



כיצד סוכר ביתי מיוצר מסלקי סוכר

Matheus Thomas Kuska^{1*}, Sabine von Tiedemann², Anne-Katrin Mahlein²

¹לנדווירטשאפטסקאמר צפון ריין-וסטפאליה, פלנצנשצ'י, קולוניה, גרמניה

²המכון לחקר סלק סוכר (IfZ), גוטינגן, גרמניה

סוקר צעיר

NICOLAS

גיל: 9



צמחים מייצרים סוכר וחמצן בתהליך שנקרא פוטוסינתזה, על ידי שימוש באור שמש, במים ובפחמן דו-חמצני. זהו תהליך חשוב בכדור הארץ, מאחר שהוא מסיר פחמן דו-חמצני מהאוויר ומספק עבורנו מזון. פוטוסינתזה מתרחשת ביחידות קטנות בתוך תאי הצמח, שנקראות כלורופלסטים. בתהליך דו-שלבי, צמחים מפיקים אנרגיה כימית מאור השמש. האנרגיה שנאספת משמשת בתגובה שנייה כדי לייצר את הסוכר גלוקוז. גלוקוז משולב עם פרוקטוז, שהוא סוכר פירות, כדי ליצור סוכרוז, שהוא הסוכר הביתי המוכר שלנו. לוקח כשבעה חודשים לגדל סלקי סוכר, והם מספקים 32% מייצור הסוכר הביתי העולמי. כשהם גדלים, הם צריכים להיות מוגנים מעשבים וממחלות. ברגע שהם גדלו מספיק, סלקי הסוכר יכולים להיקצר ולהיות מעובדים במפעל סוכר כדי לקבל סוכר ביתי.

סוכר מיוצר על ידי צמחים

קינוח אחרי ארוחת צוהריים, או חפיסת שוקולד מהסבים שלנו, גורמים לנו לחייך. הסיבה לכך היא שהמוחות שלנו דורשים את אחד הרכיבים במזונות המתוקים האלה. אנו מדברים על סוכר, שנקרא גם סוכרוז. סוכרוז מורכב משני סוכרים פשוטים יותר: גלוקוז ופרוקטוז. אולם, מהיכן

טבלה 1

חלק מהצורות של פחמימות בצמחים.

שם שכיח	שם מדעי	יכול להימצא ב:
דקסטרז	גלוקוז	פירות
סוכר פירות	פרוקטוז	פירות
סוכר ביתי	סוכרוז	סלק סוכר, קנה סוכר
עמילן	עמילום	תפוחי אדמה
צלולוז	צלולוז	דפנות תאי צמח

טבלה 1

גלוקוז מגיע? בניגוד לבני אדם ולחיות אחרות, צמחים יכולים לייצר גלוקוז דרך תהליך שנקרא **פוטוסינתזה**. החלקים הירוקים של הצמח משתמשים באור שמש, במים ובפחמן דו-חמצני מהאוויר כדי לייצר גלוקוז וחמצן. על ידי כך, צמחים מייצרים אנרגיה ומוודאים שאנו יכולים לנשום אוויר נקי, עשיר בחמצן. אולם כיצד הצמחים עצמם מרוויחים מפוטוסינתזה, ומייצור של גלוקוז? גלוקוז יכול לשמש כאבן בניין כימית וכמקור אנרגיה. צמחים משתמשים בגלוקוז כדי לחיות ולגדול. עבור צמחים ועבור בני אדם, גלוקוז הוא כמו דלק עבור מכונה.

צמחים מייצרים סוכר בעליהם, אולם טעמם של העלים אינו מתוק. הסיבה לכך היא שהסוכר לא נשאר בעלים. צמחים משתמשים בסוכר כדי לגדול, והוא גם יכול להיות משוּנע לשורשים, לזרעים, לגבעולים, או לפירות לשם אחסון. למדנו כבר שסוכריכול להיות קיים כסוכר פשוט, כמו גלוקוז ופרוקטוז, או כסוכר כפול, כמו סוכרוז. אולם ישנם גם סוכרים שמכילים אלפי מולקולות סוכר שמחוברות יחד ויוצרים יחידה ענקית, כמו עמילן. כל סוגי הסוכר השונים האלה הם סוג של חומרי מזון שנקרא פחמימות (טבלה 1).

צמחים רבים מאחסנים את הסוכר שלהם בצורת עמילן, כמו למשל תפוחי אדמה. אחרים מאחסנים סוכר בצורת פרוקטוז או גלוקוז בפירות שלהם, כמו תפוחים ותפוזים. חלק מהצמחים מאחסנים ריכוזים גבוהים של סוכרוז. צמחים עם ריכוז סוכרוז גבוה מגודלים עבור הסוכר הביתי שאנו משתמשים בו כדי להכין ממתקים טעימים. ברחבי העולם, סלקי סוכר וקנה סוכר הם היבולים העיקריים שמייצרים סוכר. קנה סוכר זקוק לטמפרטורות חמות (25-30 מעלות צלזיוס) כדי לגדול, ולכן היבול הזה מגודל באזורים טרופיים וסאב-טרופיים, כמו ברזיל והודו. כיום, סלקי סוכר הם היבול העיקרי לייצור סוכר באקלים מתון (15-25 מעלות צלזיוס), במיוחד במערב אירופה, במרכזה ובמזרחה, כמו גם בארצות הברית, בסין ובין.

אור, פחמן דו-חמצני ומים: מקורות של אנרגיה ומתיקות

עבור פוטוסינתזה, החלקים הירוקים בצמחים חשובים. עלים הם ירוקים מאחר שהם מכילים מבנים שנקראים **כלורופלסטים**, שיש להם פיגמנט ירוק, שנקרא **כלורופיל** (איור 1). בפוטוסינתזה יש שני שלבים עיקריים. בשלב הראשון, אור שמש זורח על העלים ואנרגיית השמש נאספת על ידי הכלורופיל שבכלורופלסטים. אנרגיית האור שנאספה מומרת לאנרגיה כימית ומאוחסנת במולקולות שאוגרות אנרגיה. חמצן גם מיוצר במהלך התהליך הזה, ומשוחרר על ידי הצמחים [1]. בשלב השני של פוטוסינתזה, פחמן דו-חמצני מהאוויר נכנס לעלים דרך פתחים קטנים ביותר. באמצעות האנרגיה הכימית שאוחסנה קודם לכן, הכלורופלסטים ממירים פחמן דו-חמצני לגלוקוז [1]. פרוקטוז גם מיוצר במהלך השלב הזה. אז, גלוקוז משולב עם פרוקטוז ליצירת סוכרוז.

כלורופלסט

(Chloroplast)

מבנים קטנים בתוך העלים שמבצעים פוטוסינתזה.

כלורופיל

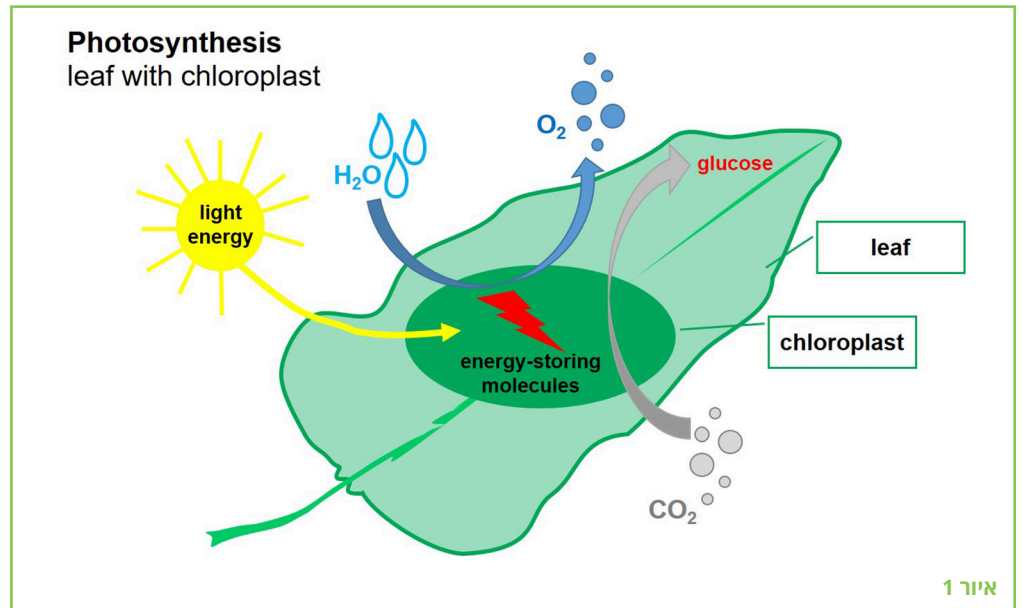
(Chlorophyll)

פיגמנטים בתוך כלורופלסטים שסופגים אנרגיית שמש מאור השמש.

איור 1

המחשה פשוטה של פוטוסינתזה.

בתוך הכלורופלסטים שבעלים אור, מים (H₂O) ופחמן דו-חמצני (CO₂) מותמרים לאנרגיה ולסוכר (גלוקוז). באמצעות מים, אור השמש מותמר למולקולות שמאחסנות אנרגיה בתוך תאי הצמח. האנרגיה מהמולקולות האלה משמשת ליצירת גלוקוז מפחמן דו-חמצני.



מהו סלק סוכר?

אנשים תמיד מצאו חומרים שימתיקו להם את המזון. אולם באקלימים קרירים, סוכר היה מוצר מותרות במשך שנים רבות. בשנת 1747, הכימאי הגרמני אנדראס סיגיסמונד מרגאף גילה שסלקים מייצרים את אותו הסוכר כמו קנה סוכר. תלמידו פיתח תהליך טכני שמוזקק את הסוכר מהסלקים. מפעל הסוכר הראשון נעשה פעיל בשנת 1802. זמן קצר לאחר מכן, הרבה מפעלי סוכר נבנו בכל רחבי אירופה.

צמח סלק הסוכר (שנקרא *Beta vulgaris* בלטינית) מכיל עלים ירוקים בהירים בתבנית שושנה, ושורש לבן בשרני בצורת קונוס (איור 2). שורש הסלק הוא איבר אחסון, שמכיל 75% מים, ~20% סוכר, ורכיבים מבניים שנקראים ציפה (pulp).

גידול של סלקי סוכר

גידול של יבולים עשוי להיראות פשוט, אולם זה לא כך אם אתם רוצים לגדול יבולים מספיק גדולים כדי להזין אנשים רבים. בואו נסתכל על האופן שבו סלקי סוכר מיוצרים (איור 3). המסע שלנו מתחיל בתוך זרע סלק הסוכר. הזרעים נזרעים ברגע שהאדמה התחממה, בדרך כלל במרץ/אפריל. זרע סלק סוכר אחד בדרך כלל מתפתח לצמחים רבים. עד שנות ה-1970, צריך היה להסיר את הצמחים הלא הכרחיים באופן ידני, כך שהסלקים לא יהיו צפופים מדי, מה שהצריך מאמץ ודרש זמן רב. לאחר מכן, פריצת דרך עבור מכיליאי צמחים הציגה זרעים שמייצרים רק צמח אחד. מכיליאי זרעים שמייצרים זרעי סלק סוכר מכסים את הזרעים עם **מדברים** שיגנו על הזרעונים כנגד מחלות ומזיקים. זרע סלק הסוכר המכוסה נקרא **pill**, ויש לו לעיתים קרובות צבעים שונים כתלות במכיליאי (איור 3A).

כאשר הזרעים נובטים, מופיעים שורשים קטנים ושני עלי זרעים, שנקראים **פְּסִיגִים** (איור 3B). מהנקודה הזו והלאה, סלק הסוכר הצעיר צריך להיות מוגן מפני עשבים, מאחר שעשבים

מדברים (Pesticides)

חומרים שמשמשים להגנה על יבולים כנגד עשבים, פטריות, פתוגנים ומזיקים.

Pill

זרע סלק סוכר שמצופה בשכבה של חומרים שונים, בעיקר כדי להגן על הזרעונים כנגד מחלות ומזיקים.

פְּסִיגִי (Cotyledon)

שני העלים הראשונים שמגיחים מהזרע אחרי זריעה.

איור 2

צמח סלק סוכר מפותח לנמרי. החלק שמתחת לאדמה הוא איבר אחסון שנקרא שורש שיפודי (taproot), שהוא שורש שעיר המיועד לספוג מים וחומרי מזון. החלק שמעל לאדמה מכיל את העלווה שמכילה כמה עלים המאורגנים בתבנית דמוית שושנה.



איור 2

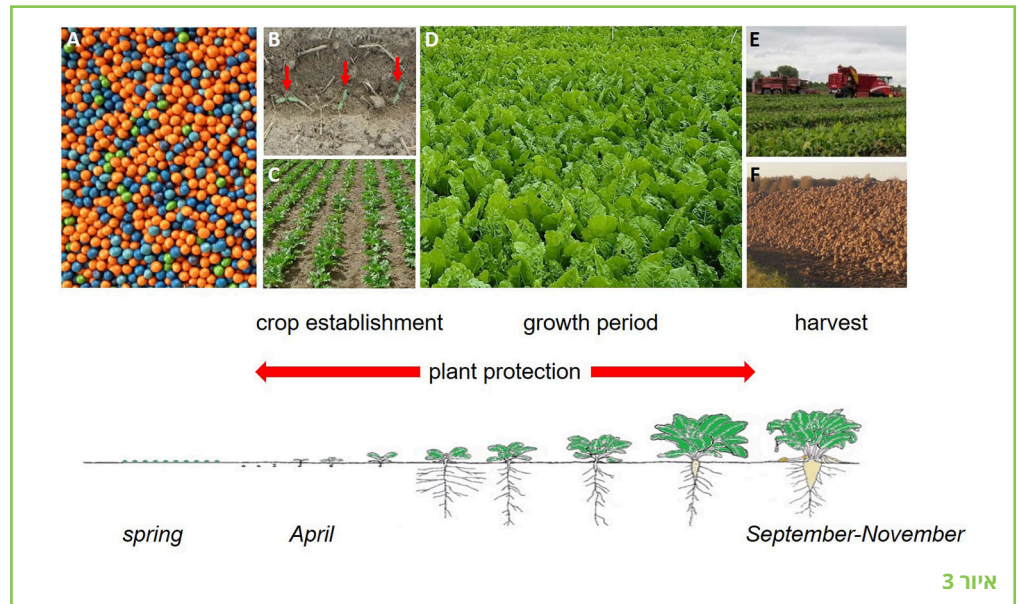
מתחרים על אור שמש וחומרי מזון באדמה. חקלאים יכולים לשלוט על העשבים באמצעות מעדר, או שהם יכולים להשתמש בקוטלי עשבים, שהם כימיקלים שהורגים עשבים. אם החקלאים לא שולטים בעשבים, העשבים המתחרים ישתלטו על הסלקים הקטנים, והיבול יכול לקטון בעד 80% [2]. סלקים צריכים להילחם לא רק כנגד עשבים מתחרים. הם גם מותקפים על ידי חרקים. חרקים תוקפי סלקים יכולים להיות מופרדים לשתי קבוצות: אלה שמזיקים לצמח באופן ישיר, ואלה שמעבירים מחלות וירליות. כנימת האפרסק הירוק (*Myzus persicae*), לדוגמה, יכולה להעביר וירוס שגורם להצהבה של עלי סלק הסוכר, מה שפוגע בפוטוסינתזה ומפחית את ייצור הסוכר.

צריך להגן על סלקים מפני מחלות פטרייתיות

אחרי שסלק הסוכר פיתח תשעה עלים או יותר, נוצר ה"סלק", או איבר האחסון התת-קרקעי. סוכרוז שמיוצר בעלים מאוחסן בסלק. ככל שהקיץ שמשי יותר, כך אפשר לייצר יותר סוכר על ידי פוטוסינתזה. במהלך הזמן הזה, העלים צריכים להיות מוגנים כנגד מחלות פטרייתיות, מאחר שרק עלים בריאים יכולים לבצע פוטוסינתזה. המחלה השכיחה וההרסנית ביותר של עלי סלק סוכר נגרמת על ידי פטריה, ששמה הלטיני הוא *Cercospora beticola*. תחילה, רק נקודות

איור 3

גידול סלק סוכר (A) באביב, זרעי סלק סוכר (שמוצגים כאן כ-pills, שהם זרעים שמכוסים בעיקר בחומרים שמגינים על הזרעונים כנגד מחלות ומזיקים) נזרעים בשורה. (B,C) זרעוני סוכר קטנים מניחים וגדלים. (D) כאשר תשעה עלים או יותר נפתחו, נוצר שורש שיפודי והוא גדל מתחת לאדמה ומאחסן סוכר. במהלך "תקופת הגדילה" הזו צריך לשלוט במיוחד בפטריות טפילות, אשר יכולות לפגוע בפוטוסינתזה. (E) במערב אירופה ובמרכזה, הסלקים נקצרים בתחילת ספטמבר. (F) סלקים מאוחסנים בערמה שנקראת צמדה בקצה השדה, עד שהם מובאים למפעל לזיקוק הסוכר. בתחית, אתם יכולים לראות את הצעדים של גידול סלק הסוכר עבור ייצור סוכר, ואת משך הזמן שחשוב במיוחד כדי להגן על סלקי הסוכר כנגד עשבים, חרקים ופטריות טפילות.



איור 3

עגולות כהות קטנות עם גבול אדומים ניתנות להבחנה, אולם הפטריות מייצרות חומר רעיל שהורס את רקמת העלה ובסופו של דבר הורג אזורים גדולים יותר, או אפילו את כל העלים. הפטרייה משתמשת ברקמה המתה כמקור להזנה [3]. המחלה יכולה להיות מופחתת על ידי גידול סלקי סוכר פעם בשלוש שנים בלבד, וגידול של צמחים אחרים, כמו למשל דגנים, בשנים שבין גידולי הסלקים [3]. השיטה הזו נקראת רוטציה יבוליים. חקלאים גם יכולים להשתמש בסוגים שונים של סלק סוכר שעמיד בפני *Cercospora*, אשר יכול להתמודד עם המחלה בצורה טובה יותר [3]. אם הפטריות כבר תקפו את סלקי הסוכר באופן חמור, קוטלי פטריות, שהם חומרים כימיים שמגינים על צמחים בפני זיהומים פטרייתיים, יכולים להיות מרוססים על הצמחים. חוקרים בוחנים טכנולוגיות חדשות להפחתת השימוש בקוטלי פטריות. לדוגמה, על ידי שימוש במערכות מיוחדות של מצלמות ומחשבים, אפשר לחזות את מחלות הצמח מוקדם יותר מאשר מתוך התבוננות בעין בלתי מזוינת, וחקלאים יכולים להשתמש בקוטלי פטריות באופן ממוקד יותר [4]. זה חשוב גם לשם הגנה על חיות מועילות, שחיות בשדות סלק הסוכר, כמו למשל קיווית, ציפורים אחרות שמקננות על האדמה, ארנבות ושפנים וחרקים כמו חיפושיות, למשל פרת משה רבנו. אולם, סלק הסוכר אינו פורח כאשר הוא מגודל עבור ייצור סוכר, ולכן שדות סלק הסוכר אינם מושכים עבור דבורי דבש, דבורי פרא, או דבורי בומבוס.

קציר זיקוק הסוכר

בסתיו, כאשר הצמחים סיימו לגדול, מתחיל קציר סלק הסוכר. העלים של סלקי הסוכר מוסרים, והסלקים מורמים מהאדמה על ידי קוצרי סלק, שהרבה מהם יכולים לקצור שש שורות במקביל (איור 3E). העלים נשארים בשדה כמדשן טבעי. סלקי הסוכר נאספים לערמה, שנקראת **צמדת סלק** (איור 3F), שם הם ממתינים לעיבוד. סלקי הסוכר נקצרים באופן מדורג ומשונעים למפעלים כך שהמפעלים יוכלו להמשיך ולעבד את סלקי הסוכר במהלך הזמן הזה. במפעלים, סוכר מזוקק מהשורשים באמצעות מים, ליים, חום וידע בפיזיקה. בממוצע, שישה עד שבעה סלקים נדרשים לייצור של 1 קילוגרם סוכר, שזהו שטח יבול של כ-1 מטר מרובע.

צמדת סלק

אוסף של סלקי סוכר מנוקים, ללא עלים, שבדרך כלל נמצאים בקצה השדה.

כיום, כמעט כל הרכיבים בצמחי סלק הסוכר משמשים בתוך מעגל סגור ובר קיימא. נוסף לסוכר, מוצרים אחרים שמיוצרים מסלק הסוכר כוללים מזון לחיות, ביו-אתנול וביו-גז.

מה למדנו?

במאמר זה למדתם הרבה על סלקי סוכר: כיצד הם גדלים, כיצד הם מייצרים סוכר, המזיקים והמחלות שהם מתמודדים איתם וכיצד הם נקצרים. גידול של סלק סוכר חשוב מאוד מאחר שהוא מספק ~32% מייצור הסוכר הביתי העולמי, וזהו היבול היחיד בעל ריכוז סוכרוז גבוה שאפשר לגדל באזורים עם אקלים מתון.

תודות

המחברים מודים למקסימיליאן מולנדר על קריאת הגהה זהירה של כתב היד, ועל הערותיו המועילות.

מקורות

1. Eberhard, S., Finazzi, G., and Wollman, F.-A. 2008. The dynamics of photosynthesis. *Annu. Rev. Genet.* 42:463–515. doi: 10.1146/annurev.genet.42.110807.091452
2. Cousens, R. 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Ann. Appl. Biol.* 107:239–52. doi: 10.1111/j.1744-7348.1985.tb01567.x
3. Weiland, J., and Koch, G. 2004. Sugarbeet leaf spot disease (*Cercospora beticola* Sacc.). *Mol. Plant Pathol.* 5:157–66. doi: 10.1111/j.1364-3703.2004.00218.x
4. Mahlein, A.-K., Kuska, M. T., Behmann, J., Polder, G., and Walter, A. 2018. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. *Ann. Rev. Phytopathol.* 56:535–58. doi: 10.1146/annurev-phyto-080417-050100

פורסם אונליין: 10 ביוני 2022

נערך על ידי: Dominik K. Großkinsky

מנחה מדעי: Oscar Fernandez

ציטוט: Kuska MT, von Tiedemann S and Mahlein A-K (2022) כיצד סוכר ביתי מיוצר מסלקי סוכר. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00108-he

תורגם והותאם: Kuska MT, von Tiedemann S, Mahlein A-K (2020) How Table Sugar Is Produced From Sugar Beets. *Front. Young Minds* 8:108. doi: 10.3389/frym.2020.00108

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

Kuska, von Tiedemann and Mahlein 2022 © 2020 © **COPYRIGHT** שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

NICOLAS, גיל: 9

גדלתי בספרד ועכשיו אני גם בווינה. אני יכול לדבר גרמנית, אנגלית וספרדית. המקצוע האהוב עליי בבית ספר הוא מתמטיקה, והספורט האהוב עליי הוא כדורגל.



הכותבים

MATHEUS THOMAS KUSKA

כבילוג נלהב שמתמחה בצמחים ובמיקרובים, אני נהנה במיוחד לחקור כיצד הם חיים יחד, כדי לשפר את הידע שלנו עבור חקלאות והגנה ברת קיימא על צמחים. לכן, אני משתמש במכונות מודרניות, במצלמות ובמחשבים כדי לנתח מחלות צמחים ומזיקים בחממות ובשדות. בתפקידי הנוכחי, בלשכה לחקלאות בצפון ריין-וסטפאליה, קבוצתי ואני חוקרים חקלאות ברת קיימא כדי להבטיח ייצור מספיק של יבולים עם כמה שפחות סטרס סביבתי. אנו גם מריצים שירותי ייעוץ כדי לוודא שהתוצאות שלנו יהיו זמינות לחקלאים. *matheus.kuska@lwk.nrw.de



SABINE VON TIEDEMANN

כאגרונומית, התעסקתי במודלים של חיזוק בגידול של דגנים, תוך שאילת שאלות בפתולוגיית הצמח בגידול פנים וביערנות. כיום, אני עובדת בתחום של גידול סלק סוכר, במכון לחקר סלק סוכר, שם אני גם מלמדת כתיבה מדעית ונהנית לפרק נושאים מורכבים כך שסטודנטים יוכלו להבין אותם.



ANNE-KATRIN MAHLEIN

אני חוקרת אינטראקציות צמח-פתוגן ודרכים לעשות המחשה צורנית לתגובות מורכבות שמתרחשות בתוך צמחים, עם חיישנים אופטיים וטכנולוגיות דיגיטליות. במכון לחקר סלק סוכר, הקבוצה שלי ואני אחראיים על פיתוח שיטות גידול חדשניות לסלק סוכר. זה מביא בחשבון את כל ההיבטים של ייצור סלק סוכר וסוכר ביתי, כמו למשל יבול ואיכות, מחלות צמחים והגנה. לכן, אנו משתמשים במכונות מודרניות, בסנסורים, ברובוטים, בשיטות ניתוח, מחקרי שדה ומחקרי מעבדה.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK