemiddelde zoekdiepte
Treap(10)	1843,5	32,5
Treap(100)	2256,9	39,9
Treap(1000)	2275,2	40,2
Treap(10000)	2268,7	39,9
Treap(100000)	2205,8	39
BST	1106	19
AVL	880	15
splay	997	17

4.2.2 Deelexperiment 2

Ditzelfde experiment voerden we uit op dezelfde boom met als zoekopdrachten elk element in die boom. Daar kwamen de volgende resultaten uit.

Type	totale zoekdiepte	gemiddelde zoekdiepte	tijd (ms)
Treap(10)	5783309	34,67	882.005
Treap(100)	7034043	42,22	956.880
Treap(1000)	7162473	44.11	1067.861
Treap(10000)	7253419	44,67	1053.257
BST	3369405	20	557.934
AVL	2576171	15	450.390
splay	3922834	23	1378,197

4.3 Experiment 3

Hieronder staan de hoeveelheden geheugen en het aantal allocaties weergegeven voor elke boom. De metingen zijn van heap dynamisch gealloceerd geheugen alleen en zijn uitgevoerd met Valgrind.

Type	allocs	bytes
Treap	493280	16704426 (15,9 Mb)
BST	493278	15389858 (14,7 Mb)
AVL	493279	16704390 (15,9 Mb)
splay	493260	15389922 (14,7 Mb)

4.4 Experiment 4

4.4.1 Deelexperiment 1

Bij dit experiment zijn we gaan zoeken naar de sleutelwoorden van `gedicht.txt` in `Nederlands_unsorted.txt`. De resultaten hiervan staan in onderstaande tabelen weergegeven, waarbij de eerste rij staat voor de mate van willekeurigheid van de prioriteit (hoe hoger, hoe willekeuriger).

Gemiddelde zoekdiepte voor zoekopdrachten

	10	100	1000	10000	10000
	34	36	36	45	38
	31	40	49	34	47
	29	35	26	70	41
	32	40	35	41	42
	33	44	32	38	36
	34	40	49	33	37
	35	47	29	37	35
	36	47	66	36	29
	32	34	36	35	39
	29	36	44	30	46
GEM	32,5	39,9	40,2	39,9	39

Totale zoekdiepte

	10	100	1000	10000	10000
	1914	2041	2017	2549	2173
	1745	2254	2752	1957	2657
	1652	1982	1511	3954	2312
	1836	2261	1983	2310	2366
	1861	2482	1819	2169	2033
	1925	2253	2783	1852	2092
	2002	2656	1643	2126	1947
	2032	2672	3732	2059	1658
	1798	1917	2021	1999	2211
	1670	2051	2491	1712	2609
GEM	1843,5	2256,9	2275,2	2268,7	2205,8

4.4.2 Deelexperiment 2

De volgende tabel geeft de uitersten aan van de resultaten die we tegenkwamen in deelexperiment 2 van experiment 2.

	Totale zoekdiepte		Gemiddelde zoekdiepte		Tijd	
bereik	minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum
10	5194145	6826579	31	41	778.449	992.709
100	5321940	10137343	32	61	823.003	1379.380
1000	592787 2	9952377	32	60	873.975	1300.820
10000	5841811	10283676	35	62	940.451	1270.090

5 Conclusies

- Het vullen van een niet-zelf-balanceerdende binaire zoekboom met een niet-gesorteerde verzameling is meer dan twee keer zo efficiënt als het vullen van een variant die wel zelf-balancerend is. Dat is eigenlijk ook wat men mag verwachten gezien het feit dat de zelf-balancerende bomen met operaties moeten uitvoeren om de balans te herstellen.

- De binaire zoekboom en de treap laten presteren erg slecht zodra we een boom moeten vullen met een gesorteerde verzameling. Dit is zichtbaar in de resultaten van experiment 1. Zie ook de uitgebreide uitleg hierover in sectie 2, *Implementatie Binaire zoekboom.*

- Een AVL-boom voert een zoekopdracht gemiddeld het snelste uit. Dit is anders dan voorspelt bij onze hypothese dat de splay boom sneller zou moeten presteren bij zoekacties met herhalende patronen. Dit zou mogelijk veroorzaakt kunnen worden door het feit dat van alle bomen de AVL-boom het beste gebalanceerd blijft, omdat hier de prioriteit ligt van het algoritme. Het algoritme achter de splay-boom prioriteert juist op meest recente toegang, maar niet per se op de balans in de boom vanaf de wortel.

- Treaps en AVL-bomen nemen het meeste geheugen in het gebruik. Zie experiment 3. Dit is in overeenstemming met onze hypothese.

- De onderlinge verschillen wat betreft geheugenverbruik zijn, zelfs met een wat grotere data set, verwaarloosbaar. Niet geheel verassend nemen de nodes van Treap en AVL iets meer ruimte in omdat deze een prioriteit resp. balansfactor bijhouden.
  Het feit dat het invoerbestand `Nederlands_unsorted.txt` slechts 2,1 Mb groot is, zegt wel iets over de efficiëntie van het geheugengebruik in het algemeen, zowel van onze implementatie als van dit soort boom datatypen in het algemeen.

- Ontwerpkeuzen spelen bij bovenstaande een grote rol: als we bijvoorbeeld ervoor hadden gekozen om geen 'ouder-pointers' te gebruiken, hadden we tussen 0,6 en 1,2 Mb op deze cijfers kunnen besparen.

- Des te minder willekeurig de prioriteit van een Treap, des te efficiënter het uitvoeren van een zoekopdracht.

- Treap presteert niet consistent, dit blijkt uit deelexperiment 2 van experiment 4. Dit is vooral merkbaar bij een prioriteit met een grote mate van willekeurigheid, waar in het experiment de best-case testcase een minimum gemiddelde zoekdiepte van 35 heeft en de worst-case testcase een maximum gemiddelde zoekdiepte van 62 heeft.

6 Appendix

6.1 main.cc

```
1  /**
2   * main.cc:
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    main.cc
7   * @date    26-10-2014
8   **/
9
```

```
10 #include <iostream>
11 #include "BinarySearchTree.h"
12 #include "Tree.h"
13 #include "AVLTree.h"
14 #include "SplayTree.h"
15 #include "Treap.h"
16 #include <string>
17
18 using namespace std;
19
20 // Makkelijk voor debuggen, moet nog beter
21 template<class T> void printTree( Tree<T> tree, int rows ) {
22     typename Tree<T>::nodelist list =tree.row( 0 );
23     int row =0;
24     while( !list.empty( ) && row < rows ) {
25         string offset;
26         for( int i =0; i < ( 1 << (rows - row) ) - 1 ; ++i )
27             offset += ' ';
28
29
30         for( auto it =list.begin( ); it != list.end( ); ++it ) {
31             if( *it )
32                 cout << offset << (*it)->info() << " " << offset;
33             else
34                 cout << offset << ". " << offset;
35         }
36         cout << endl;
37         row++;
38         list =tree.row( row );
39     }
40 }
41
42 int main ( int argc, char **argv ) {
43
44     /* BST hieronder */
45
46     cout << "BST:" << endl;
47     BinarySearchTree<int> bst;
48
49    /* auto root =bst.pushBack( 10 );
50     bst.pushBack( 5 );
51     bst.pushBack( 15 );
52
53     bst.pushBack( 25 );
54     bst.pushBack( 1 );
55     bst.pushBack( -1 );
56     bst.pushBack( 11 );
57     bst.pushBack( 12 );*/
58
59     Tree<int>* bstP =&bst; // Dit werkt gewoon :-)
60
61     auto root =bstP->pushBack( 10 );
62     bstP->pushBack( 5 );
63     bstP->pushBack( 15 );
```

```
64
65      bstP->pushBack( 25 );
66      bstP->pushBack( 1 );
67      bstP->pushBack( -1 );
68      bstP->pushBack( 11 );
69      bstP->pushBack( 12 );
70
71      //printTree<int>( bst, 5 );
72
73
74      //bst.remove( bst.find( 0, 15 ) );
75      //bst.replace( -2, bst.find( 0, 5 ) );
76
77
78      printTree<int>( bst, 5 );
79
80      bst.remove( root );
81
82
83      printTree<int>( bst, 5 );
84
85      /* Splay Trees hieronder */
86
87      cout << "Splay Boom:" << endl;
88      SplayTree<int> splay;
89
90      splay.pushBack( 10 );
91      auto a =splay.pushBack( 5 );
92      splay.pushBack( 15 );
93
94      splay.pushBack( 25 );
95      auto b =splay.pushBack( 1 );
96      splay.pushBack( -1 );
97      auto c =splay.pushBack( 11 );
98      splay.pushBack( 12 );
99
100     //printTree<int>( splay, 5 );
101
102     //a->swapWith( b );
103     //splay.remove( splay.find( 0, 15 ) );
104     //splay.replace( -2, splay.find( 0, 5 ) );
105
106
107     printTree<int>( splay, 5 );
108
109     //splay.remove( root );
110
111     splay.splay( c );
112
113     printTree<int>( splay, 5 );
114
115     // Test AVLTree //
116
117     AVLTree<char> test;
```

```
118     test.insert('a');
119     auto d =test.insert('b');
120     test.insert('c');
121     test.insert('d');
122     test.insert('e');
123     test.insert('f');
124     test.insert('g');
125     cout << "AVL Boompje:" << endl;
126     printTree<char>( test, 5 );
127     cout << d->info( ) << " verwijderen: " << endl;
128     test.remove( d );
129     printTree<char>( test, 5 );
130
131     // Test Treap //
132
133     cout << "Treap" << endl;
134
135     Treap<int> testTreap(5);
136     testTreap.insert(2);
137     testTreap.insert(3);
138     auto e =testTreap.insert(4);
139     testTreap.insert(5);
140     printTree<int>( testTreap, 5 );
141     testTreap.remove(e);
142     printTree<int>( testTreap, 5 );
143
144     return 0;
145 }
```

6.2 hooiberg.cc

```
1  /**
2   * hooiberg.cc:
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    helehogebomen.cc
7   * @date    10-12-2014
8   **/
9
10 #include "BinarySearchTree.h"
11 #include "Tree.h"
12 #include "AVLTree.h"
13 #include "SplayTree.h"
14 #include "Treap.h"
15
16 #include <iostream>
17 #include <string>
18 #include <fstream>
19 #include <vector>
20 #include <chrono>
21
22 // Only works on *nix operating systems
23 // Needed for precision timing
```

```
24 #include <sys/time.h>
25
26 using namespace std;
27
28 // Makkelijk voor debuggen, moet nog beter
29 template<class T> void printTree( Tree<T> tree, int rows ) {
30     typename Tree<T>::nodelist list =tree.row( 0 );
31     int row =0;
32     while( !list.empty( ) && row < rows ) {
33         string offset;
34         for( int i =0; i < ( 1 << (rows - row) ) - 1 ; ++i )
35             offset += ' ';
36
37
38         for( auto it =list.begin( ); it != list.end( ); ++it ) {
39             if( *it )
40                 cout << offset << (*it)->info() << " " << offset;
41             else
42                 cout << offset << ". " << offset;
43         }
44         cout << endl;
45         row++;
46         list =tree.row( row );
47     }
48 }
49
50 int printUsage( const char* prog ) {
51
52     std::cout << "Reads an input file and searches it for a set of strings\n\n"
53          << "Usage: " << prog << " [type] [haystack] [needles] [treap-random]\n"
54          << "\t[type]\t\tTree type to use. One of 'splay', 'avl', 'treap', 'bst'\n"
55          << "\t[haystack]\tInput file, delimited by newlines\n"
56          << "\t[needles]\tFile containing sets of strings to search for, delimited by
57          << "\t[treap-random]\tOptimal customization of the random factor of Treap\n"
58          << std::endl;
59     return 0;
60 }
61
62 bool extractNeedles( std::vector<string> &list, std::ifstream &file ) {
63     string needle;
64     while( !file.eof( ) ) {
65         std::getline( file, needle );
66         if( needle.size( ) )
67             list.push_back( needle );
68     }
69     return true;
70 }
71
72 bool fillTree( BinarySearchTree<string>* tree, std::ifstream &file ) {
73     string word;
74     while( !file.eof( ) ) {
75         std::getline( file, word );
76         if( word.size( ) )
77             tree->pushBack( word );
```

```
78      }
79      return true;
80  }
81
82  void findAll( std::vector<string> &list, BinarySearchTree<string>* tree ) {
83      int steps =0, found =0, notfound =0;
84      for( auto needle : list ) {
85          if( tree->find( 0, needle ) ) {
86              found++;
87              steps +=tree->lastSearchStepCount( );
88              if( found < 51 )
89                  std::cout << "Found `" << needle << '\''
90                  << " in " << tree->lastSearchStepCount( ) << " steps." << std::endl;
91          }
92          else if( ++notfound < 51 )
93              std::cout << "Didn't find `" << needle << '\'' << std::endl;
94      }
95      if( found > 50 )
96          std::cout << found - 50 << " more results not shown here." << std::endl;
97      if( found )
98          cout << "Total search depth:           " << steps << endl
99               << "Number of matches:            " << found << endl
100              << "Number of misses:             " << notfound << endl
101              << "Average search depth (hits): " << steps/found << endl;
102 }
103
104 int main ( int argc, char **argv ) {
105
106     enum MODE { NONE =0, BST, AVL, SPLAY, TREAP };
107     int mode =NONE;
108
109     if( argc < 4 )
110         return printUsage( argv[0] );
111
112     if( std::string( argv[1] ) == "bst" )
113         mode =BST;
114     else if( std::string( argv[1] ) == "avl" )
115         mode =AVL;
116     else if( std::string( argv[1] ) == "treap" )
117         mode =TREAP;
118     if( std::string( argv[1] ) == "splay" )
119         mode =SPLAY;
120
121     if( !mode )
122         return printUsage( argv[0] );
123
124     std::ifstream fhaystack( argv[2] );
125     if( !fhaystack.good( ) ) {
126         std::cerr << "Could not open " << argv[2] << std::endl;
127         return -1;
128     }
129
130     std::ifstream fneedles( argv[3] );
131     if( !fneedles.good( ) ) {
```

```
132         std::cerr << "Could not open " << argv[3] << std::endl;
133         return -1;
134     }
135 
136     if( argc > 4 ) {
137         if( argv[4] && mode != TREAP ) {
138             std::cerr << "This variable should only be set for Treaps." << std::endl;
139             return -1;
140         }
141         else if( atoi(argv[4]) <= 0 ) {
142             std::cerr << "This variable should only be an integer "
143                       << " greater than 0." << std::endl;
144             return -1;
145         }
146     }
147 
148     std::vector<string> needles;
149     if( !extractNeedles( needles, fneedles ) ) {
150         cerr << "Could not read a set of strings to search for." << endl;
151         return -1;
152     }
153 
154     BinarySearchTree<string> *tree;
155     switch( mode ) {
156         case BST:
157             tree = new BinarySearchTree<string>();
158             break;
159         case AVL:
160             tree = new AVLTree<string>();
161             break;
162         case SPLAY:
163             tree = new SplayTree<string>();
164             break;
165         case TREAP:
166             tree = new Treap<string>( argc > 4 ? atoi(argv[4]) : 100 ); // Default wa
167             break;
168     }
169 
170 
171     // Define a start point to time measurement
172     auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now();
173 
174 
175     if( !fillTree( tree, fhaystack ) ) {
176         cerr << "Could not read the haystack." << endl;
177         return -1;
178     }
179 
180     // Determine the duration of the code block
181     auto duration =std::chrono::duration_cast<std::chrono::milliseconds>
182                           (std::chrono::high_resolution_clock::now() - start);
183 
184     cout << "Filled the binary search tree in " << duration.count() << "ms" << endl;
185 
```

```
186     start = std::chrono::high_resolution_clock::now();
187     findAll( needles, tree );
188     auto durationNs =std::chrono::duration_cast<std::chrono::nanoseconds>
189                             (std::chrono::high_resolution_clock::now() - start);
190 
191     cout << "Searched the haystack in " << durationNs.count() << "ns, ~" << (float)du
192 
193     // Test pre-order
194     //for( auto word : *tree ) {
195     //    cout << word << '\n';
196     //}
197 
198     fhaystack.close( );
199     fneedles.close( );
200     delete tree;
201 
202     return 0;
203 }
```

6.3 Tree.h

```
1  /**
2   * Tree:
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    tree.h
7   * @date    26-10-2014
8   **/
9 
10 #ifndef TREE_H
11 #define TREE_H
12 #include "TreeNodeIterator.h"
13 #include <assert.h>
14 #include <list>
15 #include <map>
16 
17 using namespace std;
18 
19 template <class INFO_T> class SplayTree;
20 
21 template <class INFO_T> class Tree
22 {
23     public:
24         enum ReplaceBehavoir {
25             DELETE_EXISTING,
26             ABORT_ON_EXISTING,
27             MOVE_EXISTING
28         };
29 
30         typedef TreeNode<INFO_T> node_t;
31         typedef TreeNodeIterator<INFO_T> iterator;
32         typedef TreeNodeIterator_in<INFO_T> iterator_in;
33         typedef TreeNodeIterator_pre<INFO_T> iterator_pre;
```

```
34          typedef TreeNodeIterator_post<INFO_T> iterator_post;
35          typedef list<node_t*> nodelist;
36
37         /**
38          * @function  Tree( )
39          * @abstract  Constructor of an empty tree
40          **/
41          Tree( )
42              : m_root( 0 ) {
43          }
44
45         /**
46          * @function  Tree( )
47          * @abstract  Copy-constructor of a tree. The new tree contains the nodes
48          *            from the tree given in the parameter (deep copy)
49          * @param     tree, a tree
50          **/
51          Tree( const Tree<INFO_T>& tree )
52              : m_root( 0 ) {
53              *this =tree;
54          }
55
56          /**
57          * @function  ~Tree( )
58          * @abstract  Destructor of a tree. Timber.
59          **/
60          ~Tree( ) {
61            clear( );
62          }
63
64         /**
65          * @function  begin_pre( )
66          * @abstract  begin point for pre-order iteration
67          * @return    interator_pre containing the beginning of the tree in
68          *            pre-order
69          **/
70          iterator_pre begin_pre( ) {
71              // Pre-order traversal starts at the root
72              return iterator_pre( m_root );
73            }
74
75         /**
76          * @function  begin( )
77          * @abstract  begin point for a pre-order iteration
78          * @return    containing the beginning of the pre-0rder iteration
79          **/
80          iterator_pre begin( ) {
81              return begin_pre( );
82          }
83
84         /**
85          * @function  end( )
86          * @abstract  end point for a pre-order iteration
87          * @return    the end of the pre-order iteration
```

```
88          **/
89          iterator_pre end( ) {
90              return iterator_pre( (node_t*)0 );
91          }
92
93          /**
94           * @function  end_pre( )
95           * @abstract  end point for pre-order iteration
96           * @return    interator_pre containing the end of the tree in pre-order
97           **/
98          iterator_pre end_pre( ) {
99              return iterator_pre( (node_t*)0 );
100         }
101
102         /**
103          * @function  begin_in( )
104          * @abstract  begin point for in-order iteration
105          * @return    interator_in containing the beginning of the tree in
106          *            in-order
107          **/
108         iterator_in begin_in( ) {
109             if( !m_root )
110                 return end_in( );
111             node_t *n =m_root;
112             while( n->leftChild( ) )
113                 n =n->leftChild( );
114             return iterator_in( n );
115           }
116
117         /**
118          * @function  end_in( )
119          * @abstract  end point for in-order iteration
120          * @return    interator_in containing the end of the tree in in-order
121          **/
122         iterator_in end_in( ) {
123             return iterator_in( (node_t*)0 );
124         }
125
126         /**
127          * @function  begin_post( )
128          * @abstract  begin point for post-order iteration
129          * @return    interator_post containing the beginning of the tree in
130          *            post-order
131          **/
132         iterator_post begin_post( ) {
133             if( !m_root )
134                 return end_post( );
135             node_t *n =m_root;
136             while( n->leftChild( ) )
137                 n =n->leftChild( );
138             return iterator_post( n );
139         }
140
141         /**
```

```
142          * @function  end_post( )
143          * @abstract  end point for post-order iteration
144          * @return    interator_post containing the end of the tree in post-order
145          **/
146          iterator_post end_post( ) {
147              return iterator_post( (node_t*)0 );
148          }
149
150         /**
151          * @function  pushBack( )
152          * @abstract  a new TreeNode containing 'info' is added to the end
153          *            the node is added to the node that :
154          *               - is in the row as close to the root as possible
155          *               - has no children or only a left-child
156          *               - seen from the right hand side of the row
157          *            this is the 'natural' left-to-right filling order
158          *            compatible with array-based heaps and full b-trees
159          * @param     info, the contents of the new node
160          * @post      A node has been added.
161          **/
162          virtual node_t *pushBack( const INFO_T& info ) {
163              node_t *n =new node_t( info, 0 );
164              if( !m_root ) { // Empty tree, simplest case
165                  m_root =n;
166              }
167              else { // Leaf node, there are two different scenarios
168                  int max =getRowCountRecursive( m_root, 0 );
169                  node_t *parent;
170                  for( int i =1; i <= max; ++i ) {
171
172                      parent =getFirstEmptySlot( i );
173                      if( parent ) {
174                          if( !parent->leftChild( ) )
175                              parent->setLeftChild( n );
176                          else if( !parent->rightChild( ) )
177                              parent->setRightChild( n );
178                          n->setParent( parent );
179                          break;
180                      }
181                  }
182              }
183              return n;
184          }
185
186         /**
187          * @function  insert( )
188          * @abstract  inserts node or subtree under a parent or creates an empty
189          *            root node
190          * @param     info, contents of the new node
191          * @param     parent, parent node of the new node. When zero, the root is
192          *            assumed
193          * @param     alignRight, insert() checks on which side of the parent
194          *            node the new node can be inserted. By default, it checks
195          *            the left side first.
```

```
196         *            To change this behavior, set preferRight =true.
197         * @param     replaceBehavior, action if parent already has two children.
198         *            One of:
199         *            ABORT_ON_EXISTING - abort and return zero
200         *            MOVE_EXISTING - make the parent's child a child of the new
201         *                            node, satisfies preferRight
202         *            DELETE_EXISTING - remove one of the children of parent
203         *                              completely also satisfies preferRight
204         * @return    pointer to the inserted TreeNode, if insertion was
205         *            successfull
206         * @pre       If the tree is empty, a root node will be created with info
207         *            as it contents
208         * @pre       The instance pointed to by parent should be part of the
209         *            called instance of Tree
210         * @post      Return zero if no node was created. Ownership is assumed on
211         *            the new node.
212         *            When DELETE_EXISTING is specified, the entire subtree on
213         *            preferred side may be deleted first.
214         **/
215         virtual node_t* insert( const INFO_T& info,
216                                 node_t* parent =0,
217                                 bool preferRight =false,
218                                 int replaceBehavior =ABORT_ON_EXISTING ) {
219             if( !parent )
220                 parent =m_root;
221
222             if( !parent )
223                 return pushBack( info );
224
225             node_t *node =0;
226
227             if( !parent->leftChild( )
228                   && ( !preferRight || ( preferRight &&
229                         parent->rightChild( ) ) ) ) {
230                 node =new node_t( info, parent );
231                 parent->setLeftChild( node );
232                 node->setParent( parent );
233
234             } else if( !parent->rightChild( ) ) {
235                 node =new node_t( info, parent );
236                 parent->setRightChild( node );
237                 node->setParent( parent );
238
239             } else if( replaceBehavior == MOVE_EXISTING ) {
240                 node =new node_t( info, parent );
241                 if( preferRight ) {
242                     node->setRightChild( parent->rightChild( ) );
243                     node->rightChild( )->setParent( node );
244                     parent->setRightChild( node );
245                 } else {
246                     node->setLeftChild( parent->leftChild( ) );
247                     node->leftChild( )->setParent( node );
248                     parent->setLeftChild( node );
249                 }
```

```
250
251             } else if( replaceBehavior == DELETE_EXISTING ) {
252                 node =new node_t( info, parent );
253                 if( preferRight ) {
254                     deleteRecursive( parent->rightChild( ) );
255                     parent->setRightChild( node );
256                 } else {
257                     deleteRecursive( parent->leftChild( ) );
258                     parent->setLeftChild( node );
259                 }
260
261             }
262             return node;
263         }
264
265         /**
266          * @function  replace( )
267          * @abstract  replaces an existing node with a new node
268          * @param     info, contents of the new node
269          * @param     node, node to be replaced. When zero, the root is assumed
270          * @param     alignRight, only for MOVE_EXISTING. If true, node will be
271          *            the right child of the new node. Otherwise, it will be the
272          *            left.
273          * @param     replaceBehavior, one of:
274          *            ABORT_ON_EXISTING - undefined for replace()
275          *            MOVE_EXISTING - make node a child of the new node,
276          *                            satisfies preferRight
277          *            DELETE_EXISTING - remove node completely
278          * @return    pointer to the inserted TreeNode, replace() is always
279          *            successful
280          * @pre       If the tree is empty, a root node will be created with info
281          *            as it contents
282          * @pre       The instance pointed to by node should be part of the
283          *            called instance of Tree
284          * @post      Ownership is assumed on the new node. When DELETE_EXISTING
285          *            is specified, the entire subtree pointed to by node is
286          *            deleted first.
287          **/
288         virtual node_t* replace( const INFO_T& info,
289                                  node_t* node =0,
290                                  bool alignRight =false,
291                                  int replaceBehavior =DELETE_EXISTING ) {
292             assert( replaceBehavior != ABORT_ON_EXISTING );
293
294             node_t *newnode =new node_t( info );
295             if( !node )
296                 node =m_root;
297             if( !node )
298                 return pushBack( info );
299
300             if( node->parent( ) ) {
301                 newnode->setParent( node->parent( ) );
302                 if( node->parent( )->leftChild( ) == node )
303                     node->parent( )->setLeftChild( newnode );
```

```
304                 else
305                     node->parent( )->setRightChild( newnode );
306             } else
307                 m_root =newnode;
308 
309             if( replaceBehavior == DELETE_EXISTING ) {
310 
311                 deleteRecursive( node );
312             }
313             else if( replaceBehavior == MOVE_EXISTING ) {
314                 if( alignRight )
315                     newnode->setRightChild( node );
316                 else
317                     newnode->setLeftChild( node );
318                 node->setParent( newnode );
319             }
320             return node;
321         }
322 
323         /**
324          * @function  remove( )
325          * @abstract  removes and deletes node or subtree
326          * @param     n, node or subtree to be removed and deleted
327          * @post      after remove(), n points to an invalid address
328          **/
329         virtual void remove( node_t *n ) {
330             if( !n )
331                 return;
332             if( n->parent( ) ) {
333                 if( n->parent( )->leftChild( ) == n )
334                     n->parent( )->setLeftChild( 0 );
335                 else if( n->parent( )->rightChild( ) == n )
336                     n->parent( )->setRightChild( 0 );
337             }
338             deleteRecursive( n );
339         }
340 
341         /**
342          * @function  clear( )
343          * @abstract  clears entire tree
344          * @pre       tree may be empty
345          * @post      all nodes and data are deallocated
346          **/
347         void clear( ) {
348             deleteRecursive( m_root );
349             m_root =0;
350         }
351 
352         /**
353          * @function  empty( )
354          * @abstract  test if tree is empty
355          * @return    true when empty
356          **/
357         bool isEmpty( ) const {
```

```
358             return !m_root;
359         }
360 
361         /**
362          * @function  root( )
363          * @abstract  returns address of the root of the tree
364          * @return    the adress of the root of the tree is returned
365          * @pre       there needs to be a tree
366          **/
367         node_t* root( ){
368             return m_root;
369         }
370 
371         /**
372          * @function  row( )
373          * @abstract  returns an entire row/level in the tree
374          * @param     level, the desired row. Zero gives just the root.
375          * @return    a list containing all node pointers in that row
376          * @pre       level must be positive or zero
377          * @post
378          **/
379         nodelist row( int level ) {
380             nodelist rlist;
381             getRowRecursive( m_root, rlist, level );
382             return rlist;
383         }
384 
385         /**
386          * @function  find( )
387          * @abstract  find the first occurrence of info and returns its node ptr
388          * @param     haystack, the root of the (sub)tree we want to look in
389          *            null if we want to start at the root of the tree
390          * @param     needle, the needle in our haystack
391          * @return    a pointer to the first occurrence of needle
392          * @post      there may be multiple occurrences of needle, we only return
393          *            one. A null-pointer is returned if no needle is found
394          **/
395         virtual node_t* find( node_t* haystack, const INFO_T& needle ) {
396             if( haystack == 0 ) {
397                     if( m_root )
398                         haystack =m_root;
399                     else
400                         return 0;
401             }
402             return findRecursive( haystack, needle );
403         }
404 
405         /**
406          * @function  contains( )
407          * @abstract  determines if a certain content (needle) is found
408          * @param     haystack, the root of the (sub)tree we want to look in
409          *            null if we want to start at the root of the tree
410          * @param     needle, the needle in our haystack
411          * @return    true if needle is found
```

```
412          **/
413          bool contains( node_t* haystack, const INFO_T& needle ) {
414              return find( haystack, needle );
415          }
416
417         /**
418          * @function  toDot( )
419          * @abstract  writes tree in Dot-format to a stream
420          * @param     out, ostream to write to
421          * @pre       out must be a valid stream
422          * @post      out (file or cout) with the tree in dot-notation
423          **/
424          void toDot( ostream& out, const string & graphName ) {
425              if( isEmpty( ) )
426                  return;
427              map<node_t *, int> adresses;
428              typename map< node_t *, int >::iterator adrIt;
429              int i =1;
430              int p;
431              iterator_pre it;
432              iterator_pre tempit;
433              adresses[m_root] =0;
434              out << "digraph " << graphName << '{' << endl << '"' << 0 << '"';
435              for( it =begin_pre( ); it != end_pre( ); ++it ) {
436                  adrIt =adresses.find( &(*it) );
437                  if( adrIt == adresses.end( ) ) {
438                      adresses[&(*it)] =i;
439                      p =i;
440                      i ++;
441                  }
442                  if( (&(*it))->parent( ) != &(*tempit) )
443                    out << ';' << endl << '"'
444                        << adresses.find( (&(*it))->parent( ))->second << '"';
445                  if( (&(*it)) != m_root )
446                      out << " -> \"" << p << '"';
447                  tempit =it;
448              }
449              out << ';' << endl;
450              for ( adrIt =adresses.begin( ); adrIt != adresses.end( ); ++adrIt )
451                  out << adrIt->second << " [label=\""
452                      << adrIt->first->info( ) << "\"]";
453              out << '}';
454          }
455
456         /**
457          * @function  copyFromNode( )
458          * @abstract  copies the the node source and its children to the node
459          *            dest
460          * @param     source, the node and its children that need to be copied
461          * @param     dest, the node who is going to get the copied children
462          * @param     left, this is true if it's a left child.
463          * @pre       there needs to be a tree and we can't copy to a root.
464          * @post      the subtree that starts at source is now also a child of
465          *            dest
```

```
466         **/
467         void copyFromNode( node_t *source, node_t *dest, bool left ) {
468             if (!source)
469                 return;
470             node_t *acorn =new node_t( dest );
471             if(left) {
472                 if( dest->leftChild( ))
473                     return;
474                 dest->setLeftChild( acorn );
475             }
476             else {
477                 if( dest->rightChild( ))
478                     return;
479                 dest->setRightChild( acorn );
480             }
481             cloneRecursive( source, acorn );
482         }
483 
484         Tree<INFO_T>& operator=( const Tree<INFO_T>& tree ) {
485             clear( );
486             if( tree.m_root ) {
487                 m_root =new node_t( (node_t*)0 );
488                 cloneRecursive( tree.m_root, m_root );
489             }
490             return *this;
491         }
492 
493     protected:
494        /**
495         * @function  cloneRecursive( )
496         * @abstract  cloning a subtree to a node
497         * @param     source, the node we want to start the cloning process from
498         * @param     dest, the node we want to clone to
499         * @post      the subtree starting at source is cloned to the node dest
500         **/
501         void cloneRecursive( node_t *source, node_t* dest ) {
502             dest->info() =source->info();
503             if( source->leftChild( ) ) {
504                 node_t *left =new node_t( dest );
505                 dest->setLeftChild( left );
506                 cloneRecursive( source->leftChild( ), left );
507             }
508             if( source->rightChild( ) ) {
509                 node_t *right =new node_t( dest );
510                 dest->setRightChild( right );
511                 cloneRecursive( source->rightChild( ), right );
512             }
513         }
514 
515         /**
516          * @function  deleteRecursive( )
517          * @abstract  delete all nodes of a given tree
518          * @param     root, starting point, is deleted last
519          * @post      the subtree has been deleted
```

```
520          **/
521          void deleteRecursive( node_t *root ) {
522              if( !root )
523                  return;
524              deleteRecursive( root->leftChild( ) );
525              deleteRecursive( root->rightChild( ) );
526              delete root;
527          }
528
529         /**
530          * @function  getRowCountRecursive( )
531          * @abstract  calculate the maximum depth/row count in a subtree
532          * @param     root, starting point
533          * @param     level, starting level
534          * @return    maximum depth/rows in the subtree
535          **/
536          int getRowCountRecursive( node_t* root, int level ) {
537              if( !root )
538                  return level;
539              return max(
540                      getRowCountRecursive( root->leftChild( ), level+1 ),
541                      getRowCountRecursive( root->rightChild( ), level+1 ) );
542          }
543
544         /**
545          * @function  getRowRecursive( )
546          * @abstract  compile a full list of one row in the tree
547          * @param     root, starting point
548          * @param     rlist, reference to the list so far
549          * @param     level, how many level still to go
550          * @post      a list of a row in the tree has been made.
551          **/
552          void getRowRecursive( node_t* root, nodelist &rlist, int level ) {
553              // Base-case
554              if( !level ) {
555                  rlist.push_back( root );
556              } else if( root ){
557                  level--;
558                  if( level && !root->leftChild( ) )
559                      for( int i =0; i < (level<<1); ++i )
560                          rlist.push_back( 0 );
561                  else
562                     getRowRecursive( root->leftChild( ), rlist, level );
563
564                  if( level && !root->rightChild( ) )
565                      for( int i =0; i < (level<<1); ++i )
566                          rlist.push_back( 0 );
567                  else
568                      getRowRecursive( root->rightChild( ), rlist, level );
569              }
570          }
571
572          /**
573          * @function  findRecursive( )
```

```
574         * @abstract  first the first occurrence of needle and return its node
575         *            ptr
576         * @param     haystack, root of the search tree
577         * @param     needle, copy of the data to find
578         * @return    the node that contains the needle
579         **/
580         node_t *findRecursive( node_t* haystack, const INFO_T &needle ) {
581             if( haystack->info( ) == needle )
582                 return haystack;
583 
584             node_t *n =0;
585             if( haystack->leftChild( ) )
586                 n =findRecursive( haystack->leftChild( ), needle );
587             if( !n && haystack->rightChild( ) )
588                 n =findRecursive( haystack->rightChild( ), needle );
589             return n;
590         }
591 
592         friend class TreeNodeIterator_pre<INFO_T>;
593         friend class TreeNodeIterator_in<INFO_T>;
594         friend class SplayTree<INFO_T>;
595         TreeNode<INFO_T> *m_root;
596 
597     private:
598         /**
599         * @function  getFirstEmptySlot( )
600         * @abstract  when a row has a continuous empty space on the right,
601         *            find the left-most parent in the above row that has
602         *            at least one empty slot.
603         * @param     level, how many level still to go
604         * @return    the first empty slot where we can put a new node
605         * @pre       level should be > 1
606         **/
607         node_t *getFirstEmptySlot( int level ) {
608             node_t *p =0;
609             nodelist rlist =row( level-1 ); // we need the parents of this level
610             /** changed auto to int **/
611             for( auto it =rlist.rbegin( ); it !=rlist.rend( ); ++it ) {
612                 if( !(*it)->hasChildren( ) )
613                     p =(*it);
614                 else if( !(*it)->rightChild( ) ) {
615                     p =(*it);
616                     break;
617                 } else
618                     break;
619             }
620             return p;
621         }
622 };
623 
624 #endif
```

6.4 TreeNode.h

```
/**
 * Treenode:
 *
 * @author  Micky Faas (s1407937)
 * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
 * @file    Treenode.h
 * @date    26-10-2014
 **/

#ifndef TREENODE_H
#define TREENODE_H

using namespace std;

template <class INFO_T> class Tree;
class ExpressionTree;

template <class INFO_T> class TreeNode
{
    public:
       /**
        * @function  TreeNode( )
        * @abstract  Constructor, creates a node
        * @param     info, the contents of a node
        * @param     parent, the parent of the node
        * @post      A node has been created.
        **/
        TreeNode( const INFO_T& info, TreeNode<INFO_T>* parent =0 )
            : m_lchild( 0 ), m_rchild( 0 ) {
            m_info =info;
            m_parent =parent;
        }

       /**
        * @function  TreeNode( )
        * @abstract  Constructor, creates a node
        * @param     parent, the parent of the node
        * @post      A node has been created.
        **/
        TreeNode( TreeNode<INFO_T>* parent =0 )
            : m_lchild( 0 ), m_rchild( 0 ) {
            m_parent =parent;
        }

       /**
        * @function  =
        * @abstract  Sets a nodes content to N
        * @param     n, the contents you want the node to have
        * @post      The node now has those contents.
        **/
        void operator =( INFO_T n ) { m_info =n; }

       /**
        * @function  INFO_T( ), info( )
```

```
55          * @abstract  Returns the content of a node
56          * @return    m_info, the contents of the node
57          **/
58          operator INFO_T( ) const { return m_info; }
59          const INFO_T &info( ) const { return m_info; }
60          INFO_T &info( ) { return m_info; }
61          /**
62          * @function  atRow( )
63          * @abstract  returns the level or row-number of this node
64          * @return    row, an int of row the node is at
65          **/
66          int atRow( ) const {
67              const TreeNode<INFO_T> *n =this;
68              int row =0;
69              while( n->parent( ) ) {
70                  n =n->parent( );
71                  row++;
72              }
73              return row;
74          }
75
76         /**
77          * @function  parent( ), leftChild( ), rightChild( )
78          * @abstract  returns the adress of the parent, left child and right
79          *            child respectively
80          * @return    the adress of the requested family member of the node
81          **/
82          TreeNode<INFO_T> *parent( ) const { return m_parent; }
83          TreeNode<INFO_T> *leftChild( ) const { return m_lchild; }
84          TreeNode<INFO_T> *rightChild( ) const { return m_rchild; }
85
86          /**
87          * @function  swapWith( )
88          * @abstract  Swaps this node with another node in the tree
89          * @param     n, the node to swap this one with
90          * @pre       both this node and n must be in the same parent tree
91          * @post      n will have the parent and children of this node
92          *            and vice verse. Both nodes retain their data.
93          **/
94          void swapWith( TreeNode<INFO_T>* n ) {
95              bool this_wasLeftChild =false, n_wasLeftChild =false;
96              if( parent( ) && parent( )->leftChild( ) == this )
97                  this_wasLeftChild =true;
98              if( n->parent( ) && n->parent( )->leftChild( ) == n )
99                  n_wasLeftChild =true;
100
101             // Swap the family info
102             TreeNode<INFO_T>* newParent =
103                 ( n->parent( ) == this ) ? n : n->parent( );
104             TreeNode<INFO_T>* newLeft =
105                 ( n->leftChild( ) == this ) ? n :n->leftChild( );
106             TreeNode<INFO_T>* newRight =
107                  ( n->rightChild( ) == this ) ? n :n->rightChild( );
108
```

```
109             n->setParent( parent( ) == n ? this : parent( ) );
110             n->setLeftChild( leftChild( ) == n ? this : leftChild( ) );
111             n->setRightChild( rightChild( ) == n ? this : rightChild( ) );
112 
113             setParent( newParent );
114             setLeftChild( newLeft );
115             setRightChild( newRight );
116 
117             // Restore applicable pointers
118             if( n->leftChild( ) )
119                 n->leftChild( )->setParent( n );
120             if( n->rightChild( ) )
121                 n->rightChild( )->setParent( n );
122             if( leftChild( ) )
123                 leftChild( )->setParent( this );
124             if( rightChild( ) )
125                 rightChild( )->setParent( this );
126             if( n->parent( ) ) {
127                 if( this_wasLeftChild )
128                     n->parent( )->setLeftChild( n );
129                 else
130                     n->parent( )->setRightChild( n );
131             }
132             if( parent( ) ) {
133                 if( n_wasLeftChild )
134                     parent( )->setLeftChild( this );
135                 else
136                     parent( )->setRightChild( this );
137             }
138         }
139 
140         /**
141         * @function  replace( )
142         * @abstract  Replaces the node with another node in the tree
143         * @param     n, the node we replace the node with, this one gets deleted
144         * @pre       both this node and n must be in the same parent tree
145         * @post      The node will be replaced and n will be deleted.
146         **/
147         void replace( TreeNode<INFO_T>* n ) {
148             bool n_wasLeftChild =false;
149 
150             if( n->parent( ) && n->parent( )->leftChild( ) == n )
151                 n_wasLeftChild =true;
152 
153             // Swap the family info
154             TreeNode<INFO_T>* newParent =
155                 ( n->parent( ) == this ) ? n : n->parent( );
156             TreeNode<INFO_T>* newLeft =
157                 ( n->leftChild( ) == this ) ? n :n->leftChild( );
158             TreeNode<INFO_T>* newRight =
159                  ( n->rightChild( ) == this ) ? n :n->rightChild( );
160 
161             setParent( newParent );
162             setLeftChild( newLeft );
```

```
163             setRightChild( newRight );
164             m_info = n->m_info;
165 
166             // Restore applicable pointers
167             if( leftChild( ) )
168                 leftChild( )->setParent( this );
169             if( rightChild( ) )
170                 rightChild( )->setParent( this );
171 
172             if( parent( ) ) {
173                 if( n_wasLeftChild )
174                     parent( )->setLeftChild( this );
175                 else
176                     parent( )->setRightChild( this );
177             }
178             delete n;
179         }
180 
181         /**
182         * @function  sibling( )
183         * @abstract  returns the address of the sibling
184         * @return    the address to the sibling or zero if there is no sibling
185         **/
186         TreeNode<INFO_T>* sibling( ) {
187             if( parent( )->leftChild( ) == this )
188                 return parent( )->rightChild( );
189             else if( parent( )->rightChild( ) == this )
190                 return parent( )->leftChild( );
191             else
192                 return 0;
193         }
194 
195        /**
196         * @function  hasChildren( ), hasParent( ), isFull( )
197         * @abstract  Returns whether the node has children, has parents or is
198         *            full (has two children) respectively
199         * @param
200         * @return    true or false, depending on what is requested from the node.
201         *            if hasChildren is called and the node has children, it will
202         *            return true, otherwise false.
203         *            If hasParent is called and the node has a parent, it will
204         *            return true, otherwise false.
205         *            If isFull is called and the node has two children, it will
206         *            return true, otherwise false.
207         **/
208         bool hasChildren( ) const { return m_lchild || m_rchild; }
209         bool hasParent( ) const { return m_parent; }
210         bool isFull( ) const { return m_lchild && m_rchild; }
211 
212     protected:
213         friend class Tree<INFO_T>;
214         friend class ExpressionTree;
215 
216        /**
```

```
217         * @function  setParent( ), setLeftChild( ), setRightChild( )
218         * @abstract  sets the parent, left child and right child of the
219         *            particular node respectively
220         * @param     p, the node we want to set a certain family member of
221         * @return    void
222         * @post      The node now has a parent, a left child or a right child
223         *            respectively.
224         **/
225         void setParent( TreeNode<INFO_T> *p ) { m_parent =p; }
226         void setLeftChild( TreeNode<INFO_T> *p ) { m_lchild =p; }
227         void setRightChild( TreeNode<INFO_T> *p ) { m_rchild =p; }
228
229     private:
230         INFO_T m_info;
231         TreeNode<INFO_T> *m_parent;
232         TreeNode<INFO_T> *m_lchild;
233         TreeNode<INFO_T> *m_rchild;
234 };
235
236 /**
237 * @function  <<
238 * @abstract  the contents of the node are returned
239 * @param     out, in what format we want to get the contents
240 * @param     rhs, the node of which we want the contents
241 * @return    the contents of the node.
242 **/
243 template <class INFO_T> ostream &operator <<(ostream& out, const TreeNode<INFO_T> & r
244     out << rhs.info( );
245     return out;
246 }
247
248 #endif
```

6.5 TreeNodeIterator.h

```
1  /**
2   * TreeNodeIterator: Provides a set of iterators that follow the STL-standard
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    TreeNodeIterator.h
7   * @date    26-10-2014
8   **/
9
10 #include <iterator>
11 #include "TreeNode.h"
12
13 template <class INFO_T> class TreeNodeIterator
14                         : public std::iterator<std::forward_iterator_tag,
15                                                TreeNode<INFO_T>> {
16     public:
17         typedef TreeNode<INFO_T> node_t;
18
19        /**
```

```
20          * @function  TreeNodeIterator( )
21          * @abstract  (copy)constructor
22          * @pre       TreeNodeIterator is abstract and cannot be constructed
23          **/
24          TreeNodeIterator( node_t* ptr =0 ) : p( ptr ) { }
25          TreeNodeIterator( const TreeNodeIterator& it ) : p( it.p ) { }
26
27         /**
28          * @function  (in)equality operator overload
29          * @abstract  Test (in)equality for two TreeNodeIterators
30          * @param     rhs, right-hand side of the comparison
31          * @return    true if both iterators point to the same node (==)
32          *            false if both iterators point to the same node (!=)
33          **/
34          bool operator == (const TreeNodeIterator& rhs) { return p==rhs.p; }
35          bool operator != (const TreeNodeIterator& rhs) { return p!=rhs.p; }
36
37         /**
38          * @function  operator*( )
39          * @abstract  Cast operator to node_t reference
40          * @return    The value of the current node
41          * @pre       Must point to a valid node
42          **/
43          node_t& operator*( ) { return *p; }
44
45         /**
46          * @function  operator++( )
47          * @abstract  pre- and post increment operators
48          * @return    TreeNodeIterator that has iterated one step
49          **/
50          TreeNodeIterator &operator++( ) { next( ); return *this; }
51          TreeNodeIterator operator++( int )
52              { TreeNodeIterator tmp( *this ); operator++( ); return tmp; }
53      protected:
54
55         /**
56          * @function  next( ) //(pure virtual)
57          * @abstract  Implement this function to implement your own iterator
58          */
59          virtual bool next( ){ return false; }// =0;
60          node_t *p;
61  };
62
63  template <class INFO_T> class TreeNodeIterator_pre
64                          : public TreeNodeIterator<INFO_T> {
65      public:
66          typedef TreeNode<INFO_T> node_t;
67
68          TreeNodeIterator_pre( node_t* ptr =0 )
69              : TreeNodeIterator<INFO_T>( ptr ) { }
70          TreeNodeIterator_pre( const TreeNodeIterator<INFO_T>& it )
71              : TreeNodeIterator<INFO_T>( it ) { }
72          TreeNodeIterator_pre( const TreeNodeIterator_pre& it )
73              : TreeNodeIterator<INFO_T>( it.p ) { }
```

```
74
75          TreeNodeIterator_pre &operator++( ) { next( ); return *this; }
76          TreeNodeIterator_pre operator++( int )
77              { TreeNodeIterator_pre tmp( *this ); operator++( ); return tmp; }
78
79      protected:
80          using TreeNodeIterator<INFO_T>::p;
81
82         /**
83          * @function  next( )
84          * @abstract  Takes one step in pre-order traversal
85          * @return    returns true if such a step exists
86          */
87          bool next( ) {
88              if( !p )
89                  return false;
90              if( p->hasChildren( ) ) { // a possible child that can be the next
91                  p =p->leftChild( ) ? p->leftChild( ) : p->rightChild( );
92                  return true;
93              }
94              else if( p->hasParent( ) // we have a right brother
95                      && p->parent( )->rightChild( )
96                      && p->parent( )->rightChild( ) != p ) {
97                  p =p->parent( )->rightChild( );
98                  return true;
99              }
100             else if( p->hasParent( ) ) { // just a parent, thus we go up
101                 TreeNode<INFO_T> *tmp =p->parent( );
102                 while( tmp->parent( ) ) {
103                     if( tmp->parent( )->rightChild( )
104                             && tmp->parent( )->rightChild( ) != tmp ) {
105                         p =tmp->parent( )->rightChild( );
106                         return true;
107                     }
108                     tmp =tmp->parent( );
109                 }
110             }
111             // Nothing left
112             p =0;
113             return false;
114         }
115
116 };
117
118 template <class INFO_T> class TreeNodeIterator_in
119                         : public TreeNodeIterator<INFO_T>{
120     public:
121         typedef TreeNode<INFO_T> node_t;
122
123         TreeNodeIterator_in( node_t* ptr =0 )
124             : TreeNodeIterator<INFO_T>( ptr ) { }
125         TreeNodeIterator_in( const TreeNodeIterator<INFO_T>& it )
126             : TreeNodeIterator<INFO_T>( it ) { }
127         TreeNodeIterator_in( const TreeNodeIterator_in& it )
```

```
128             : TreeNodeIterator<INFO_T>( it.p ) { }
129
130         TreeNodeIterator_in &operator++( ) { next( ); return *this; }
131         TreeNodeIterator_in operator++( int )
132             { TreeNodeIterator_in tmp( *this ); operator++( ); return tmp; }
133
134     protected:
135         using TreeNodeIterator<INFO_T>::p;
136        /**
137         * @function  next( )
138         * @abstract  Takes one step in in-order traversal
139         * @return    returns true if such a step exists
140         */
141         bool next( ) {
142             if( p->rightChild( ) ) {
143                 p =p->rightChild( );
144                 while( p->leftChild( ) )
145                     p =p->leftChild( );
146                 return true;
147             }
148             else if( p->parent( ) && p->parent( )->leftChild( ) == p ) {
149                 p =p->parent( );
150                 return true;
151             } else if( p->parent( ) && p->parent( )->rightChild( ) == p ) {
152                 p =p->parent( );
153                 while( p->parent( ) && p == p->parent( )->rightChild( ) ) {
154                     p =p->parent( );
155                 }
156                 if( p )
157                     p =p->parent( );
158                 if( p )
159                     return true;
160                 else
161                     return false;
162             }
163             // Er is niks meer
164             p =0;
165             return false;
166         }
167 };
168
169 template <class INFO_T> class TreeNodeIterator_post
170                         : public TreeNodeIterator<INFO_T>{
171     public:
172         typedef TreeNode<INFO_T> node_t;
173
174         TreeNodeIterator_post( node_t* ptr =0 )
175             : TreeNodeIterator<INFO_T>( ptr ) { }
176         TreeNodeIterator_post( const TreeNodeIterator<INFO_T>& it )
177             : TreeNodeIterator<INFO_T>( it ) { }
178         TreeNodeIterator_post( const TreeNodeIterator_post& it )
179             : TreeNodeIterator<INFO_T>( it.p ) { }
180
181         TreeNodeIterator_post &operator++( ) { next( ); return *this; }
```

```
182         TreeNodeIterator_post operator++( int )
183             { TreeNodeIterator_post tmp( *this ); operator++( ); return tmp; }
184
185     protected:
186         using TreeNodeIterator<INFO_T>::p;
187        /**
188         * @function  next( )
189         * @abstract  Takes one step in post-order traversal
190         * @return    returns true if such a step exists
191         */
192         bool next( ) {
193
194             if( p->hasParent( ) // We have a right brother
195                     && p->parent( )->rightChild( )
196                     && p->parent( )->rightChild( ) != p ) {
197                 p =p->parent( )->rightChild( );
198                 while( p->leftChild( ) )
199                     p =p->leftChild( );
200                 return true;
201             } else if( p->parent( ) ) {
202                 p =p->parent( );
203                 return true;
204             }
205             // Nothing left
206             p =0;
207             return false;
208         }
209 };
```

6.6 SelfOrganizingTree.h

```
1  /**
2   * SelfOrganizingTree - Abstract base type inheriting from Tree
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    SelfOrganizingTree.h
7   * @date    3-11-2014
8   **/
9
10 #ifndef SELFORGANIZINGTREE_H
11 #define SELFORGANIZINGTREE_H
12
13 #include "BinarySearchTree.h"
14
15 template <class INFO_T> class SelfOrganizingTree : public BinarySearchTree<INFO_T> {
16     public:
17         typedef BSTNode<INFO_T> node_t;
18         typedef BinarySearchTree<INFO_T> S; // super class
19
20        /**
21         * @function  SelfOrganizingTree( ) : S( )
22         * @abstract  Constructor
23         **/
```

```
24          SelfOrganizingTree( ) : S( ) { }
25
26         /**
27          * @function  rotateLeft( ) and rotateRight( )
28          * @abstract  Performs a rotation with the given node as root of the
29          *            rotating subtree, either left of right.
30          *            The tree's root pointer will be updated if neccesary.
31          * @param     node, the node to rotate
32          * @pre       The node must be a node in this tree
33          * @post      The node may be be the new root of the tree
34          *            No nodes will be invalided and no new memory is
35          *            allocated. Iterators may become invalid.
36          **/
37          virtual node_t *rotateLeft( node_t * node ){
38              if( this->root( ) == node )
39                  return static_cast<node_t *>( S::m_root = node->rotateLeft( ) );
40              else
41                  return node->rotateLeft( );
42          }
43
44          virtual node_t *rotateRight( node_t * node ){
45              if( this->root( ) == node )
46                  return static_cast<node_t *>( S::m_root = node->rotateRight( ) );
47              else
48                  return node->rotateRight( );
49          }
50
51      private:
52
53  };
54
55
56  #endif
```

6.7 BinarySearchTree.h

```
1   /**
2    * BinarySearchTree - BST that inherits from Tree
3    *
4    * @author  Micky Faas (s1407937)
5    * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6    * @file    BinarySearchTree.h
7    * @date    3-11-2014
8    **/
9
10  #ifndef BINARYSEARCHTREE_H
11  #define BINARYSEARCHTREE_H
12
13  #include "Tree.h"
14  #include "BSTNode.h"
15
16  template <class INFO_T> class BinarySearchTree : public Tree<INFO_T> {
17      public:
18          typedef BSTNode<INFO_T> node_t;
```

```
19          typedef Tree<INFO_T> S; // super class
20
21          BinarySearchTree( ) : S( ) { }
22          BinarySearchTree( const BinarySearchTree& cpy ) : S( cpy ) { }
23
24          virtual ~BinarySearchTree( ) { }
25
26         /**
27          * @function  pushBack( )
28          * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
29          *            this function is semantically identical to insert()
30          * @param     info, the contents of the new node
31          **/
32          virtual node_t *pushBack( const INFO_T& info ) {
33              return insert( info );
34          }
35
36         /**
37          * @function  insert( )
38          * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
39          *            the exact location of the new node is determined
40          *            by the rules of the binary search tree.
41          * @param     info, the contents of the new node
42          * @param     parent, ignored
43          * @param     preferRight, ignored
44          * @param     replaceBehavior, ignored
45          * @return    returns a pointer to the inserted node
46          **/
47          virtual node_t* insert( const INFO_T& info,
48                                  TreeNode<INFO_T>* parent =0, // Ignored
49                                  bool preferRight =false,     // Ignored
50                                  int replaceBehavior =S::ABORT_ON_EXISTING ) { // Ignored
51              node_t *n =new node_t( );
52              return insertInto( info, n );
53          }
54
55         /**
56          * @function  replace( )
57          * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
58          *            replaces a given node or the root
59          *            the location of the replaced node may be different
60          *            due to the consistency of the binary search tree
61          * @param     info, the contents of the new node
62          * @param     node, node to be replaced
63          * @param     alignRight, ignored
64          * @param     replaceBehavior, ignored
65          * @return    returns a pointer to the new node
66          * @pre       node should be in this tree
67          * @post      replace() will delete and/or remove node.
68          *            if node is 0, it will take the root instead
69          **/
70          virtual node_t* replace( const INFO_T& info,
71                                   TreeNode<INFO_T>* node =0,
72                                   bool alignRight =false,
```

```
73                              int replaceBehavior =S::DELETE_EXISTING ) {
74          node_t *newnode;
75          if( !node )
76              node =S::m_root;
77          if( !node )
78              return pushBack( info );
79
80          bool swap =false;
81          // We can either just swap the new node with the old and remove
82          // the old, or we can remove the old and add the new node via
83          // pushBack(). This depends on the value of info
84          if( !node->hasChildren( ) ) {
85              swap =true;
86          }
87          else if( !(node->leftChild( )
88                  && node->leftChild( )->info( ) > info )
89                  && !(node->rightChild( )
90                  && node->rightChild( )->info( ) < info ) ) {
91              swap =true;
92          }
93          if( swap ) {
94              newnode =new node_t( info );
95              if( node == S::m_root )
96                  S::m_root =newnode;
97              node->swapWith( newnode );
98              delete node;
99          } else {
100             remove( node );
101             newnode =pushBack( info );
102
103         }
104         return newnode;
105     }
106
107     /**
108      * @function  remove( )
109      * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
110      *            removes a given node or the root and restores the
111      *            BST properties
112      * @param     node, node to be removed
113      * @pre       node should be in this tree
114      * @post      memory for node will be deallocated
115      **/
116     virtual void remove( TreeNode<INFO_T> *node ) {
117         node_t *n =static_cast<node_t*>( node );
118
119         while( n->isFull( ) ) {
120             // the difficult case
121             // we could take either left of right here
122             TreeNode<INFO_T> *temp;
123             temp =n->leftChild( );
124             while( temp->rightChild( ) ) {
125                 temp =temp->rightChild( );
126             }
```

```
127                 if( n == S::m_root )
128                     S::m_root =temp;
129                 n->swapWith( temp );
130             }
131 
132 
133             // Assume the above is fixed
134             while( n->hasChildren( ) ) {
135                 if( n->leftChild( ) ) {
136                     if( n == S::m_root )
137                         S::m_root =n->leftChild( );
138                     n->swapWith( n->leftChild( ) );
139                 }
140                 else {
141                     if( n == S::m_root )
142                         S::m_root =n->rightChild( );
143                     n->swapWith( n->rightChild( ) );
144                 }
145             }
146 
147             if( n->parent( ) && n->parent( )->leftChild( ) == n )
148                 static_cast<node_t*>( n->parent( ) )->setLeftChild( 0 );
149             else if( n->parent( ) && n->parent( )->rightChild( ) == n )
150                 static_cast<node_t*>( n->parent( ) )->setRightChild( 0 );
151             delete n;
152         }
153 
154         /**
155          * @function  find( )
156          * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
157          *            performs a binary search in a given (sub)tree
158          * @param     haystack, the subtree to search. Give 0 for the entire tree
159          * @param     needle, key/info-value to find
160          * @return    returns a pointer to node, if found
161          * @pre       haystack should be in this tree
162          * @post      may return 0
163          **/
164         virtual TreeNode<INFO_T>* find( TreeNode<INFO_T>* haystack,
165                                         const INFO_T& needle ) {
166             m_searchStepCounter =0;
167 
168             if( !haystack )
169                 haystack =S::m_root;
170             while( haystack && haystack->info( ) != needle ) {
171                 m_searchStepCounter++;
172                 if( haystack->info( ) > needle )
173                     haystack =haystack->leftChild( );
174                 else
175                     haystack =haystack->rightChild( );
176             }
177             if( !haystack )
178                 m_searchStepCounter =-1;
179             return haystack;
180         }
```

```
181
182         /**
183          * @function  lastSearchStepCount( )
184          * @abstract  gives the amount of steps needed to complete the most
185          *            recent call to find( )
186          * @return    positive amount of steps on a defined search result,
187          *            -1 on no search result
188          */
189          virtual int lastSearchStepCount( ) const {
190              return m_searchStepCounter;
191          }
192
193         /**
194          * @function     min( )
195          * @abstract     Returns the node with the least value in a binary search
196          *               tree. This is achieved through recursion.
197          * @param        node - the node from which we start looking
198          * @return       Eventually, at the end of the recursion, we return the
199          *               adress of the node with the smallest value.
200          * @post         The node with the smallest value is returned.
201          **/
202          node_t* min( node_t* node ) const {
203              return node->leftChild( ) ?
204                     min(static_cast<node_t*>( node->leftChild( ) ) ) : node;
205          }
206
207         /**
208          * @function     min( )
209          * @abstract     We call the function mentioned above and then
210          *               return the node with the least value in a binary search
211          *               tree.
212          * @return       We return the adress of the node with the smallest value.
213          * @post         The node with the smallest value is returned.
214          **/
215          node_t* min( ) const {
216              return min( static_cast<node_t*>( this->root( ) ) );
217          }
218
219         /**
220          * @function     max( )
221          * @abstract     Returns the node with the highest value in a binary
222          *               search tree. This is achieved through recursion.
223          * @param        node - the node from which we start looking
224          * @return       Eventually, at the end of the recursion, we return the
225          *               adress of the node with the highest value.
226          * @post         The node with the highest value is returned.
227          **/
228          node_t* max( node_t* node ) const  {
229              return node->rightChild( ) ?
230                     max(static_cast<node_t*>( node->rightChild( ) ) ) : node;
231          }
232
233         /**
234          * @function     max( )
```

```
235         * @abstract     We call the function mentioned above and then
236         *               return the node with the highest value in a binary
237         *               search tree.
238         * @return       We return the adress of the node with the highest value.
239         * @post         The node with the highest value is returned.
240         **/
241         node_t* max( ) const {
242             return max( static_cast<node_t*>( this->root( ) ) );
243         }
244 
245     protected:
246         /**
247         * @function  insertInto( )
248         * @abstract  Inserts new node into the tree following BST rules
249         *            Assumes that the memory for the node is already allocated
250         *            This function exists mainly because of derived classes
251         *            want to insert nodes of a derived type.
252         * @param     info, the contents of the new node
253         * @param     n, node pointer, should be already allocated
254         * @return    returns a pointer to the inserted node
255         **/
256         virtual node_t* insertInto( const INFO_T& info,
257                                     node_t* n ) { // Preallocated
258             n->info() =info;
259 
260             if( !S::m_root )
261                 S::m_root =n;
262             else {
263                 node_t *parent =0;
264                 node_t *sub =static_cast<node_t*>( S::m_root );
265                 do {
266                     if( *n < *sub ) {
267                         parent =sub;
268                         sub =static_cast<node_t*>( parent->leftChild( ) );
269                     }
270                     else {
271                         parent =sub;
272                         sub =static_cast<node_t*>( parent->rightChild( ) );
273                     }
274                 } while( sub );
275                 if( *n < *parent )
276                     parent->setLeftChild( n );
277                 else
278                     parent->setRightChild( n );
279                 n->setParent( parent );
280             }
281             return n;
282         }
283 
284         int m_searchStepCounter;
285 };
286 
287 #endif
```

6.8 BSTNode.h

```
1  /**
2   * BSTNode - Node atom for BinarySearchTree
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    BSTNode.h
7   * @date    3-11-2014
8   **/
9
10 #ifndef BSTNODE_H
11 #define BSTNODE_H
12
13 #include "TreeNode.h"
14
15 template <class INFO_T> class BinarySearchTree;
16
17 template <class INFO_T> class BSTNode : public TreeNode<INFO_T>
18 {
19     public:
20         typedef TreeNode<INFO_T> S; // super class
21
22         /**
23         * @function  BSTNode( )
24         * @abstract  Constructor, creates a node
25         * @param     info, the contents of a node
26         * @param     parent, the parent of the node
27         * @post      A node has been created.
28         **/
29         BSTNode( const INFO_T& info, BSTNode<INFO_T>* parent =0 )
30             : S( info, parent ) { }
31
32        /**
33         * @function  BSTNode( )
34         * @abstract  Constructor, creates a node
35         * @param     parent, the parent of the node
36         * @post      A node has been created.
37         **/
38         BSTNode( BSTNode<INFO_T>* parent =0 )
39             : S( (S)parent ) { }
40
41         // Idea: rotate this node left and return the node that comes in its place
42         BSTNode *rotateLeft( ) {
43
44             if( !this->rightChild( ) ) // Cannot rotate
45                 return this;
46
47             bool isLeftChild =this->parent( ) && this == this->parent( )->leftChild(
48
49             // new root of tree
50             BSTNode *newTop =static_cast<BSTNode *>(this->rightChild( ));
51             // new rightchild of the node that is rotated
52             BSTNode *newRight =static_cast<BSTNode *>(newTop->leftChild( ));
```

```
53              // the parent under which all of the magic is happening
54              BSTNode *topParent =static_cast<BSTNode *>(this->parent( ));
55
56              // We become left-child of our right-child
57              // newTop takes our place with our parent
58              newTop->setParent( topParent );
59              if( isLeftChild && topParent )
60                  topParent->setLeftChild( newTop );
61              else if( topParent )
62                  topParent->setRightChild( newTop );
63
64              newTop->setLeftChild( this );
65              this->setParent( newTop );
66
67              // We take the left-child of newTop as our right-child
68              this->setRightChild( newRight );
69              if( newRight )
70                  newRight->setParent( this );
71
72              return newTop;
73          }
74
75          // Idea: rotate this node right and return the node that comes in its place
76          BSTNode *rotateRight( ) {
77              if( !this->leftChild( ) ) // Cannot rotate
78                  return this;
79
80              bool isRightChild =this->parent( ) && this == this->parent( )->rightChild
81
82              // new root of tree
83              BSTNode *newTop =static_cast<BSTNode *>(this->leftChild( ));
84              // new leftchild of the node that is rotated
85              BSTNode *newLeft =static_cast<BSTNode *>(newTop->rightChild( ));
86              // the parent under which all of the magic is happening
87              BSTNode *topParent =static_cast<BSTNode *>(this->parent( ));
88
89              // We become left-child of our right-child
90              // newTop takes our place with our parent
91              newTop->setParent( topParent );
92              if( isRightChild && topParent )
93                  topParent->setRightChild( newTop );
94              else if( topParent )
95                  topParent->setLeftChild( newTop );
96
97              newTop->setRightChild( this );
98              this->setParent( newTop );
99
100             // We take the left-child of newTop as our right-child
101             this->setLeftChild( newLeft );
102             if( newLeft )
103                 newLeft->setParent( this );
104
105             return newTop;
106         }
```

```
107
108         bool operator <( const BSTNode<INFO_T> &rhs ) {
109             return S::info() < rhs.info();
110         }
111
112         bool operator <=( const BSTNode<INFO_T> &rhs ) {
113             return S::info() <= rhs.info();
114         }
115
116         bool operator >( const BSTNode<INFO_T> &rhs ) {
117             return S::info() > rhs.info();
118         }
119
120         bool operator >=( const BSTNode<INFO_T> &rhs ) {
121             return S::info() >= rhs.info();
122         }
123     protected:
124         friend class BinarySearchTree<INFO_T>;
125 };
126
127 #endif
```

6.9 AVLTree.h

```
1  /**
2   * AVLTree - AVL-SelfOrganizingTree that inherits from SelfOrganizingTree
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    AVLTree.h
7   * @date    9-12-2014
8   **/
9
10 #ifndef AVLTREE_H
11 #define AVLTREE_H
12
13 #include "SelfOrganizingTree.h"
14 #include "AVLNode.h"
15
16 template <class INFO_T> class AVLTree : public SelfOrganizingTree<INFO_T> {
17     public:
18         typedef AVLNode<INFO_T> node_t;
19         typedef SelfOrganizingTree<INFO_T> S; // super class
20
21         /**
22          * @function     AVLTree( )
23          * @abstract     constructor
24          * @post         An AVLTree is created
25          **/
26         AVLTree( ) : S( ) { }
27
28         /**
29          * @function     AVLTree( )
30          * @abstract     constructor
```

```
31          * @param        cpy
32          * @post         An AVLTree is created
33          **/
34          AVLTree( const AVLTree& cpy ) : S( cpy ) { }
35
36         /**
37          * @function     insert( )
38          * @abstract     A node with label 'info' is inserted into the tree and
39          *               put in the right place. A label may not appear twice in
40          *               a tree.
41          * @param        info - the label of the node
42          * @return       the node we inserted
43          * @post         The tree now contains a node with 'info'
44          **/
45          node_t* insert( const INFO_T& info,
46                          TreeNode<INFO_T>* parent =0, // Ignored
47                          bool preferRight =false,     // Ignored
48                          int replaceBehavior =0 ) { // Ignored
49              if( S::find( this->root( ), info ) )
50                  return 0;
51              node_t *node =new node_t( );
52              S::insertInto( info, node );
53              rebalance( node );
54              return node;
55          }
56
57         /**
58          * @function     remove( )
59          * @abstract     A node is removed in such a way that the properties of
60          *               an AVL tree remain intact.
61          * @param        node - the node we're going to remove
62          * @post         The node has breen removed, but the remaining tree still
63          *               contains all of its other nodes and still has all the
64          *               AVL properties.
65          **/
66          void remove( node_t* node ) {
67              // if it's a leaf
68              if( !node->leftChild( ) && !node->rightChild( ) )
69                  S::remove( node );
70              // internal node with kids
71              else {
72                  if( node->rightChild( ) ) {
73                      node =static_cast<node_t*>( S::replace(
74                            S::min(  static_cast<node_t*>(
75                            node->rightChild( ) ) )->info( ), node ) );
76                      removeMin( static_cast<node_t*>( node->rightChild( ) ) );
77                      node->setRightChild( node->rightChild( ));
78                  }
79                  else
80                      // just delete the node and replace it with its leftChild
81                      node->replace( node->leftChild( ) );
82              }
83          }
84
```

```
85      private:
86
87          /**
88           * @function     removeMin( )
89           * @abstract     Recursively we go through the tree to find the node with
90           *               the smallest value in the subtree with root node. Then we
91           *               restore the balance factors of all its parents.
92           * @param        node - the root of the subtree we're looking in
93           * @return       At the end of the recursion we return the parent of the
94           *               node with the smallest value. Then we go up the tree and
95           *               rebalance every parent from this upwards.
96           * @post         The node with the smallest value is deleted and every
97           *               node still has the correct balance factor.
98           **/
99           node_t* removeMin( node_t* node ) {
100              node_t* temp;
101              if( node->leftChild( ) )
102                  temp =removeMin( static_cast<node_t*>( node->leftChild( ) ) );
103              else {
104                  temp =static_cast<node_t*>( node->parent( ) );
105                  S::remove( node );
106              }
107              rebalance( temp );
108              return temp;
109          }
110
111          /**
112           * @function     removeMax( )
113           * @abstract     Recursively we go through the tree to find the node with
114           *               the highest value in the subtree with root node. Then we
115           *               restore the balance factors of all its parents.
116           * @param        node - the root of the subtree we're looking in
117           * @return       At the end of the recursion we return the parent of the
118           *               node with the highest value. Then we go up the tree and
119           *               rebalance every parent from this upwards.
120           * @post         The node with the highest value is deleted and every
121           *               node still has the correct balance factor.
122           **/
123           node_t* removeMax( node_t* node ) {
124              node_t* temp;
125              if( node->rightChild( ) )
126                  temp =removeMin( static_cast<node_t*>( node->rightChild( ) ) );
127              else {
128                  temp =static_cast<node_t*>( node->parent( ) );
129                  S::remove( node );
130              }
131              rebalance( temp );
132              return temp;
133          }
134
135          /**
136           * @function     rotateLeft( )
137           * @abstract     We rotate a node left and make sure all the internal
138           *               heights of the nodes are up to date.
```

```
139          * @param        node - the node we're going to rotate left
140          * @return       we return the node that is now at the top of this
141          *               particular subtree.
142          * @post         The node is rotated to the left and the heights are up
143          *               to date.
144          **/
145          node_t* rotateLeft( node_t* node ) {
146              node_t *temp =static_cast<node_t*>( S::rotateLeft( node ) );
147              temp->updateHeight( );
148              if( temp->leftChild( ) )
149                  static_cast<node_t *>( temp->leftChild( ) )->updateHeight( );
150              return temp;
151          }
152
153         /**
154          * @function     rotateRight( )
155          * @abstract     We rotate a node right and make sure all the internal
156          *               heights of the nodes are up to date.
157          * @param        node - the node we're going to rotate right
158          * @return       we return the node that is now at the top of this
159          *               particular subtree.
160          * @post         The node is rotated to the right and the heights are up
161          *               to date.
162          **/
163          node_t* rotateRight( node_t* node ) {
164              node_t* temp =static_cast<node_t*>( S::rotateRight( node ) );
165              temp->updateHeight( );
166              if( temp->rightChild( ) )
167                  static_cast<node_t*>( temp->rightChild( ) )->updateHeight( );
168              return temp;
169          }
170
171         /**
172          * @function     rebalance( )
173          * @abstract     The tree is rebalanced. We do the necessary rotations
174          *               from the bottom up to make sure the AVL properties are
175          *               still intact.
176          * @param        node - the node we're going to rebalance
177          * @post         The tree is now perfectly balanced.
178          **/
179          void rebalance( node_t* node ) {
180              node->updateHeight( );
181
182              node_t* temp =node;
183              while( temp->parent( ) ) {
184                  temp =static_cast<node_t*>( temp->parent( ) );
185                  temp->updateHeight( );
186                  // right subtree too deep
187                  if( temp->balanceFactor( ) == 2 ) {
188                      if( temp->rightChild( ) ) {
189                          if( static_cast<node_t*>( temp->rightChild( ) )
190                              ->balanceFactor( ) < 0 )
191                              this->rotateRight(
192                              static_cast<node_t*>( temp->rightChild( ) ) );
```

```
193                     }
194                     this->rotateLeft( temp );
195                 }
196                 // left subtree too deep
197                 else if( temp->balanceFactor( ) == -2 ) {
198                     if( temp->leftChild( ) ) {
199                         if( static_cast<node_t*>( temp->leftChild( ) )->
200                             balanceFactor( ) > 0 )
201                             this->rotateLeft(
202                             static_cast<node_t*>( temp->leftChild( ) ) );
203                     }
204                     this->rotateRight( temp );
205                 }
206             }
207         }
208 };
209
210 #endif
```

6.10 AVLNode.h

```
1  /**
2   * AVLNode - Node atom type for AVLTree
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    AVLNode.h
7   * @date    9-11-2014
8   **/
9
10 #ifndef AVLNODE_H
11 #define AVLNODE_H
12
13 #include "BSTNode.h"
14
15 template <class INFO_T> class AVLTree;
16
17 template <class INFO_T> class AVLNode : public BSTNode<INFO_T>
18 {
19     public:
20         typedef BSTNode<INFO_T> S; // super class
21
22         /**
23         * @function     AVLNode( )
24         * @abstract     Constructor, creates a node
25         * @param        info, the contents of a node
26         * @param        parent, the parent of the node
27         * @post         A node has been created.
28         **/
29         AVLNode( const INFO_T& info, AVLNode<INFO_T>* parent =0 )
30             : S( info, parent ) {
31         }
32
33        /**
```

```
34          * @function     AVLNode( )
35          * @abstract     Constructor, creates a node
36          * @param        parent, the parent of the node
37          * @post         A node has been created.
38          **/
39          AVLNode( AVLNode<INFO_T>* parent =0 )
40              : S( (S)parent ) {
41          }
42
43         /**
44          * @function     balanceFactor( )
45          * @abstract     we return the height of the rightchild subtracted with
46          *               the height of the left child. Because of the properties
47          *               of an AVLtree, this should never be less than -1 or more
48          *               than 1.
49          * @return       we return the difference between the height of the
50          *               rightchild and the leftchild.
51          * @post         The difference between the two child nodes is returned.
52          **/
53          int balanceFactor( ){
54              return static_cast<AVLNode *>( this->rightChild( ) )->getHeight( ) -
55                     static_cast<AVLNode *>( this->leftChild( ) )->getHeight( );
56          }
57
58         /**
59          * @function     updateHeight( )
60          * @abstract     we update the height of the node.
61          * @pre          The children of the node need to have the correct height.
62          * @post         The node now has the right height.
63          **/
64          void updateHeight( ) {
65              int lHeight =static_cast<AVLNode *>( this->leftChild( ) )
66                           ->getHeight( );
67              int rHeight =static_cast<AVLNode *>( this->rightChild( ) )
68                           ->getHeight( );
69
70              this->height =( 1 + ( ( lHeight > rHeight ) ? lHeight : rHeight ) );
71          }
72
73         /**
74          * @function     getHeight( )
75          * @abstract     we want to know the height of the node.
76          * @return       we return the height of the node.
77          * @post         The current height of the node is returned.
78          **/
79          int getHeight( ) {
80              return (this ? this->height : 0);
81          }
82
83          bool operator <( const AVLNode<INFO_T> &rhs ) {
84              return S::info() < rhs.info();
85          }
86
87          bool operator <=( const AVLNode<INFO_T> &rhs ) {
```

```
88              return S::info() <= rhs.info();
89          }
90
91          bool operator >( const AVLNode<INFO_T> &rhs ) {
92              return S::info() > rhs.info();
93          }
94
95          bool operator >=( const AVLNode<INFO_T> &rhs ) {
96              return S::info() >= rhs.info();
97          }
98
99      protected:
100         friend class AVLTree<INFO_T>;
101
102     private:
103         int height;
104 };
105
106
107 #endif
```

6.11 SplayTree.h

```
1  /**
2   * SplayTree - Splay-tree implementation
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    SplayTree.h
7   * @date    3-11-2014
8   **/
9
10 #ifndef SPLAYTREE_H
11 #define SPLAYTREE_H
12
13 #include "SelfOrganizingTree.h"
14
15 template <class INFO_T> class SplayTree : public SelfOrganizingTree<INFO_T> {
16     public:
17         typedef BSTNode<INFO_T> node_t;
18         typedef SelfOrganizingTree<INFO_T> S; // super class
19
20         SplayTree( ) : SelfOrganizingTree<INFO_T>( ) { }
21
22         SplayTree( const SplayTree& copy )
23             : SelfOrganizingTree<INFO_T>( copy ) { }
24
25         /**
26         * @function  insert( )
27         * @abstract  reimplemented virtual function from BinarySearchTree<>
28         *            the new node will always be the root
29         * @param     info, the contents of the new node
30         * @param     parent, ignored
31         * @param     preferRight, ignored
```

```
32          * @param     replaceBehavior, ignored
33          * @return    returns a pointer to the inserted node (root)
34          **/
35          virtual node_t* insert( const INFO_T& info,
36                                  TreeNode<INFO_T>* parent =0, // Ignored
37                                  bool preferRight =false,     // Ignored
38                                  int replaceBehavior =0 ) { // Ignored
39              return splay( S::insert( info, parent, preferRight ) );
40          }
41
42          /**
43          * @function  replace( )
44          * @abstract  reimplemented virtual function from BinarySearchTree<>
45          *            replaces a given node or the root
46          *            the resulting node will be propagated to location of the root
47          * @param     info, the contents of the new node
48          * @param     node, node to be replaced
49          * @param     alignRight, ignored
50          * @param     replaceBehavior, ignored
51          * @return    returns a pointer to the new node (=root)
52          * @pre       node should be in this tree
53          * @post      replace() will delete and/or remove node.
54          *            if node is 0, it will take the root instead
55          **/
56          virtual node_t* replace( const INFO_T& info,
57                                   TreeNode<INFO_T>* node =0,
58                                   bool alignRight =false,
59                                   int replaceBehavior =0 ) {
60              return splay( S::replace( info, node, alignRight ) );
61          }
62
63         /**
64          * @function  remove( )
65          * @abstract  reimplemented virtual function from BinarySearchTree<>
66          *            removes a given node or the root and restores the
67          *            BST properties. The node-to-be-removed will be spayed
68          *            before removal.
69          * @param     node, node to be removed
70          * @pre       node should be in this tree
71          * @post      memory for node will be deallocated
72          **/
73          virtual void remove( TreeNode<INFO_T> *node ) {
74              S::remove( splay( static_cast<node_t*>(node) ) );
75          }
76
77         /**
78          * @function  find( )
79          * @abstract  reimplemented virtual function from Tree<>
80          *            performs a binary search in a given (sub)tree
81          *            splays the node (if found) afterwards
82          * @param     haystack, the subtree to search. Give 0 for the entire tree
83          * @param     needle, key/info-value to find
84          * @return    returns a pointer to node, if found
85          * @pre       haystack should be in this tree
```

```
86          * @post      may return 0, the structure of the tree may change
87          **/
88          virtual TreeNode<INFO_T>* find( TreeNode<INFO_T>* haystack,
89                                          const INFO_T& needle ) {
90              return splay( static_cast<node_t*>( S::find( haystack, needle ) ) );
91          }
92
93         /**
94          * @function  splay( )
95          * @abstract  Performs the splay operation on a given node.
96          *            'Splay' means a certain amount of rotations in order
97          *            to make the given node be the root of the tree while
98          *            maintaining the binary search tree properties.
99          * @param     node, the node to splay
100         * @pre       The node must be a node in this tree
101         * @post      The node will be the new root of the tree
102         *            No nodes will be invalided and no new memory is
103         *            allocated. Iterators may become invalid.
104         **/
105         node_t* splay( node_t* node ) {
106
107             enum MODE {
108                 LEFT =0x1, RIGHT =0x2,
109                 PLEFT =0x4, PRIGHT =0x8 };
110
111             // Can't splay the root (or null)
112             if( !node || S::m_root == node )
113                 return node;
114
115             node_t *p =static_cast<node_t*>( node->parent( ) );
116             int mode;
117
118             while( p != S::m_root ) {
119                 if( p->leftChild( ) == node )
120                     mode =RIGHT;
121                 else
122                     mode =LEFT;
123
124                 assert( p->parent( ) != nullptr );
125
126                 // Node's grandparent
127                 node_t* g =static_cast<node_t*>( p->parent( ) );
128
129                 if( g->leftChild( ) == p )
130                     mode |= PRIGHT;
131                 else
132                     mode |= PLEFT;
133
134                 // True if either mode is LEFT|PLEFT or RIGHT|PRIGHT
135                 if( (mode >> 2) == (mode & 0x3 ) ) {
136                     // the 'zig-zig' step
137                     // first rotate g-p then p-node
138
139                     if( mode & PLEFT )
```

```
140                         this->rotateLeft( g );
141                     else
142                         this->rotateRight( g );
143 
144                     if( mode & LEFT )
145                         this->rotateLeft( p );
146                     else
147                         this->rotateRight( p );
148                 }
149                 else {
150                     // the 'zig-zag' step
151                     // first rotate p-node then g-p
152 
153                     if( mode & LEFT )
154                         this->rotateLeft( p );
155                     else
156                         this->rotateRight( p );
157 
158                     if( mode & PLEFT )
159                         this->rotateLeft( g );
160                     else
161                         this->rotateRight( g );
162                 }
163 
164                 // perhaps we're done already...
165                 if( node == this->root( ) )
166                     return node;
167                 else
168                     p =static_cast<node_t*>( node->parent( ) );
169             }
170 
171             // The 'zig-step': parent of node is the root
172 
173             if( p->leftChild( ) == node )
174                 this->rotateRight( p );
175             else
176                 this->rotateLeft( p );
177 
178             return node;
179         }
180 };
181 
182 #endif
```

6.12 Treap.h

```
1  /**
2   * Treap - Treap that inherits from SelfOrganizingTree
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    Treap.h
7   * @date    9-12-2014
8   **/
```

```
9
10 #ifndef TREAP_H
11 #define TREAP_H
12
13 #include "SelfOrganizingTree.h"
14 #include "TreapNode.h"
15
16 template <class INFO_T> class Treap : public SelfOrganizingTree<INFO_T> {
17     public:
18         typedef TreapNode<INFO_T> node_t;
19         typedef SelfOrganizingTree<INFO_T> S; // super class
20
21         /**
22          * @function     Treap( )
23          * @abstract     constructor
24          * @post         A Treap is created
25          **/
26          Treap( int randomRange =100 ) : S( ) {
27              random =randomRange;
28              srand( time( NULL ) );
29          }
30
31         /**
32          * @function     Treap( )
33          * @abstract     constructor
34          * @param        cpy
35          * @post         A Treap is created
36          **/
37          Treap( const Treap& cpy, int randomRange =100 ) : S( cpy ) {
38              random =randomRange;
39              srand( time( NULL ) );
40          }
41
42         /**
43          * @function     insert( )
44          * @abstract     A node with label 'info' is inserted into the tree and
45          *               put in the right place. A label may not appear twice in
46          *               a tree.
47          * @param        info - the label of the node
48          * @return       the node we inserted
49          * @post         The tree now contains a node with 'info'
50          **/
51          node_t* insert( const INFO_T& info,
52                          TreeNode<INFO_T>* parent =0, // Ignored
53                          bool preferRight =false,     // Ignored
54                          int replaceBehavior =0 ) { // Ignored
55              // Prevent duplicates
56
57              if( S::find( this->root( ), info ) )
58                  return 0;
59              node_t *node =new node_t( );
60              S::insertInto( info, node );
61              node->priority =rand( ) % random + 1;
62              rebalance( node );
```

```
63
64              return node;
65          }
66
67          /**
68           * @function     remove( )
69           * @abstract     the node provided with the parameter is deleted from the
70           *               tree by rotating it down until it becomes a leaf or has
71           *               only one child. In the first  case it's just deleted,
72           *               in the second it's replaced by its subtree.
73           * @param        node - the node to be deleted
74           * @post         The node is deleted from the tree which still retains
75           *               the Treap properties.
76           **/
77          void remove( node_t* node ) {
78              node_t *temp = node;
79              // rotating it down until the condition no longer applies.
80              while( temp->leftChild( ) && temp->rightChild( ) )
81              {
82                  if( static_cast<node_t*>( temp->rightChild( ) )->priority >
83                      static_cast<node_t*>( temp->leftChild( ) )->priority )
84                      this->rotateLeft( temp );
85                  else
86                      this->rotateRight( temp );
87              }
88              // if it's a leaf
89              if( !temp->leftChild( ) && !temp->rightChild( ) )
90                  S::remove( temp );
91              // if it only has a right child
92              else if( !temp->leftChild( ) )
93                  temp->replace( static_cast<node_t*>( temp->rightChild( ) ) );
94              // if it only has a left child
95              else if( !node->rightChild( ) )
96                  temp->replace( static_cast<node_t*>( temp->leftChild( ) ) );
97          }
98
99      private:
100         int random;
101
102         /**
103          * @function     rebalance( )
104          * @abstract     The tree is rebalanced. We do the necessary rotations
105          *               from the bottom up to make sure the Treap properties are
106          *               still intact.
107          * @param        info - the label of the node
108          * @return       the node we inserted
109          * @post         The tree is now perfectly balanced.
110          **/
111         void rebalance( node_t* node ) {
112             if( !node )
113                 return;
114             node_t* temp =node;
115             int myPriority =node->priority;
116             while( temp->parent( ) &&
```

```
117                     myPriority >
118                     static_cast<node_t*>( temp->parent( ) )->priority ) {
119                 temp =static_cast<node_t*>( temp->parent( ) );
120                 if( temp->leftChild( ) == node )
121                     this->rotateRight( temp );
122                 else
123                     this->rotateLeft( temp );
124             }
125         }
126
127 };
128
129 #endif
```

6.13 TreapNode.h

```
1  /**
2   * TreapNode - Node atom type for Treap
3   *
4   * @author  Micky Faas (s1407937)
5   * @author  Lisette de Schipper (s1396250)
6   * @file    TreapNode.h
7   * @date    9-11-2014
8   **/
9
10 #ifndef TREAPNODE_H
11 #define TREAPNODE_H
12
13 #include "BSTNode.h"
14
15 template <class INFO_T> class Treap;
16
17 template <class INFO_T> class TreapNode : public BSTNode<INFO_T>
18 {
19     public:
20         typedef BSTNode<INFO_T> S; // super class
21
22         /**
23         * @function     TreapNode( )
24         * @abstract     Constructor, creates a node
25         * @param        info, the contents of a node
26         * @param        parent, the parent of the node
27         * @post         A node has been created.
28         **/
29         TreapNode( const INFO_T& info, TreapNode<INFO_T>* parent =0 )
30             : S( info, parent ), priority( 0 ) {
31         }
32
33        /**
34         * @function     TreapNode( )
35         * @abstract     Constructor, creates a node
36         * @param        parent, the parent of the node
37         * @post         A node has been created.
38         **/
```

```
39          TreapNode( TreapNode<INFO_T>* parent =0 )
40              : S( (S)parent ), priority( 0 ) {
41          }
42
43          /**
44          * @function  replace( )
45          * @abstract  Replaces the node with another node in the tree
46          * @param     n, the node we replace the node with, this one gets deleted
47          * @pre       both this node and n must be in the same parent tree
48          * @post      The node will be replaced and n will be deleted.
49          **/
50          void replace( TreapNode<INFO_T>* n ) {
51              priority = n->priority;
52              this->S::replace( n );
53          }
54
55          bool operator <( const TreapNode<INFO_T> &rhs ) {
56              return S::info() < rhs.info();
57          }
58
59          bool operator <=( const TreapNode<INFO_T> &rhs ) {
60              return S::info() <= rhs.info();
61          }
62
63          bool operator >( const TreapNode<INFO_T> &rhs ) {
64              return S::info() > rhs.info();
65          }
66
67          bool operator >=( const TreapNode<INFO_T> &rhs ) {
68              return S::info() >= rhs.info();
69          }
70
71          int priority;
72
73      protected:
74          friend class Treap<INFO_T>;
75  };
76
77
78  #endif
```