

TARTU ÜLIKOOL
MATEMAATIKA-INFORMAATIKA TEADUSKOND
Arvutiteaduse Instituut
Infotehnoloogia eriala

Kaarel Jõgeva

Vernier' CO₂ sensor LEGO MINDSTORMS NXT robotile

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Juhendaja: Anne VILLEMS
Kaasjuhendaja: Taavi DUVIN

Autor: "....." juuni 2011

Juhendaja: "....." juuni 2011

Lubada kaitsmisele

Professor: "....." juuni 2011

TARTU 2011

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Süsinikdioksiid ehk CO ₂	6
1.1 Tähtsamad füüsilised omadused	6
1.2 Esinemine atmosfääris	7
2 Vernier' CO ₂ andur	9
2.1 Anduri lühitutvustus	9
2.2 Anduri tööpõhimõte.....	10
2.3 Anduri kasutamine.....	11
2.3.1 Anduri kasutamine LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas ..	12
2.3.2 Anduri konfiguratsiooni seadistamine	15
2.4 Oluline jälgida	17
3 Ülesanded	18
3.1 Ülesanne 1	19
3.1.1 Lahendus	20
3.1.2 Võimalikud probleemid.....	20
3.2 Ülesanne 2	21
3.2.1 Lahendus	22
3.2.2 Võimalikud probleemid.....	23
3.3 Ülesanne 3	24
3.3.1 Lahendus	25
3.3.2 Võimalikud probleemid.....	26
4 Kokkuvõte	27
5 Vernier' CO ₂ sensor for LEGO MINDSTORMS NXT robot.....	28
5.1 Abstract.....	28
6 Kasutatud kirjandus ja materjalid.....	29

7	Lisad	31
7.1	Lisa 1 – CD ülesannete lahenduste ja vajalike failidega	31
7.2	Lisa 2 - Anduri tõlgitud spetsifikatsioon	31

Sissejuhatus

Reaalainete olemuse tõttu on paratamatult vaja nende omandamiseks teada teooriat. Selle valdamiseks on tarvilik raamatute ja kooliõpikute läbitöötamine, mis enamikule seostub valemite ning teoreemide pähe õppimisega. Kindlasti ei saa väita, et nimetatud tegevus oleks halb või ebavajalik, sest kuidas muidu inimene areneks. Negatiivse aspektina võib välja tuua tõsiasi, et mida vähem õpitut elulistes olukordades rakendatakse, seda kiiremini ja suurema tõenäosusega see lihtsalt ununeb. Seega võivad pikas perspektiivis keskmisele kooliõpilasele reaalainetes omandatud teadmised ebavajalikud tunduda. Suhtumise muutmise üheks võimaluseks on lõbusa elemendi lisamine õppeprotsessi.

Üheks heaks võimaluseks on kasutada LEGO poolt toodetud MINDSTORMS NXT platvormi. Tegemist on LEGO poolt toodetud robotikakomplektiga, mille eesmärgiks on robotid ning nende programmeerimine teha lihtsaks ja kättesaadavaks. Elementaarsemateks kasutusjuhtudeks ei ole vaja omada mingit tehnoloogilist tausta. Küll aga võib kaasahaarav kogemus tekitada selle omandamise vastu huvi.

Alates 2007 aasta kevadest tegutseb Eestis Kooliroboti projekt, mille eesmärgiks on suurendada huvi inseneriteaduse vastu. [1] Peamiseks abivahendiks on eelmainitud LEGO robotid, mida kasutatakse tundides ning robotikaringides. Standardses roboti komplektis sisalduvad lisaks LEGO klotsidele ka NXT kontrollid ning erinevad sensorid. Lisaks on saadaval ka teiste firmade poolt välja töötatud andureid. Just nende abil saab robotile hõlpsasti täiendavat funktsionaalsust lisada, kuna võimaldavad roboti teadlikkust teda ümbritseva keskkonna suhtes tõsta.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks ongi ühe sellise anduri tutvustamine ning selle LEGO tarkvaras kasutusele võtmine. Lisaks luuakse õppematerjal anduriga seotud praktiliste ülesannete näol. Töös kasutatakse firma Vernier' poolt toodetud CO₂ andurit, mis võimaldab mõõta õhus oleva süsihappegaasi kontsentratsiooni. Lisaks sensori tutvustusele sisaldub töös ka üldine taustinfo süsinikdioksiidist ning ülesanded. Töö on jaotatud kolmeks suuremaks peatükiks:

1. Süsinikdioksiid ehk CO₂ – kirjeldatakse üldisi CO₂ füüsikalisi omadusi ja antakse ülevaade süsinikdioksiidi esinemisest atmosfääris.
2. Vernier' CO₂ andur – tutvustatakse andurit lähemalt, seletatakse selle tööpõhimõtet ning antakse juhised LEGO tarkvaraga kasutamiseks.

3. Ülesanded – lahendamiseks esitatakse kolm näidisülesannet. Ülesannete püstitusele on lisatud ka näpunäiteid ja näidislahendus koos lähtekoodiga.

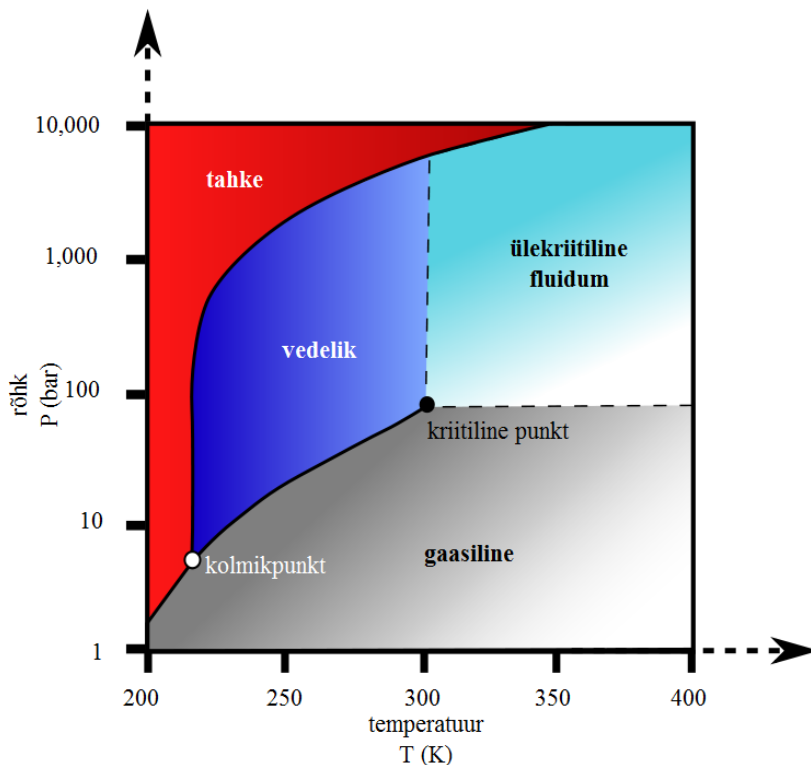
Bakalaureusetöö koostamisel on silmas peetud erinevas vanuses lugejaid. Töö tekst on koostatud võimalikult lihtsalt ja üheselt mõistetavalt.

1 Süsinikdioksiid ehk CO₂

Töös kasutatud anduriga töötamisel tuleb kasuks teadmine süsihappegaasi olemusest ja levikust. Esimene peatükk annab põgusa ülevaate aine füüsikalistest omadustest ning levikust atmosfääris.

1.1 Tähtsamad füüsikalised omadused

Süsinikdioksiid on keemiline ühend, mille molekul koosneb kahest hapniku aatomist, mis on kovalentselt ehk ühiste elektronpaaride abil seotud ühe süsiniku aatomiga. Molekul on aine väikseim osake, milleks on vastavat ainet võimalik mehhaaniliselt jaotada ja mis säilitab selle aine keemilised omadused [2]. Joonis 1 illustreerib süsinikdioksiidi olekuid erinevate rõhkude ja temperatuuride juures



Joonis 1. Süsinikdioksiidi olekudiagramm [3]

Normaaltemperatuuril (20 °C ehk 293,15 K) ja -rõhul (1 atm ehk 1.01325 bar) on CO₂ gaasilises olekus. Nendel tingimustel on süsinikdioksiidi tihedusega umbes 1.98 kg/m³. Õhust on see ligikaudu poolteist korda tihedam. Seetõttu on ka CO₂ kontsentratsioon ruumi alumistes kihtides suurem. Süsinikdioksiid ei saa olla veeldunud olekus rõhul alla 5,1 atmosfääri (520kPa). Järelikult madalamal rõhul on CO₂ ainult gaasilises või tahkes olekus. Eelmainitud omadusest tulenevalt toimub temperatuuril üle -78 °C huvitav nähtus, kus aine

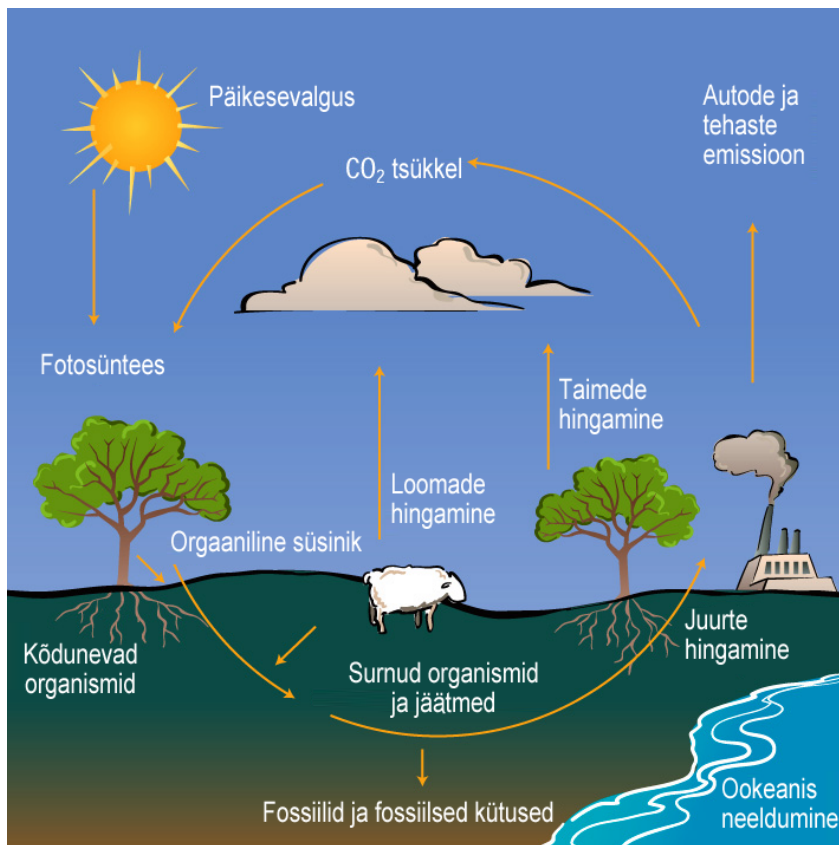
läheb tahkest olekust otse gaasilisse seisu. Tahket süsinikdioksiidi tuntakse ka kuiva jää nime all. Süsihappegaasi normaaltemperatuuri juures vedelas olekus säilitamiseks, tuleb seda hoida rõhul üle 56 atm. [4]

Eelneva lõiguga on kaetud peamised süsinikdioksiidi füüsikalised omadused. Järgnevalt kirjeldatakse CO₂ esinemist tema kõige tavapärasemas gaasilises olekus. See on ka antud töö jaoks kõige olulisem olek, kuna kasutatav andur suudab mõõta aine kontsentratsiooni ainult sellisel kujul.

1.2 Esinemine atmosfääris

Süsihappegaasi kontsentratsioon Maa atmosfääris on umbes 390 osakest miljoni osakese kohta (*particles per million - ppm*). See tähendab, et kui võtta atmosfäärist proov, milles on kokku miljon erinevate ainete molekule, siis nendest 390 on CO₂ molekulid. Kogu atmosfääri mahust moodustab süsinikdioksiid umbes 0,0387%. Niivõrd väikese osakaalu tõttu peetakse seda jääkgaasiks. Süsihappegaasi kontsentratsioonil on välja kujunenud aastane tsükkel, muutudes 3-9 ppm mahust vastavalt põhjapoolkera taimestiku kasvuperioodile. Mida rohkem on rohelist, seda suurem on fotosünteesi käigus tarbitav CO₂ kogus. Hetke trendi järgi tõuseb kontsentratsioon aastas ligikaudu 1,9 ppm. Vaatamata väikesele hulgale, mängib süsihappegaas suurt rolli kliima kujundamisel tänu sellele, et temas neeldub infrapuna (*infrared - IR*) valgus. [5]

Süsinikku leidub igal pool tänu süsiniku tsüklile, mis on illustreeritud Joonis 2 abil. See on biokeemiline tsükkel, mille käigus süsinikku vahetatakse erinevate keskkondade vahel [6; 7].



Joonis 2 Süsiniku tsükkel Maa atmosfääris [7]

Süsinikdioksiidi tarbivad taimed fotosünteesi käigus suhkru tootmiseks. Seda tarvitatakse kas hapniku transportimiseks sisemistesse kudedesse või orgaanilise toorme tootmiseks. Hingamise käigus eritavad taimed süsihappegaasi. See kehtib ka kõikide loomade, seente ja mikroorganismide puhul, kes sõltuvad toitumisel otseselt või kaudselt taimedest. CO₂ tekib organismide hingamise kõrval ka kaasproduktina fossiilsete kütuste või taimse massi põletamisel. Lisaks sellele leiavad looduses aset igapäevaselt ka muud keemilised protsessid, mille käigus atmosfääri süsihappegaasi paiskub. Näiteks vulkaanipursked. Kõik see kokku moodustab niinimetatud süsiniku tsükli, mis kirjeldab süsiniku ringlust maal. [5; 7]

Käesolev peatükk tutvustas tähtsamaid süsinikdioksiidi füüsikalisi omadusi ning atmosfääris esinemist. Ülesannete lahendamiseks on lisaks teoreetilisele taustale vaja ka andurit tunda. Järgnev peatükk kirjeldab Vernier' CO₂ sensorit ning annab juhiseid selle kasutamiseks.

2 Vernier' CO₂ andur

Teine peatükk tutvustab lugejale töös kasutatud firma Vernier' poolt toodetud CO₂ andurit lähemalt. Peatükk on liigendatud omakorda neljaks alampeatükiks. Esmalt tutvustatakse andurit üldiselt ning selgitatakse selle tööpõhimõtet. Järgneb praktilisem pool, kus käsitletakse sensori kasutamist ning seadistusfailide muutmist.

2.1 Anduri lühitutvustus

Käesolevas töös on kasutatud uuemat Vernier'i CO₂ andurit, mis on müügil olnud alates 2007 aasta jaanuarist. Anduriga tuleb kaasa 250 milliliitri suurune plastikust pudel (Joonis 4). Selle abil saab väiksemate objektidega katsetades eemaldada väliskeskkonna faktoreid. Andur sobitub pudeli suuga täpselt, mille tõttu on katsekeskkond hästi kaitstud õhu vahetumise eest. Tänu stabiilsele keskkonnale on võimalik läbi viia katseid näiteks väikeste elusorganismidega. Lisaks on pakendis ka anduri infoleht. Kuna tegemist ei ole LEGO originaalanduriga, siis on juhtploki külge ühendamiseks vajalik Vernier' NXT vaheadapter, mis on koos anduriga näha Joonis 3 peal.



Joonis 3. Vernier' CO₂ andur ja Vernier' NXT adapter



Joonis 4. Komplektis olev 250ml katsepudel

Töös kasutatud CO₂ andur on mõeldud koos töötama mitme erineva riistvaralise lahendusega. Lisaks Vernier' enda toodetele saab andurit hõlpsasti kasutada ka osade kolmanda osapoole seadmetega. Andur on ametlikult toetatud järgnevatel platvormidel:

- Vernier' LabQuest ® (eraldiseisvalt või koos arvutiga) ,
- Vernier' LabQuest ® Mini arvutiga,
- Vernier' LabPro ® arvuti,
- TI graafikuid toetava kalkulaatori või Palm® pihuarvutiga,
- Vernier' Go! ® Link,
- Vernier' SensorDAQ®,
- CBL 2™ [8].

Andur ise on umbes 15 cm pikk. Läbimõõt on ülemises otsas 3,6 cm ja alumises otsas 2,6 cm. Sensoril on lüliti, mille abil saab valida mõõtepiirkonnaks kas 0 – 10 000 ppm või 0 – 100 000 ppm. Väiksema süsihappegaasi kontsentratsiooni puhul (alla 10 000 ppm) tuleks kasutada madalamat piirkonda, kuna seal on anduri mõõtetulemused täpsemad [8].

Mõistmaks paremini anduri erinevate tööpiirkondade eesmärki, on järgmises peatükis sensori töö põhimõtte täpsemalt lahti seletatud.

2.2 Anduri töö põhimõtte

Käesolev peatükk põhineb peamiselt Vernier' CO₂ sensori kasutusjuhendil [8]. Kui info allikana on kasutatud muud materjali, siis on see eraldi viitega välja toodud.

Andur kasutab oma töös ära süsinikdioksiidi omadust neelata infrapuna valgust. See on elektromagnetiline radiatsioon, mille lainepikkus on nähtava valguse omast pikem. Seega inimsilm seda ei näe, küll aga eristab seda näiteks fotokaamera (vaata Joonis 5). [9]



Joonis 5. Kaamera abil nähtav infrapuna valgus [10]

Mõõtmistulemuse leidmiseks kasutab andur oma otstes olevaid elektroonikakomponente. Ühes otsas on infrapuna valgust kiirgav diod (*light emitting diode - LED*) ning teises infrapuna sensor. Kui infrapuna (*infrared - IR*) valgus langeb sensorile, siis selle tulemusena tõuseb seal temperatuur. Nähtuse põhjustab asjaolu, et kiirgus neeldub lisaks süsihappegaasile ka anduri materjalis. Neeldumise käigus muundub kiirguses olev energia anduris soojuseks. Sensori ehituse tõttu põhjustab temperatuuri muutumine kontaktidel elektrilise pinget [11; 12]. Tekkinud pinget kajastabki mõõtetulemuse väärtust ning see väljastatakse teistele seadmetele töötlemiseks.

Mida suurem hulk süsinikdioksiidi anduri mõõtekambris on, seda rohkem neeldub IR kiirgus CO₂ molekulides. Seetõttu väheneb ka infrapuna kiirguse kogus, mis jõuab diodilt Vernier' anduri otsas asuvale sensorile. Tänu väiksemale IR kiirgusele on sensoril temperatuuri tõus väiksem, mille tõttu väheneb ka väljastatav pinget. Vastavalt valitud tööpiirkonnale muudetakse IR anduri tundlikkust, et väljundpinget oleks mõlemal juhul vahemikus 0 kuni 4 V.

2.3 Anduri kasutamine

Kuna töös kasutatav andur ei ole vaikumisi LEGO MINDSTORMS NXT platvormi jaoks toetatud, pole selle esimest korda tööle seadmine triviaalne. Anduri kasutamise juhised on jagatud kaheks. Esimene osa keskendub tarkvaralisele poolele ja annab juhiseid anduri LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas kasutamiseks. Tegemist on LEGO poolt

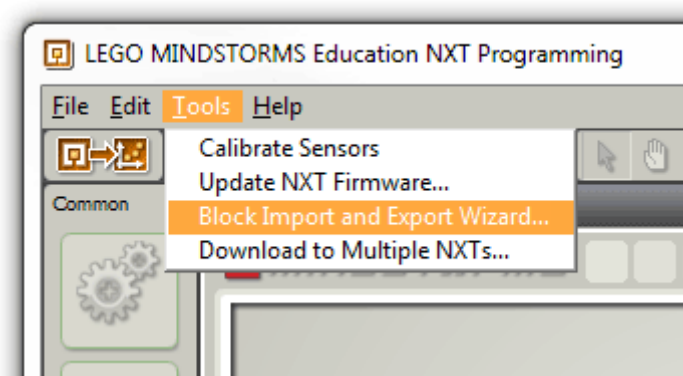
pakutava visuaalprogrammeerimise keskkonnaga, kus roboti tegevuste programmeerimiseks kasutatakse graafilisi omavahel ühendatud plokikesi. Iga plokk tähistab teatud tegevust ning nende järjestamisel saab robotile ette kirjutada nii-öelda käitumisjuhised.

Teises osas kirjeldatakse anduri ploki häälestamist. Kuna anduri tarkvarale pole Vernier' poolt NXT Programming keskkonna jaoks tuge lisatud, siis vaikimisi on võimalik näha ainult töötlemata väärtust (ingl. k. *raw count*). See on arv nullist 1023ni, mis iseloomustab mõõdetud süsihappegaasi kontsentratsiooni anduri mõõtekambris. Kuvamaks mõõtmistulemusi õigetes ühikutes, tuleb seadistada andurite kalibratsioonifaili.

2.3.1 Anduri kasutamine LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas

Kuna töö tutvustab firma Vernier' andurit, siis puudub NXT keskkonna standard installatsioonis sensori kohta info. Seadistamise esimeseks sammuks on tootjafirma kodulehelt [13] alla laadida andurite infofailid. Antud fail on kättesaadav ka Lisa 1 CD plaadilt.

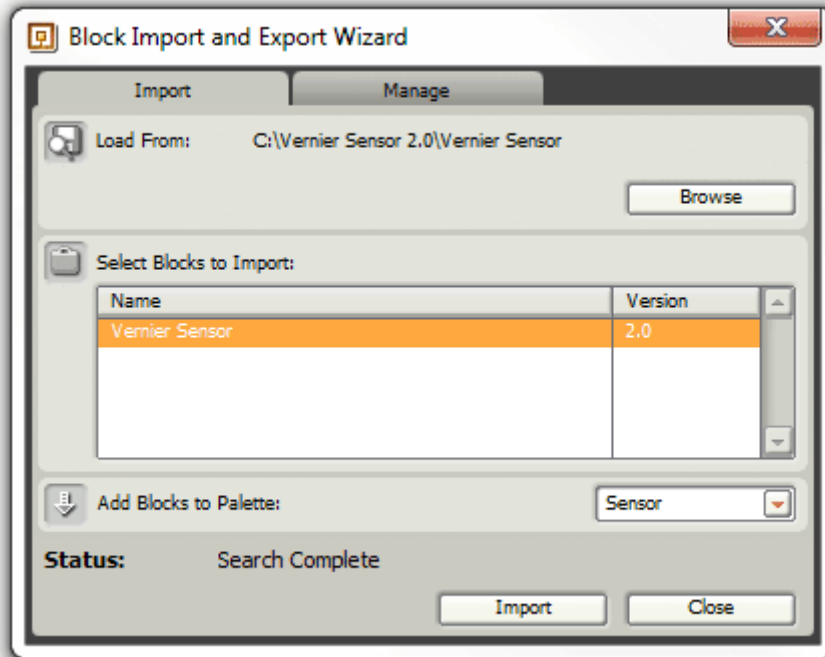
Pärast allalaetud arhiivi lahti pakkimist tuleks käivitada LEGO MINDSTORMS NXT keskkond ja avada menüüribalt *Tools* → *Block Import And Export Wizard...* (vaata Joonis 6).



Joonis 6. Anduri importimise dialoogi avamine

Sealt avaneval dialoogil (vaata Joonis 7. CO2 sensori importimine) tuleb teha järgmised sammud:

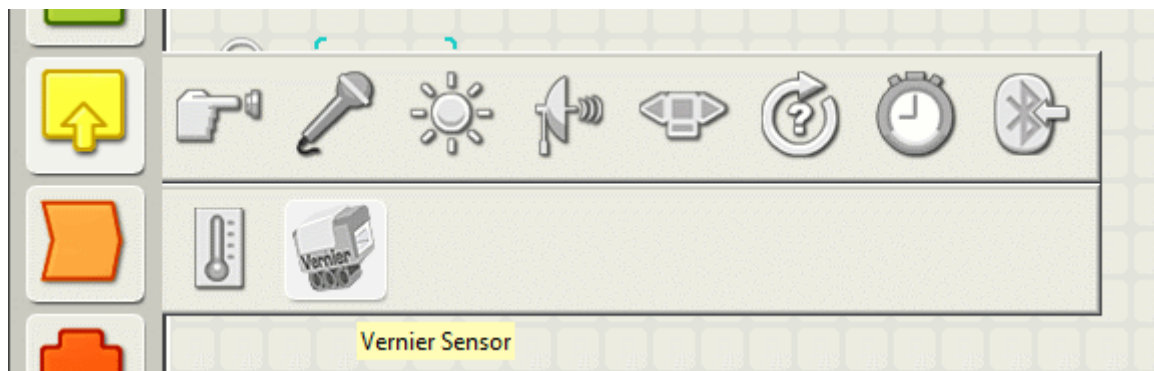
1. Klõpsata *Browse* ja sirvida alla laetud arhiivist lahti pakitud kaustani
2. Märkida loendist *Vernier Sensor* rida aktiivseks
3. Valida rippmenüüst, et andurid lisataks *Sensor* paletile.
4. Klõpsata nupul *Import*
5. Impordi lõppedes klõpsata nupul *Close*



Joonis 7. CO₂ sensori importimine

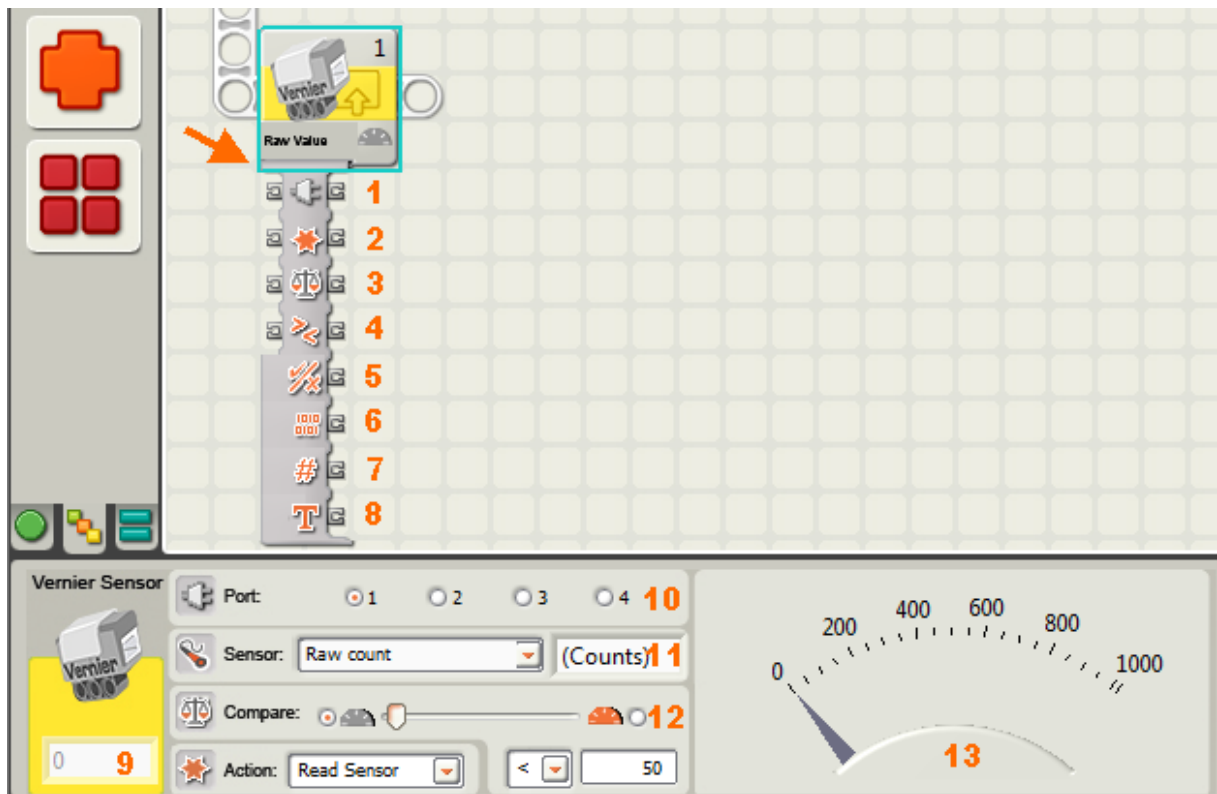
Anduriploki eemaldamise funktsionaalsus on leitav *Manage* saki alt. See on kasulik näiteks siis, kui plokk imporditi valesse paletti.

Kui plokk on imporditud, saab seda kasutada programmi skeemides. Selleks tuleb valida programmiakna vasakul äärel *Complete* palett. Seal asuvast andurite tööriistasahtlist saab *Vernier Sensor* ploki lohistada programmi skeemile (vaata Joonis 8).



Joonis 8. Vernier Sensor andurite tööriistasahtlis

Kui andur on skeemile lisatud, saab selle erinevaid omadusi muuta. Joonis 9 peal on välja toodud erinevad näitude tähendused ja ühenduspesade võimalused. Ühenduspesad on eelkõige mõeldud ploki võimalikult dünaamiliseks kasutamiseks. Näiteks vajadusel saab mõne muu sensori mõõtetulemusest tuletada CO₂ anduri omadust. Pärast ploki lisamist ei ole selle all näha ühenduspesasid 1-9. Need saab nähtavale tuua, kui klikkida noolega viidatud joonel.



Joonis 9. Vernier' CO2 anduri kasutamine programmis

Avanevas valikus on järgmised ühenduspesad:

1. anduri pordi number, millesse CO₂ sensor ühendatud on;
2. teostatav toiming;
3. väärtus, mille suhtes mõõtmistulemust võrreldakse;
4. tulemuse võrdluse tüüp („suurem kui“ või „väiksem kui“);
5. võrdluse tulemuse tõeväärtus;
6. analoogsignaali digiteerimise tulemus (0 - 1023);
7. sensori mõõtetulemus numbrina;
8. sensori mõõtetulemus tekstina kujul „<mõõtetulemus> <mõõtühi>“.

Lisaks on ka võimalik lihtsamate kasutusjuhtude puhul andurit staatiliselt seadistada. Klõpsates skeemis Vernier' andurile, avaneb ekraanil alaosas seadistuspaneel. Seal on nähtavad järgmised infoväljad ja seadistused:

9. anduri mõõtetulemus arvulisel kujul;
10. anduri pordi number, millesse CO₂ sensor ühendatud on;
11. valitud sensor ja selle mõõtühi;
12. väärtus, mille suhtes mõõtmistulemust võrreldakse ning võrdluse tüüp;
13. analoogseier mõõtmistulemusega.

Nagu selgub, siis andurite nimekirjas (Joonis 9, väli nr 11) CO₂ sensorit loetletud pole. Järgmine peatükk kirjeldab, kuidas see sinna lisada.

2.3.2 Anduri konfiguratsiooni seadistamine

Vaikimisi on CO₂ anduri mõõtetulemust võimalik mõistlikult vaadata ainult *Raw count* sensori kaudu. Selle mõõtetulemuseks on väärtus, mis saadakse anduri analoogsisendi digiteerimisest. Protsessi paremaks mõistmiseks, on järgnevas lõigus see põgusalt lahti seletatud.

LEGO RJ12 pistiku esimene (valge) juhe töötab sensorite puhul analoogsisendina. Sisendsignaal, mis peab olema pingevahemikus 0 – 5 volti, saadetakse iga kolme millisekundi tagant sisendist edasi 10-bit täpsusega analoog-digitaal konverterile (*ADC – analog-to-digital converter*). ADC on elektroonikakomponent, mis teisendab pideva analoogsignaali diskreetsele digitaalsele kujule. Selle tulemusena saadakse sensori töötlemata mõõtetulemuseks täisarv vahemikus 0 kuni 1023, mis vastab 0 – 5 V pingevahemikule. Mida suuremat pinget sensor välja annab, seda suurem on ka kuvatav mõõtetulemus. [14]

Selleks, et saada mugavalt loetavat tulemust, tuleb eespool viidatud Vernier'i plokki modifitseerida. Kuna ploki lähtekoodi peamised komponendid on parooliga kaitstud, on kõige lihtsam muuta mõnda olemasolevat anduri kirjeldust. Järgnev info põhineb dokumendil „Adjusting Calibrations.pdf“, mis on leitav Lisa 1 failist „vernier_sensor_block_2.0.zip“.

Kõik firma Vernier' andurid (välja arvatud temperatuuriandurid), mis ühilduvad LEGO NXT adapteriga kasutavad lineaarset kalibratsiooni. See tähendab, et anduri väärtused moodustavad graafikul sirge. Sensori mõõteväärtus leitakse valemist $Lugem = \frac{\text{Diskreetne väärtus} * Tõus + Vabaliige}{100000}$. Sisuliselt on see sirge võrrand $y = mx + b$, mis on läbi jagatud arvuga 100 000. Jagamine on tingitud sellest, et LEGO MINDSTORMS NXT keskkonnas ei ole komakohtadega arvutused täpsed. Seega toimuvad kõik arvutuskäigud 100 000 korda suuremate täisarvudega ning komakohtadega arv tekib alles viimasel sammul.

Et andurist enam-vähem täpseid mõõtetulemusi saada, on tarvis andurile sirge võrrandit. Õnneks on see lihtsasti kahe punkti kaudu leitav. Graafiku y-telg tähistab kontsentratsiooni, mille ühikuks on ppm. Anduri mõõtmistulemus, ehk arv vahemikus 0 kuni 1023 märgitakse graafiku x-teljel. Kuna värskes õhus on CO₂ kontsentratsioon umbes 390 ppm, siis selle järgi saab määrata esimese punkti. Selle leidmiseks saab kasutada anduriga kaasa tulnud katsepuudelit. Tagamaks anumas täielik õhuvahetus, tuleks see ääreni veega täita ning

mõõdetavas keskkonnas tühjaks valada. Samuti tuleks üleliigsed veepiisad välja raputada, kuna infrapuna kiirgus neeldub ka veeaurus. Täiendavaks abinõuks võib värskes õhus ära tuulutada ka anduri mõõtmiskambri ning selle katsepudelisse sisestada.

Esimese sirge punkti leidmisel *Raw count* sensorit kasutades, hüples tulemus 32 ja 90 ühiku vahel. See on tingitud anduri suurest voolutarbest, mis põhjustab kõrgema lugemi, kui IR allikas voolu ei tarbi. Seega korrektne tulemus on 32 ühikut ja üheks sirge punktiks on A(32;390). Anduri spetsifikatsioonis on öeldud, et maksimaalne väljundpinge on 4 V. Järelikult vastab madalas tööpiirkonnas anduri maksimaalsele näidule ADC väljund $x_{max} = \frac{1024 \text{ ühikut}}{5V} * 4V = 819,2 \text{ ühikut}$. Siit saame leida sirge määramiseks teise punkti B(819,2;10000). Nende kahe punkti järgi saame leida tõusu $m = \frac{390-10000}{32-819,2} = \frac{-9610}{-787,2} \approx 12,20782$ ja vabaliikme $b = 390 - m * 32 \approx -0,6504$. Arvestades sensori lugemi valemis ka jagamistehet, saame tõusu väärtuseks 1220782 ja vabaliikmeks -6504. Selguse huvides olgu öeldud, et antud kalibratsioon kehtib madalama mõõtmispiirkonna jaoks ning on ligikaudne. Täpsema lõpptulemuse saamiseks tuleks kasutada juba vastavat eritehnikat.

Allolevas tabelis on ära toodud muudatused, mis on vaja sisse viia kalibratsioonifaili. Need muudatused kehtivad madalama mõõtepiirkonna jaoks. Kõrge mõõtepiirkonna kalibreerimiseks tuleb läbi viia analoogne töö nagu eelnevalt kirjeldatud.

Tabel 1. Kalibratsioonifailis tehtavad muudatused

Veeru nimi	Olemasolev väärtus	Uus väärtus
Number	43	43
Sensor Name	Raw count	CO2 10k
Intercept	0	-6504
Slope	100000	1220782
Units	Counts	ppm
Round	0	0
Short	Count	CO2
Min	0	0

Max	1024	10000
Installed	1	1

Tuleb meeles pidada, et kalibreerimisfailis parameetrite muutmise korral peab LEGO MINDSTORMS NXT Programmis anduriploki uuesti importima.

2.4 Oluline jälgida

Enne reaalse töö juurde asumist on oluline tutvuda anduri eripäradega. See on vajalik, et tagada usaldusväärsed mõõtetulemused ning vältida anduri kahjustamist. Alltoodud info pärineb anduri kasutusjuhendist [8].

Andur on mõeldud süsinikdioksiidi taseme mõõtmiseks ainult gaasilises keskkonnas. Seega on rangelt keelatud anduri vedelikku asetamine. Pärast anduri sisselülitamist hakkab näit aeglaselt 0 ppm lähedalt näitu korrigeerima. Andur saavutab töövalmiduse 90 sekundi jooksul. Enne seda võivad mõõtmistulemused ebakorrektsed olla.

Samuti tasub mõõtmiste juures arvestada kasutatava mõõtmismeetodi eripäradega. Kuigi andur värskendab väärtust iga sekundi tagant, võiks kasutatav mõõtesagedus olla 4 sekundit üheks mõõtmiseks. See on tingitud gaaside difusioonist, ehk segunemisest, mis on aeglane protsess.

Andur ei suuda teostada mõõtmisi madalamas ja kõrgemas tööpiirkonnas kui CO₂ molekulide kontsentratsioon on vastavalt üle 10 000 või 100 000 ppm. Kui andur on seadistatud töötama madalamas piirkonnas ja mõõtmiste tulemused on 10 000 ppm lähedal või võrdsed sellega, siis võib proovida minna üle kõrgemale tööpiirkonnale.

Mõõtmisi tuleks teostada keskkonnas, kus andur on kaitstud otsese päikesevalguse eest. Intensiivse valguse korral pääseb anduri töökeskkonda välise päritoluga infrapuna kiirgust. See neeldub töökeskkonnas olevas süsihappegaasis ning mõjutab mõõtmistulemusi. Samuti peaks vältima mõõtmiste ajal temperatuurikõikumisi. See põhjustab anduris oleva infrapuna sensori väljundpinge muutuse. Enamasti on keskkonna temperatuuri muutumisest tingitud mõõtmisvead alla 1% mõõtepiirkonna ulatusest. Tootjapoolselt on andur kalibreeritud töötama vahemikus 20 – 30 °C.

3 Ülesanded

Kolmandas peatükis on anduriga tutvumiseks kolm ülesannet, mis on esitatud raskusastme kasvamise järjekorras. Ülesannete struktuuri on hoitud võimalikult sarnasena, et loodut oleks lihtsam õppematerjalide koostamisel kasutada. Iga ülesande juures on välja toodud selle raskusaste, eesmärk, ülesande täitmiseks vajalikud komponendid, püstitus ning lahenduse idee.

Eraldi lehel on esitatud ekraanipilt LEGO MINDSTORMS NXT keskkonnas koostatud ühest võimalikust näidislahendusest ja lahendamiseks ehitatud robotist. Samuti on välja toodud potentsiaalsed probleemkohad. Ülesannete lahendusfailid eelmainitud keskkonnale on saadaval CD-l, mille sisu kirjelduse leiab peatükist Lisa 1 – ülesannete lahenduste ja vajalike failidega. Seetõttu on ülesande lahenduse kirjalik pool üldise mõttekäigu seletus, mitte samm-sammult juhend samasuguse programmi koostamiseks. Samuti on programmi abiinfo loogiliselt koostatud ning seetõttu pole plokkide kasutamist detailideni lahti kirjeldatud. Iseseisvalt lahendusteni jõudmine aitab täiendavaid seoseid luua ja tegevusi paremini kinnistada.

3.1 Ülesanne 1

Tase: Kerge

Eesmärk: Ülesande peamine eesmärk on Vernier' CO₂ anduri seadistamine LEGO keskkonna jaoks ja korrektne ühendamine LEGO robotiga. Samuti saab praktilise kogemuse gaasilisest keskkonnast näidise võtmiseks.

Ülesande täitmiseks vajalik: Ülesande edukaks täitmiseks vajalikud komponendid on:

- LEGO MINDSTORMS NXT tarkvaraga arvuti,
- LEGO MINDSTORMS NXT kontrolleri,
- USB kaabel,
- Vernier' CO₂ andur,
- 250ml katsepudel,
- LEGO RJ12 juhe,
- Vernier' LEGO adapter,
- Vesi katsepudeli täitmiseks.

Ülesande püstitus: Mati sai teada, et inimeste poolt väljahingatavas õhus on rohkem süsihappegaasi kui sissehingatavas õhus. Seega juhul kui halvasti ventileeritud ruumis on palju rahvast, hakkab aja möödudes seal CO₂ kontsentratsioon tõusma. Aita Matil teada saada, mitu korda on toas olevas õhus süsihappegaasi rohkem, kui õues.

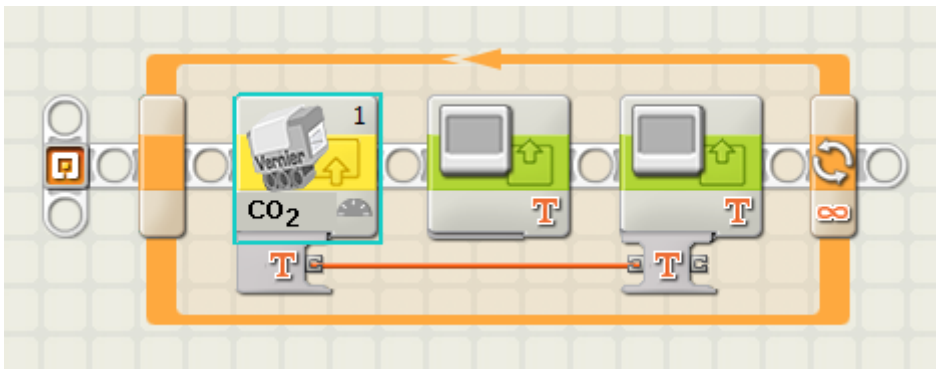
Lahenduse idee: Tuleks mõõta välis- ja siseõhu süsihappegaasi sisaldust. Välisõhu puhul on abiks mõõtepuudeli kasutamine. Suhe näitab seda, mitu korda üks väärtus teisest suurem on. Robot võiks anduri näidu ekraanil välja kuvada, siis ei pea see mõõtmise ajal arvutiga ühendatud olema. Vahelduvate mõõtmistulemuste korral tuleb arvestada väiksem tulemus õigeaks.

3.1.1 Lahendus

Alljärgnevalt on kirjeldatud ühte võimalikku lahendust püstitatud probleemile.

Esimese asjana on vaja korrektselt kaablid ühendada. LEGO kontrolleriist tuleb juhe ühendada Vernier' NXT adapterisse, mille külge on ühendatud CO₂ sensor.

LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas on vaja luua lihtne tsükkel, mille sees loetakse anduri väärtus ja kuvatakse see ekraanile. Väärtuse lugemiseks tuleb *Sensors* paletilt valida *Vernier Sensor* ning see tsükli sisse lohistada. Anduri seadistuspaneelilt tuleb valida anduriks „CO₂ 10k“ ning valida pordi number, kuhu andur ühendatud on. Näidislahenduses (vaata Joonis 10) on kasutatud kahte ekraanile kirjutamise plokki. Esimene neist väljastab teksti „Kontsentratsioon“ ja teine kirjutab välja anduri näidu koos ühikuga.



Joonis 10. Ülesande 1 näidislahendus

Programmi jooksutamisel robotis kuvatakse ekraanil mõõtmistulemust, kuni kasutaja programmi LEGO kontrolleri oranži nupu vajutusega seiskab.

Välisõhus süsinikdioksiidi taseme mõõtmiseks on kaks võimalust. Kõige lihtsam on töötava robotiga (pilti vaata Joonis 12) õue minna ning oodata kuni näit stabiliseerub. Teiseks variandiks on järgida peatükis 2.3.2 Anduri konfiguratsiooni seadistamine kirjeldatud meetodit esimese punkti leidmiseks. Siseruumis võiks jälgida seda, et andurile ei paistaks mõõtmise ajal otsene päikesevalgus. Lõppvastuse jaoks tuleb ruumis olev CO₂ kontsentratsioon jagada välisõhu omaga.

3.1.2 Võimalikud probleemid

Õpilasi võib segadusse ajada kahe väärtuse vahel hüplev näit. Sel juhul tuleks seletada, et õigeiks väärtuseks tuleb valida madalam näit. Olukorra tekkepõhjus on selgitatud peatükis 2.3.2 Anduri konfiguratsiooni seadistamine.

3.2 Ülesanne 2

Tase: Keskmine

Eesmärk: Õppida kasutama andmete logimise ja taimeri plokki ning mõõtetulemuste visualiseerimist LEGO MINDSTORMS NXT Data Logging keskkonnas.

Ülesande täitmiseks vajalik: Ülesande edukaks täitmiseks vajalikud komponendid on:

- LEGO MINDSTORMS NXT tarkvaraga arvuti,
- LEGO MINDSTORMS NXT kontrolleri,
- USB kaabel,
- Vernier' CO2 andur,
- 250ml katsepudel,
- LEGO RJ12 juhe,
- Vernier' LEGO adapter,
- kuivatatud herned,
- anum ja vesi herneste leotamiseks.

Ülesande püstitus: Miku teab, et fotosünteesi käigus tarbivad taimed süsihappegaasi ja toodavad hapnikku. Mati ütles, et vastupidine protsess on ka võimalik, kuid Miku ei usu seda. Aita Matil tõestada, et kui kuivatatud herneid umbes 5 tundi leiges vees leotada, siis hakkavad nad süsihappegaasi tootma.

Valmista katse ette ja koosta programm, mis logib anduri näidud LEGO NXT kontrollerrisse. Andmete salvestamise kestvuse muutmiseks peaks olema ainult üks koht. Et katset paremini jälgida, kuva kulunud aeg ning anduri hetke näit ekraanil. Pärast katse lõppu kasuta illustreerimiseks Data Logging keskkonda protsessi graafiku koostamiseks.

Lahenduse idee: Andmete salvestamise saab käivitada ja peatada *Advanced* paletil olevate Start Datalog ja Stop Datalog plokkidega. Programmi andmete logimise kestvust saab kõige mugavamalt määrata tsükli lõpetamistingimuse ja taimeri ploki abil. Data Logging keskkonna avamiseks on NXT keskkonna peamenüü all nupp, mis on Joonis 6 peal nähtav. Ühendades LEGO NXT kontrolleri arvutiga on võimalik Data Logging keskkonnas salvestatud logifail otse kontrolleri pealt avada.



Joonis 12. Teise ülesande näidisrobot

Näidisprogrammi väljund on ülaltoodud pildil roboti ekraanil näha. Suurem versioon antud pildist on lisatud ka kaasasolevale CD-le. Samuti on seal ka kirjeldatud näidisprogrammi lähtekood „Lahendus 2.rbt“ failis.

3.2.2 Võimalikud probleemid

Ülesande püstituses on öeldud, et tuleks kuvada logimise aega. Selleks on ette nähtud taimeri plokk, mis kuvab aega millisekundites. Sekundite saamiseks tuleb väljund lihtsalt tuhandega läbi jagada. Logimise aeg tuleb valida piisavalt pikk, et vältida olukorda, kus andmete kogumine lõpeb enne, kui andur üles on soojenenud. Alternatiiviks on enne programmi käivitamist oodata kuni andur on töövalmis. Vältimaks liialt suurt logifaili, peaks Start Logging plokil määrama mõõtmiste vaheliseks ajaks näiteks 5 sekundit. Samuti tuleks tsüklisse lisada vähemalt sekundiline ootamise plokk, et vältida ekraani kiiret värskendamist, mille tõttu tekst värelema hakkab.

3.3 Ülesanne 3

Tase: Raske

Eesmärk: Teha autonoomne robot, mis oskab ruumis navigeerida. Selle käigus tutvuda LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas matemaatika, muutujate ja loogika plokkidega. Ülesande loomust tuleb vajadus kontrollida samaaegselt mitut mootorit ning õppida sujuvalt suunda vahetama.

Ülesande täitmiseks vajalik: Ülesande edukaks täitmiseks vajalikud komponendid on:

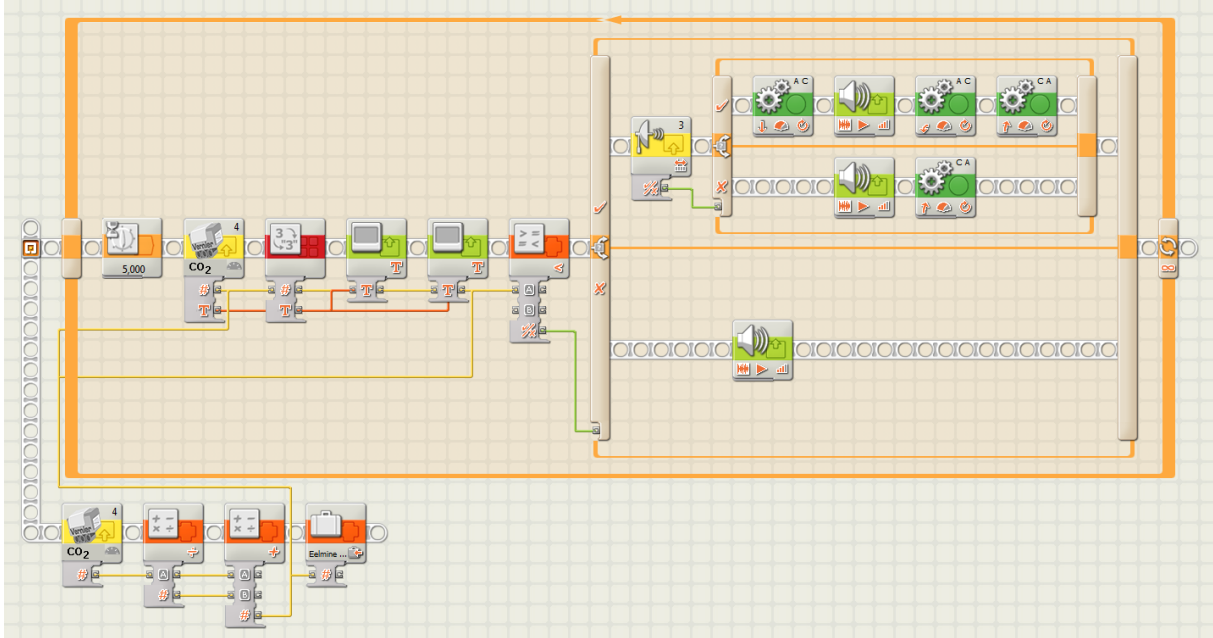
- LEGO MINDSTORMS NXT tarkvaraga arvuti,
- LEGO MINDSTORMS NXT kontrolleri,
- USB kaabel,
- LEGO klotse
- 2 mootorit,
- ultraheliandur,
- Vernier' CO₂ andur,
- Vernier' LEGO adapter,

Ülesande püstitus: Kaevandustes on oht, et hapniku tase langeb madalale ja süsihappegaasi kontsentratsioon muutub nii kõrgeks, et inimene kaotab teadvuse. Kuna Mati tahab suvel vanadesse koobastesse uitama minna peab ta selle ohuga arvestama. Aita kokku panna robot, mis süsihappegaasi kontsentratsiooni tõusmisel teatud hulga võrra hakkaks värskeimat õhku otsima. Robot peab oskama takistusi vältida, et mitte vastu seina sõita. Kui CO₂ tase on mõõtmise ajal käivitamisel määratud piirist madalam, peab robot sellest helisignaali märku andma. Niiviisi ei jää Mati teadmatusse, kui robotil aku tühjaks peaks saama.

Lahenduse idee: Enne programmi tsükli käivitumist tuleks muutuja (ingl. k. *variable*) plokki salvestada keskkonna CO₂ tasemest soovitud hulga võrra (näiteks 10%) suurem anduri näit. Tsükli sees saab kontrollida, kas hetke tase on kõrgem programmi käivitamisel määratud tasemest. Vastavalt võrdluse tulemusele saab ultraheli anduri väljundi järgi otsustada kuidas robot liikuma peaks.

3.3.1 Lahendus

Lahendus koosneb kahest harust: esialgne häälestus ja programmi peamine tsükkel. Järgneva kirjelduse parema jälgitavuse tagamiseks on lisatud Joonis 13 programmi ekraanipildiga.



Joonis 13. Kolmanda ülesande näidislahenduse ekraanipilt

Esimese tegevusena mõõdetakse ära keskkonnas leiduva CO₂ molekulide kontsentratsioon. Leitud väärtusele liidetakse 10% juurde, et vältida olukorda, kus iga väikse kõikumise peale robot ringi hakkaks sõitma.

Teine haru on programmi peatsükkel, mille eesmärgiks on võrrelda anduri mõõtetulemust talletatud väärtusega. Vastavalt võrdluse tulemusena valitakse tingimusploki haru. Tõeses harus, ehk kui hetke tase on baastasemest kõrgem, mõõdetakse ultrahelisensoriga võimalik eesoleva takistuse kaugust robotist. Juhul kui see on lähemal, kui sõitmisel läbitav distants, keerab robot paremale ja liigub selles suunas edasi. Vastasel juhul jätkatakse sõitu praeguses suunas. Kui süsinikdioksiidi tase on ettenähtud vahemikus annab robot helisignaali oma tööst märku. Lisaks nendele tegevustele on tsükklisse lisatud ka 5 sekundiline viivitus, sest gaaside difusioon on aeglane protsess.

Eelnevalt kirjeldatud programmi lähtekood on detailide uurimiseks lisatud kaasasolevale CD-le nimega „Lahendus 3.rbt“. Allpool on toodud pilt lahenduseks koostatud robotist (vaata Joonis 14).



Joonis 14. Kolmanda ülesande näidisrobot

Suurem versioon pildist on lisatud kaasasolevale CD plaadile.

3.3.2 Võimalikud probleemid

Tuleb arvestada ajaga, mis kulub anduril üles soojenemiseks (90 sekundit). Kui seda ignoreerida, siis võib juhtuda, et esialgne väärtus on väga madal ja robot jääbki ringi sõitma. Lisaks tuleb eksperimenteerida ultraheli sensori mõõtekauguse ja edasi liikumise suhtega. See tagab selle, et robot pidevalt vastu seina ei sõidaks. Näidisprogrammi koostades ja testides tundus optimaalne liikumise pikkus 3 mootori täispöret ja takistuste kontrollimine 45cm kauguselt. Robot võib otse sõites kergelt ühele poole kalduda. Korrigeerimiseks tuleb liikumise ploki suunda ühe ühiku võrra kaldumise vastassuunda nihutada.

4 Kokkuvõte

Reaalainete ja inseneriteaduste vastu huvi suurendamiseks on sobilik kasutada LEGO MINDSTORMS NXT robotit. Tänu erinevatele anduritele on seda võimalik kasutada väga erinevate õpieesmärkide täitmiseks. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli tutvustada Vernier' poolt toodetud CO₂ sensorit. Samuti tuli see kasutusele võtta LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas ning luua anduriga seotud ülesannete näol uut õppematerjali.

Esimeses peatükis tutvustati süsihappegaasi kui aine üldiseid füüsikalisi omadusi. Samuti räägiti süsinikdioksiidi esinemisest atmosfääris. Peamiseks eesmärgiks oli tagada töö lugejatele elementaarsed teadmised töös kasutatud anduri poolt mõõdetavast nähtusest.

Töö teises peatükis tutvustati lähemalt Vernier' CO₂ andurit. Lisaks üldisele kirjeldusele peatuti ka sensori töö põhimõttel. LEGO tarkvaras anduri kasutusele võtmisel selgus, et see ei ole tootjafirma Vernier' poolt ette nähtud NXT platvormil töötama. Selgus, et andur on sellegi poolest võimalik robotiga tööle saada. Ainsaks miinuseks oli mugavalt loetava mõõtmistulemuse puudumine. Selle puudujäägi kõrvaldamiseks on kirja pandud juhend, mille järgi on võimalik anduri tarkvara konfigurereida nii, et robotile väljastataks korrektne mõõtmistulemus.

Viimases osas on püstitatud kolm ülesannet. Igal ülesandel on ära märgitud selle raskusaste, eesmärk, ülesande täitmiseks vajalikud asjad, püstitus ning lahenduse idee. Lisaks on igale ülesandele pakutud näidislahendus LEGO MINDSTORMS NXT Programming keskkonnas koos lähtekoodiga, mis on kättesaadav Lisa 1 CD-l. Välja on toodud ka võimalikud probleemid, mis ülesande täitmisel tekkida võivad.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et püstitatud eesmärgid said täidetud. Kirjutamisel järgiti võimalikult täpselt ette antud struktuuri ja vormindust, et valminud tööd saaks kasutada õppematerjali kogumiku koostamisel.

Autori nägemuse järgi on bakalaureusetööd võimalik edasi arendada kahel viisil. Lisaks NXT graafilisele programmeerimiskeskkonnale saab uurida anduri kasutusvõimalusi alternatiivsetes programmeerimise keskkondades. Samuti on põhjalikumalt uurimata Vernier' anduri tarkvara modifitseerimise võimalused, et lisada andurile parem tugi NXT keskkonna jaoks.

5 Vernier' CO₂ sensor for LEGO MINDSTORMS NXT robot

Bachelor Thesis

Kaarel Jõgeva

5.1 Abstract

The main goal for this bachelor thesis is to introduce Vernier CO₂ sensor, explore its usage possibilities in LEGO MINDSTORMS NXT software and create new learning materials.

This thesis consists of three main parts. The first chapter gives a general overview about physical properties of carbon dioxide. The existence and cycle of carbon dioxide in Earth's atmosphere is also explained briefly.

In the second part of the thesis, the main focus is on the sensor. An overview of the sensor is given. Also, to better understand the internal workings of the sensor, the process of obtaining a measurement is explained. The process of importing and configuring the sensor for the NXT software is documented in greater detail as it is not that straightforward.

Third and final part consists of three exercises which are presented in the order of difficulty. Every exercise has an example solution with additional comments about possible problems that might occur. Source code of the example solutions is included on the CD in appendix.

6 Kasutatud kirjandus ja materjalid

1. Projektist. *Kooliroboti projekt*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 31. 05 2011. a.]
<http://www.robootika.ee/lego/projekt/index.php/projektist/>.
2. Molekul. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. 04 2011. a.]
<http://et.wikipedia.org/wiki/Molekul>.
3. **Ben Finney, Mark Jacobs**. File:Carbon dioxide pressure-temperature phase diagram.svg. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 16. 04 2011. a.]
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram.svg.
4. Carbon dioxide. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 16. 04 2011. a.]
http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide.
5. Carbon dioxide in Earth's atmosphere. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 16. 04 2011. a.] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_in_Earth%27s_atmosphere.
6. Carbon cycle. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. 04 2011. a.]
http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_cycle.
7. **Johnson, Roberta**. The Carbon Cycle. *Windows to universe*. [Võrgumaterjal] 7. 11 2010. a. [Tsiteeritud: 16. 04 2011. a.]
http://www.windows2universe.org/earth/Water/co2_cycle.html.
8. **Vernier Software & Technology**. Vernier CO2 anduri kasutusjuhend. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. 05 2011. a.] <http://www2.vernier.com/booklets/co2-bta.pdf>.
9. Infrared. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. 05 2011. a.]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>.
10. File:P1020168.JPG. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. 05 2011. a.]
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:P1020168.JPG>.
11. Passive infrared sensor. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. 05 2011. a.]
http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_infrared_sensor.
12. Pyroelectricity. *Wikipedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. 05 2011. a.]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyroelectricity>.

13. **Vernier Software & Technology.** Vernier' andurite plokk NXT tarkvarale.

[Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 30. 5 2011. a.]

http://www.vernier.com/nxt/vernier_sensor_block_2.0.zip.

14. **Gasperi, Michael L. ja Hurbain, Philippe E.** Making a Connection. *Extreme NXT:*

Extending the Lego Mindstorms NXT to the Next Level. s.l. : Apress, 2009.

7 Lisad

7.1 Lisa 1 – ülesannete lahenduste ja vajalike failidega CD

Tabel 2. Loetelu Lisa 1 failidest ja nende kirjeldus

Faili nimi	Kirjeldus
vernier_sensor_block_2.0.zip	Vernier' sensori plokk LEGO MINDSTORMS NXT Programming V2 keskkonna jaoks.
vernier_sensor_block_2.0_co2.zip	Vernier' sensori plokk LEGO MINDSTORMS NXT Programming V2 keskkonna jaoks koos CO2 sensori toega.
Vernier Sensor calibrations.txt	Konfiguratsioonifail CO ₂ anduri madalama tööpiirkonna seadistusega.
Lahendus 1.rbt	Esimese ülesande näidislahendus.
Lahendus 2.rbt	Teise ülesande näidislahendus.
Lahendus 3.rbt	Kolmanda ülesande näidislahendus.
robot 2.png	Detailsem pilt esimese ja teise ülesande näidislahenduse robotist.
robot 3.png	Detailsem pilt kolmanda ülesande näidislahenduse robotist.
Vernier' CO ₂ sensor LEGO MINDSTORMS NXT robotile.pdf	Käesolev töö digitaalsel kujul.

7.2 Lisa 2 - Anduri tõlgitud spetsifikatsioon

CO₂ gaasi sensori mõõtepiirkonnad

Madal piirkond: 0 kuni 10,000 ppm CO₂

Kõrge piirkond: 0 kuni 100,000 ppm CO₂

Tüüpiline täpsus (standardrõhul, 1 atm)

Madal piirkond: ±100 ppm või ±10% lugemist

Kõrge piirkond: ±100 ppm või ±20% lugemist

Tüüpiline eraldusvõime

13-bit eraldusvõime (SensorDAQ)

0 kuni 10,000 ppm CO₂: 1.5 ppm

0 kuni 100,000 ppm CO₂: 15 ppm

12-bit eraldusvõime (LabPro, LabQuest, LabQuest Mini, Go!Link, ULI, or SBI)

0 kuni 10,000 ppm CO₂: 3 ppm

0 kuni 100,000 ppm CO₂: 30 ppm

10-bit eraldusvõime (CBL 2)

0 kuni 10,000 ppm CO₂: 12 ppm

0 kuni 100,000 ppm CO₂: 120 ppm

Kosteaeeg 95% täielikust skaala lugemist 120 sekundi jooksul

Töövalmiduse saavutamine 90 sekundit

Rõhuefekt 0.19% lugemist/mmHg standardrõhust

Väljundsignaali vahemik 0 – 4.0 V

Sisendi potentsiaal 5 V (±0.25 V)

Gaasi diskreetimise meetod difusioon

Normaalne töötemperatuur 25°C (±5°C)

Töötamise õhuniiskus 5–95% (mittekondenseeruv)

Hoiustamise temperatuur -40 kuni 65°C

Talletatud kalibratsioon lineaarne ($y = bx + a$)

Madal piirkond

Kõrge piirkond

$a = 0$

$a = 0$

$b = 2,500$

$b = 25,000$