

הקרחונים: האדריכלים השקטים של כדור הארץ

מסע אל המערכת הדינמית שעיצבה את הנוף,
אוגרת את העבר, ומכתיבה את עתיד האקלים.





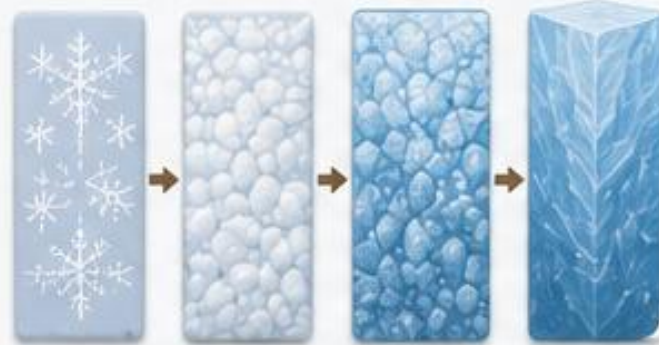
ערך: גילי חסקין





גובה קו השלג (מטר) מעל פני הים

0 m	3000 m
1000 m	3000 m
2000 m	



גבישי שלג כוכביים שלג גרגירי (מקפא) גרגירים מעוגלים קרח מוצק וגמיש

דחיסה ומטמורפוזה לאורך זמן



חריצים גלציאליים



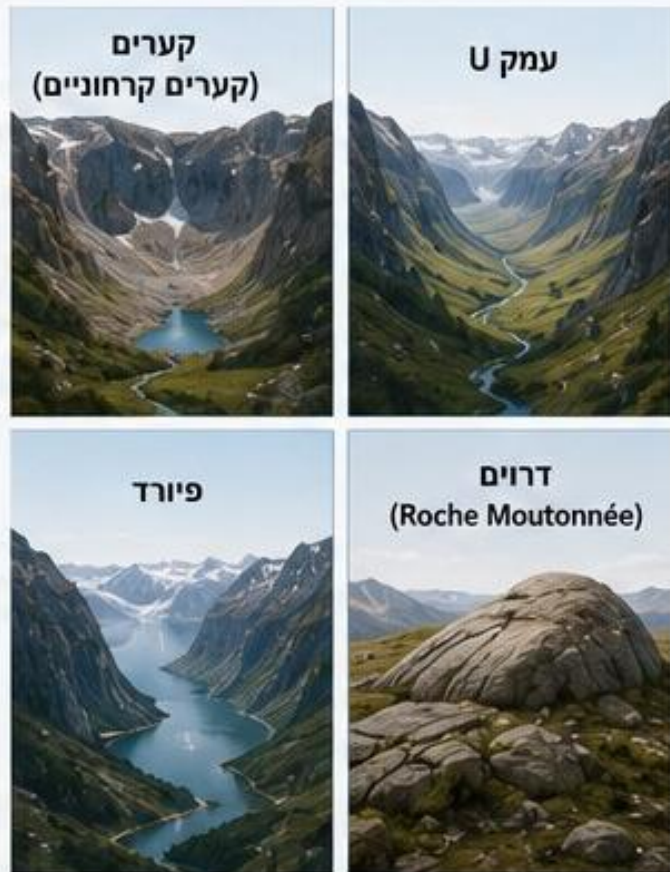
(Roche Moutonnée)



6 משקעים קרחוניים (מורנת)



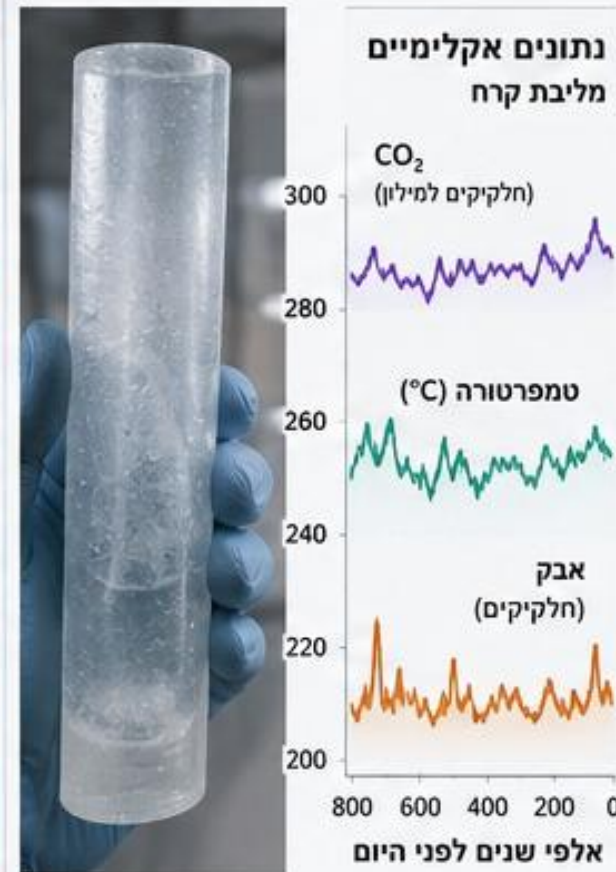
7 צורות נוף קרחוניות



8 שבירת קרח (Calving)



9 ליבת קרח - ארכיון אקלימי



10 1920 לעומת 1920 לעומת 2020



הקרחונים - המערכת הדינמית שעיצבה את הנוף שאנו מכירים היום

לפני: עיצוב ראשוני

אחרי: עיצוב קרחוני

עמק נהר ראשוני

עמק U קרחוני

קרחון

כוח טבע
עצום

תנועה איטית שנדמית
כקיפאון מוחלט

ניתוב נהרות

חציבת הרים

ניתוב
נההתדהום

מורינות:
הבלזות

הובלת
טעונה

כחו

יבשת

כיסוי קרח: כ-10%
משטח היבשה כיום



זמן גיאולוגי:
איטי ועצום

רכס משונן (ארט)

קרקס קרחוני

קרו

מורינות
הנונה

עמק U-קרחוני



שתי שפות, שתי דרכים לתאר עוצמה קפואה

המונח המדעי: **Glaciology**
(חקר הקרחונים).



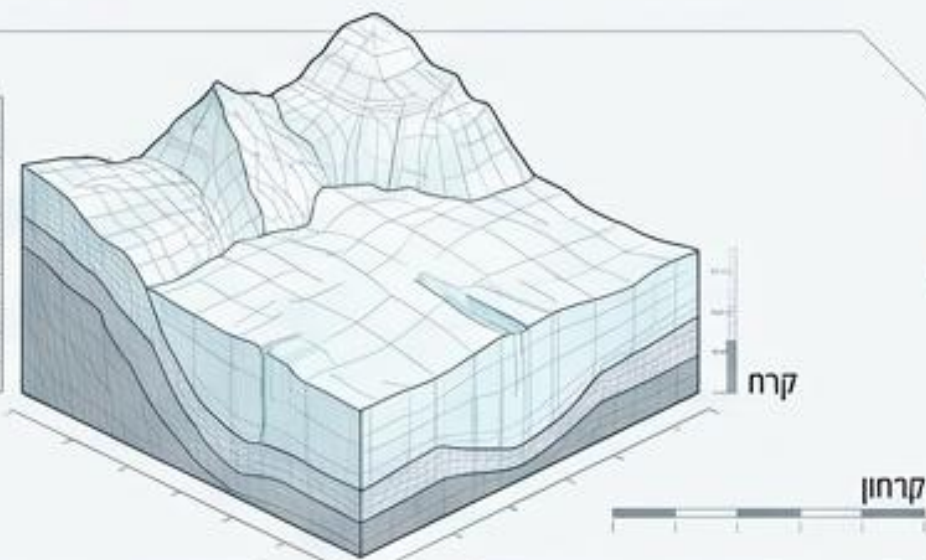
צרפתית עתיקה ואלפים:
-> **Glace / Glacier**
מקום של קרח (וגם גלידה).



לטינית: **Glacies** ->
המונח הרומי לקרח
וקיפאון.



שורש הודו-אירופי קדום:
-> **Gel- / G'el-** (לקפוא)
הוליד מילים כמו
Gel- / Congeal.



המשמעות: לא הקטנה, אלא להפך -
ציון גוף עצום בעל זהות גאוגרפית (קרחה).
העברית המודרנית יצרה מונח עצמאי לחלוטין.

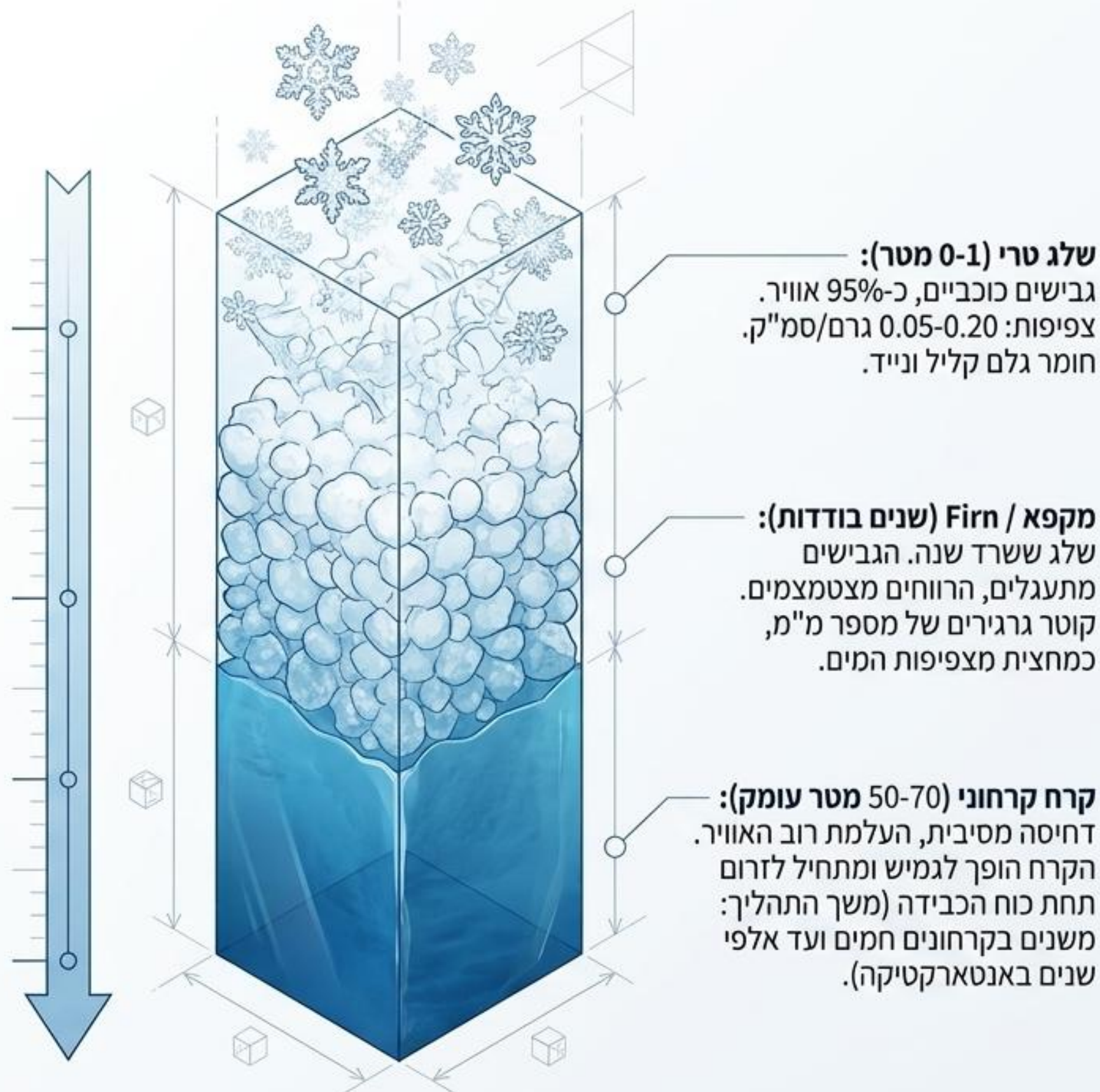


חידוש עברי (תחילת המאה ה-20):
פרופ' יוסף קלוזנר לוקח את השורש
העתיק ומוסיף את הסיומת **"-ון"**.

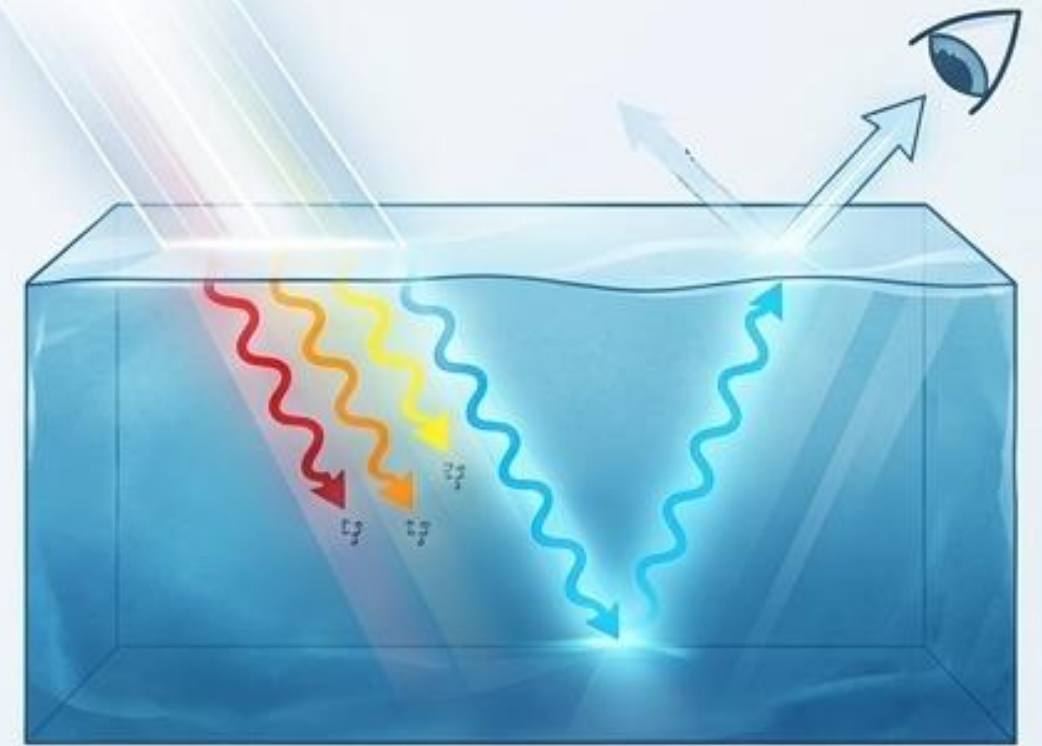


שורש מקראי: ק-ר-ח.
ציטוט מודגש מספר איוב (לז, י):
מְנַשְׁמַת אֶל יַתֵּן-קָרַח.

לידתו של קרחון: דחיסה, מטמורפוזה והצבע הכחול



The Physics of Blue Ice



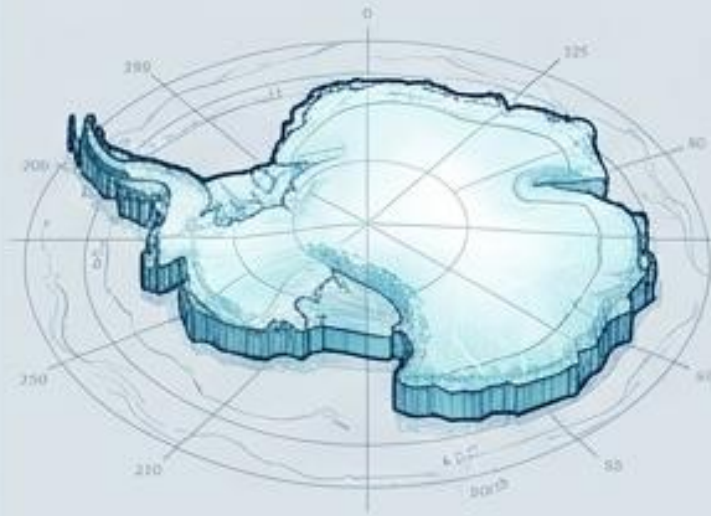
מדוע הקרח כחול?

מולקולות המים בולעות אורכי גל ארוכים (אדום, כתום, צהוב). האור הכחול (גל קצר) אינו נבלע, אלא מוחזר ומועבר דרך הקרח הדחוס ונטול הבועות. זוהי בליעה סלקטיבית טהורה (בשונה מפיזור האור בשמיים).

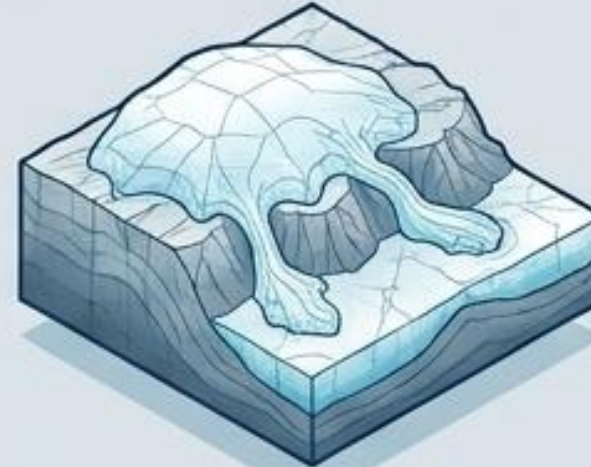
הטקסונומיה של הקרח:

מיריעות ענק ועד קרחוני עמק

נפח וקנה מידה



יריעות קרח (Ice Sheets): מוחלטות ולא מוגבלות. מכסות 99% מהקרח בעולם (אנטארקטיקה - 14 מיליון קמ"ר, גרנלנד - 1.7). הזרימה היא מהמרכז לשוליים תחת לחץ משקלן.



כיפות קרח (Ice Caps): קטנות יותר, אזורים שטוחים/גבוהים (איסלנד, סקנדינביה). מתנקזות דרך קרחוני עמק.

הגבלה טופוגרפית



קרחוני עמק (Glacier): 'נהרות קרח' קלאסיים הכלואים בטופוגרפיה הררית. זורמים במורד העמק כבבואה של האקלים המקומי. מגדל המים של מיליארדים.



קרחון הדום (Piedmont): התפזרות שטוחה במישור של קרחונים שירדו מההרים.



קרחון קירקס (Cirque): כלואים בשקעים דמויי תיאטרון במדרונות הרים.

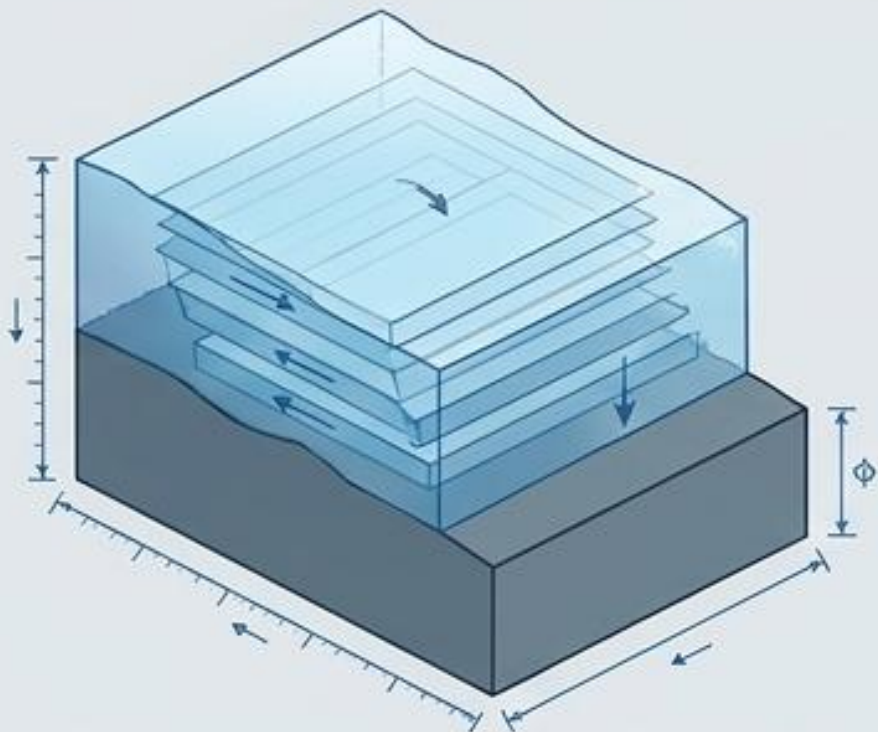


קרח ים (Sea Ice) - אינו קרחון! נוצר ישירות מקפיאת מי ים ללא קשר ליבשה. המסת קרח ים אינה מעלה ישירות את מפלס האוקיינוס.

המנוע הפנימי: מדוע וכיצד הקרח זורם?

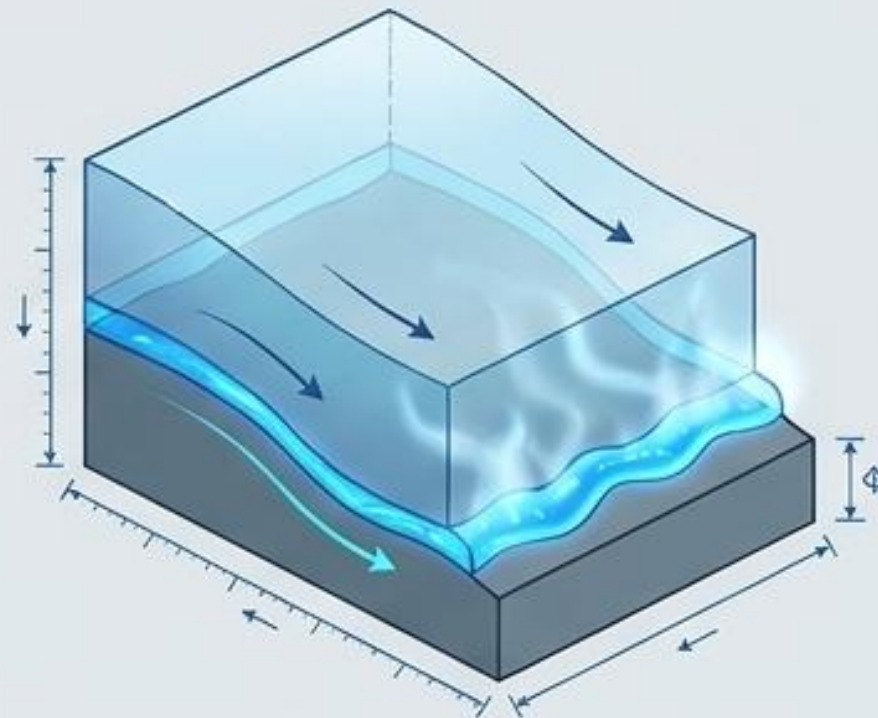
בלחצים אדירים ובטווחי זמן ארוכים, הקרח המוצק מתנהג כחומר צמיג-גמיש ונע בכיוון ההתנגדות הקטנה ביותר.

עיוות פלסטי פנימי
(Internal Deformation)



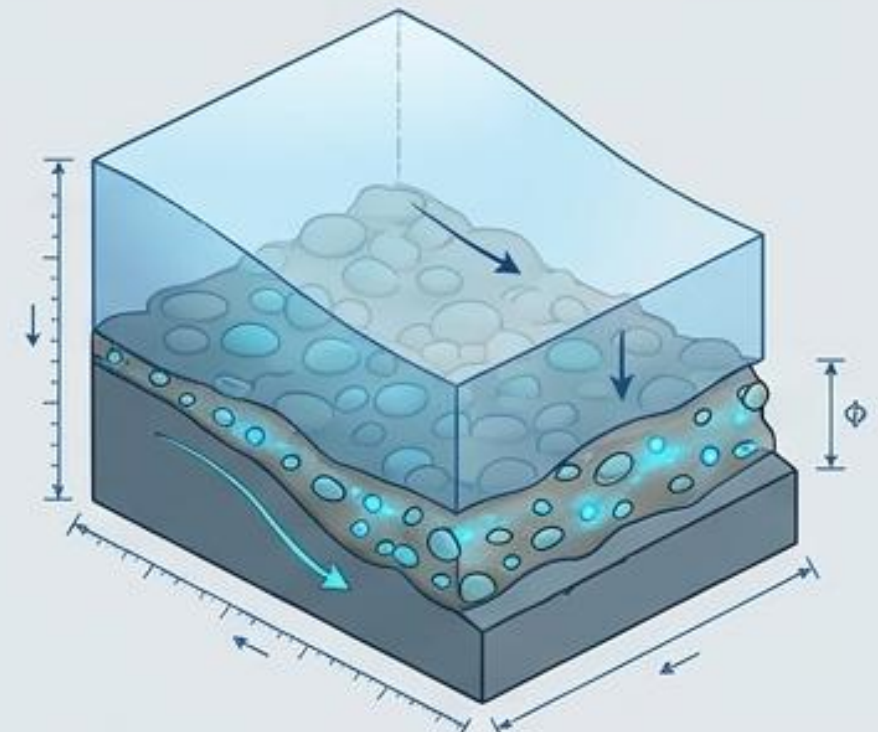
מנגנון: תחת לחץ עצום, גבישי הקרח נחתכים ומחליקים זה על זה (כמו חפיסת קלפים).
תנאים: שולט בקרחונים קרים (פולריים) בהם הבסיס קפוא לחלוטין מתחת לנקודת ההמסה.

החלקה בסיסית
(Basal Sliding)



מנגנון: הלחץ בבסיס מוריד את נקודת ההמסה. נוצרת שכבת מים דקה בין הקרח לסלע המשמשת כחומר סיכה.
תנאים: קרחונים מתונים (Temperate). מהירותם יכולה להשתנות בתוך ימים עקב שינויים בכמות מי ההמסה.

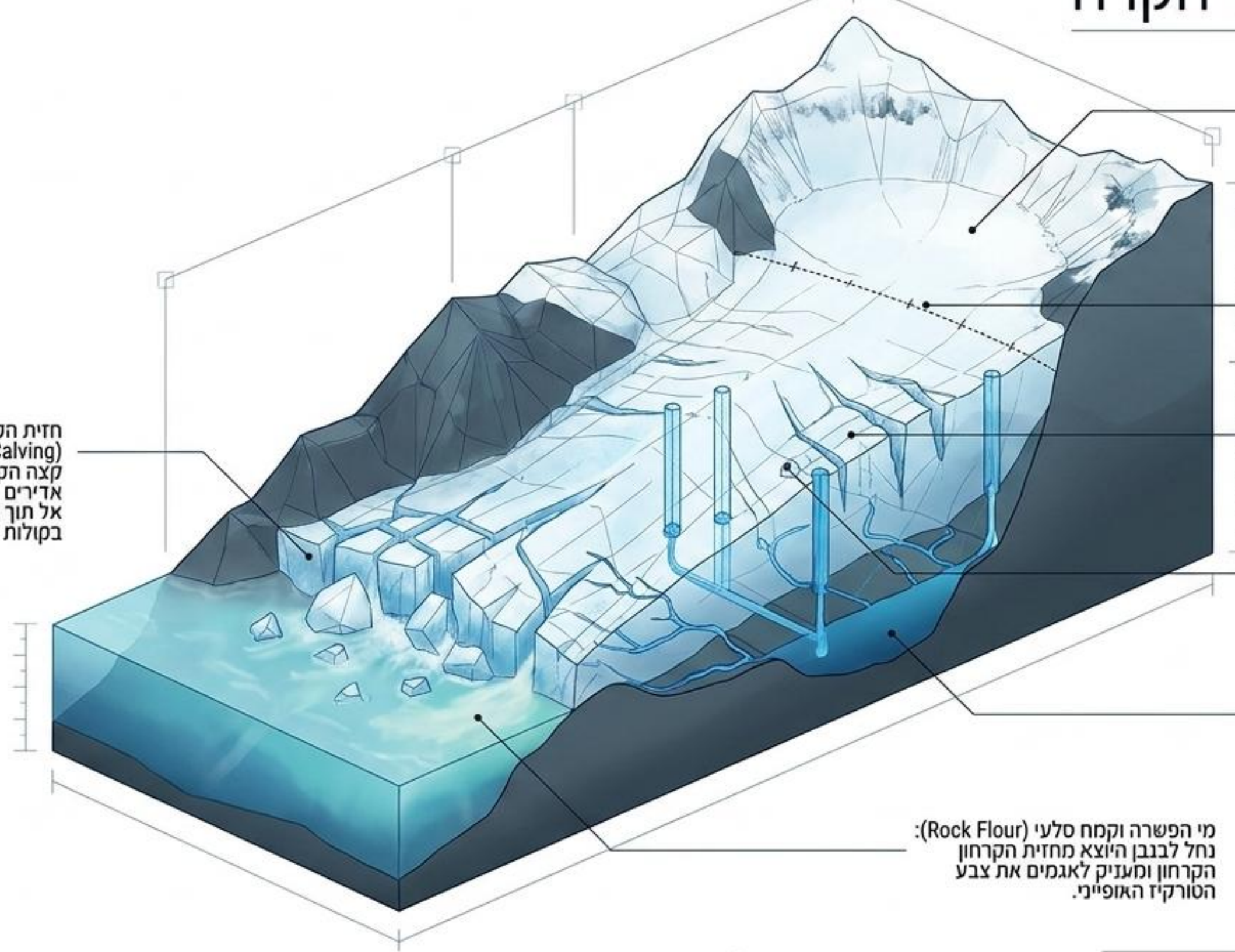
עיוות משקעי תשתית
(Subglacial Sediment Deformation)



מנגנון: הקרחון רוכב על שכבת משקעים רכים ורוויי מים (טייל, חרסית) שנעים בעצמם.
תנאים: קריטי לקרחונים המהירים של אנטארקטיקה וגרנלנד.

קרחוני סערה (Surging Glaciers) - תופעה של זרימה איטית הנשברת בפרצי האצה (פי 10-100 במהירות) עקב הצטברות לחץ ומים בבסיס ויצירת 'שכבת פריצה'.

האנטומיה של נהר הקרח



שדה ההצטברות (Accumulation Zone):
אגן ההזנה דמוי תיאטרון (קירקס) מעל
קו השלג. כאן המסה הנכנסת גדולה
מהאובדת.

קו שיווי המשקל (Equilibrium Line):
גבול המעבר הדינמי בו
ההצטברות משתווה לאובדן.

בקיעים (Crevasses):
שברים בקרח עקב שינויי שיפוע.
בקיעים אורכיים ורוחביים. בקיעי
קפיאה נוצרים בחיכוך עם הסלע.

מולינים (Moulins):
פירים הידרולוגיים אנכיים, לעתים
בעומק מאות מטרים, תמובילים מי
המשרו: לפני הקרחון אל הבסיס
התת-קרחוני.

נהרות ואגמים תת-קרחוניים:
רשת מים חבויה תחת הקרח
המשפיעה על התחלקה.
(דוגמת אגם ווסטוק באנטארקטיקה,
נוצלי מאות אלפי שנים).

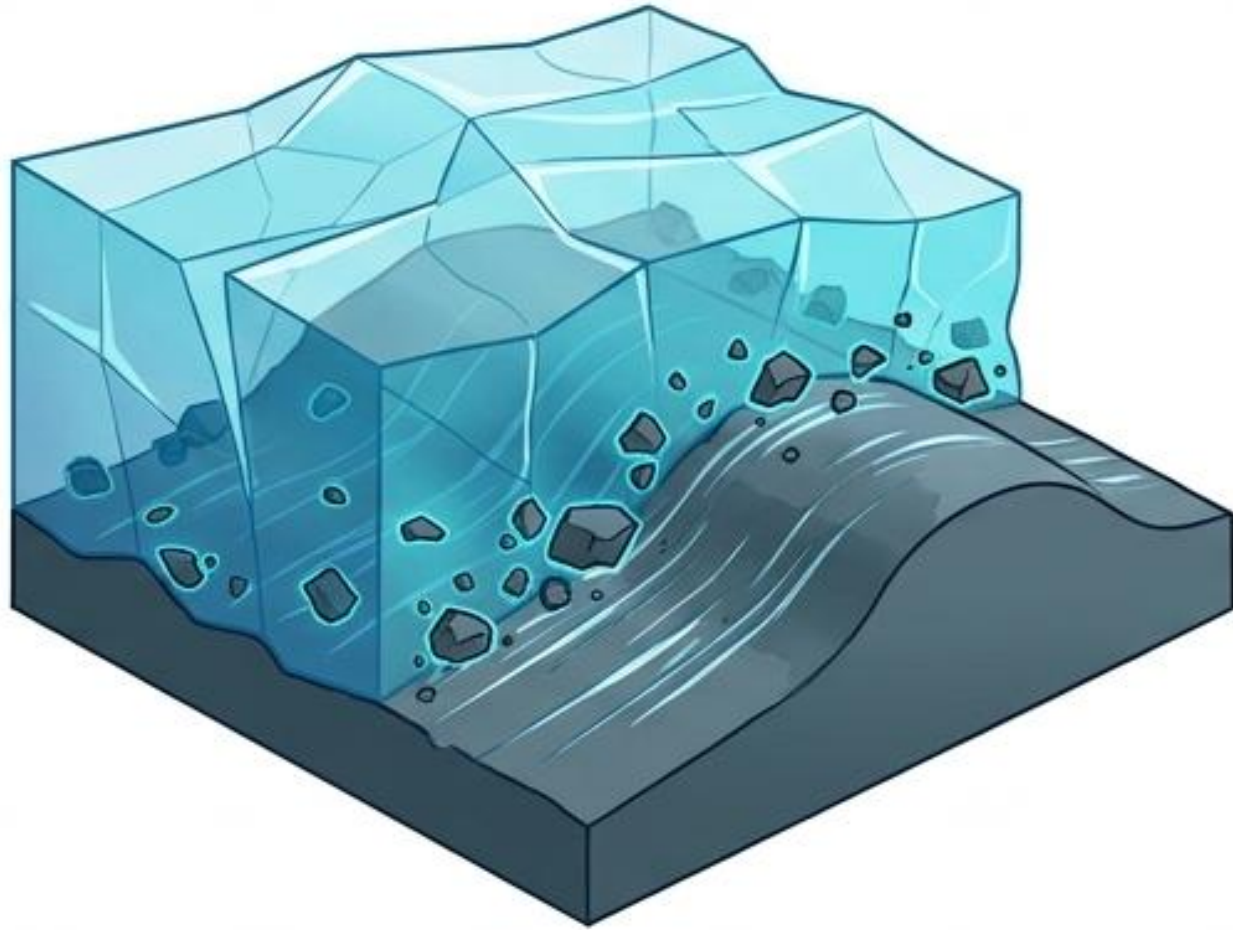
מי הפשרה וקמח סלעי (Rock Flour):
נחל לבבן היוצא מחזית הקרחון
הקרחון ומעניק לאגמים את צבע
הטורקיז האופייני.

חזית הקרחון ותהליך חשגירה
(Terminus & Calving):
קצה הקרחון בו גושי קרח
אדירים ניתקים
אל תוך הים, לעתים מלווים
בקולות נפץ כמו ירי תותחים.

מכונת החציבה: שני מנגנוני העיצוב הגיאולוגי

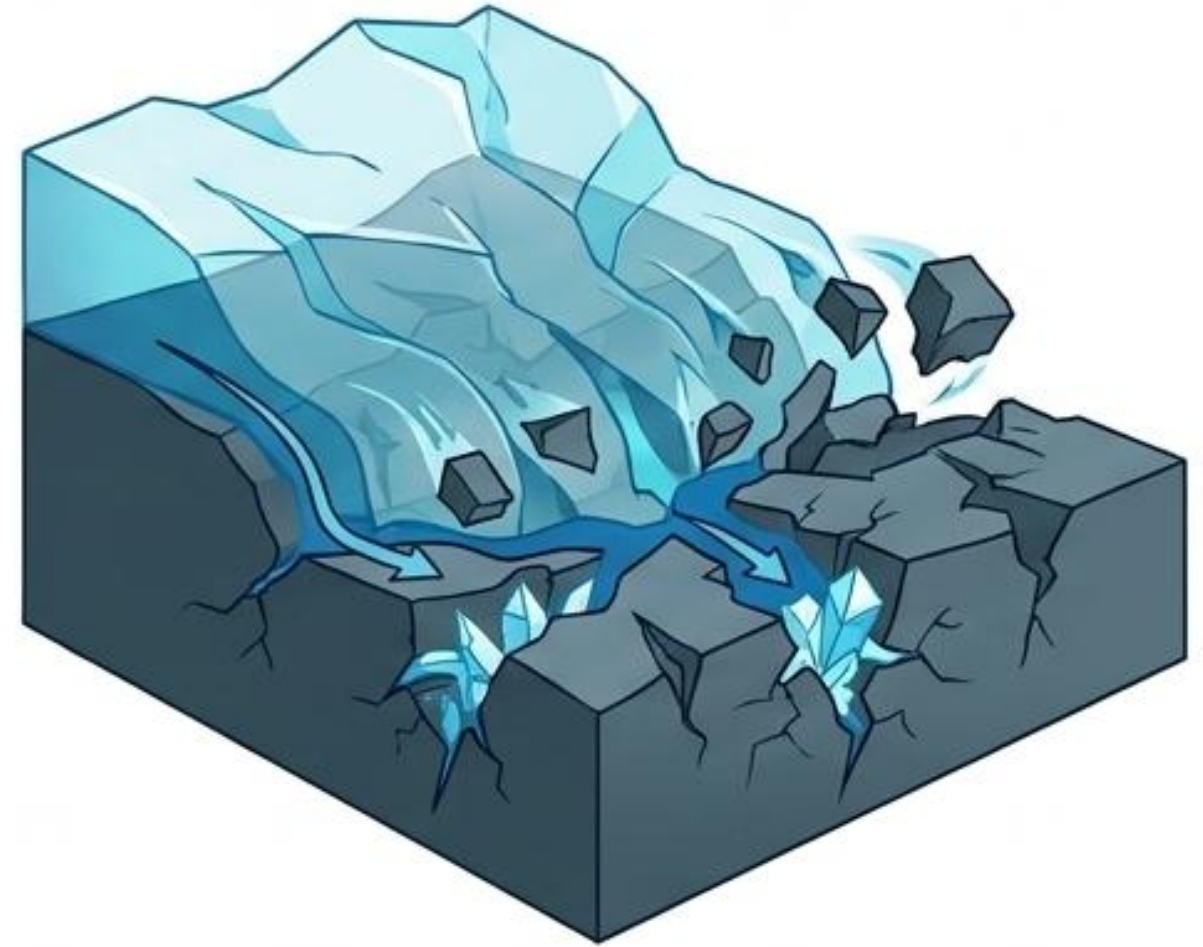
בעוד נהר מים חורף עמק בצורת V, נפח הקרחון האדיר מעצב עמקים רחבים בצורת U.

שחיקה (Abrasion) - 'נייר הלטש'



- **התהליך:** שברי סלעים וחצץ הדבוקים לתחתית הקרחון פועלים ככלי חיתוך אדירים הנשרכים על סלע האם.
- **התוצאה:** חריצי קרחון (Striations) ישרים המעידים על כיוון הזרימה, והחלקת סלעים לכדי צורת 'סלעי כבשים' (Roche nvée) חלקים ומבריקים.

תלישה (Plucking) - 'פיצוץ והרחבה'



- **התהליך:** תהליך אלים. מי המסה מחלחלים לסדקי הסלע, קופאים, מתרחבים (Frost Wedging) ומשחררים גושי סלע ענקיים.
- **התוצאה:** הרחבת והעמקת דפנות העמק ויצירת שוקות עמוקות תוך סחיבת החומר הסלעי מטה.



**חתך תלת-ממדי
סכמטי של מערכת
קרחונית פעילה,
שנועד להמחיש את
הקשר בין הקרחון
לבין עיצוב הנוף**



מימין עמק
נחל. משמאל
עמק קרחוני



עמק קרחוני בשווייץ

היווצרות מפולת קרקע והשפעתה על עמקים



נקודת שחיקה
בסיסית של הקרקע

הפשרה באביב
(ממיסי שלג)

תערובת רטובה:
שלג רטוב, קרקע ובלית

תנועה כבדה
ומלוכדת ומעורבת

שכבת בסיס
רטובה ולחה

נקודת שחיקה
בסיסית של הקרקע

חסימת אפיק
נהר

סכר מוריניאלי
(פסולת קרקע)

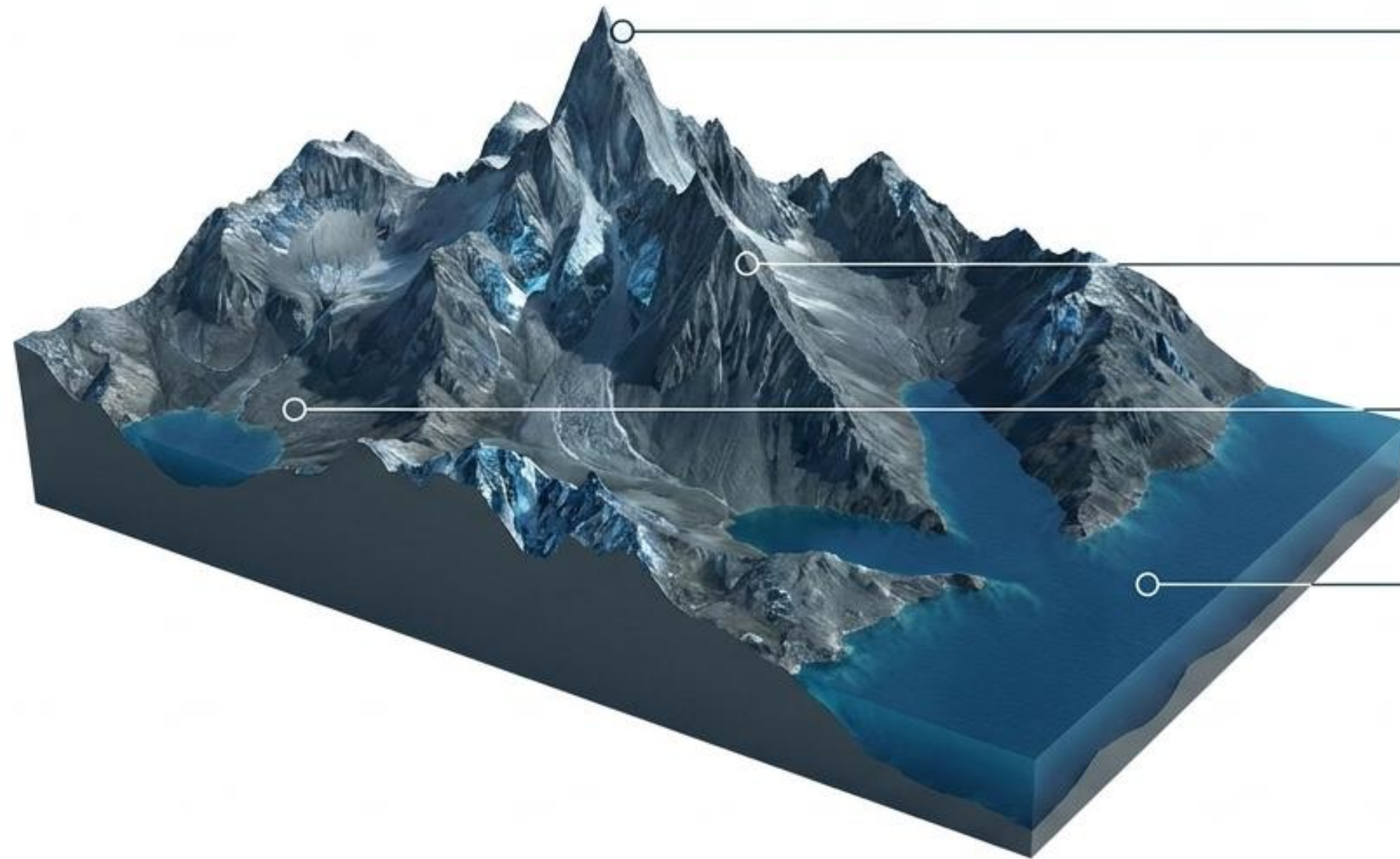
נהר משוחרר
(זרימה נמוכה)

U-עמק-צורה

שגירה והובלת
טעונה



צלקות הקרח: התבליט ההררי והפיורדים

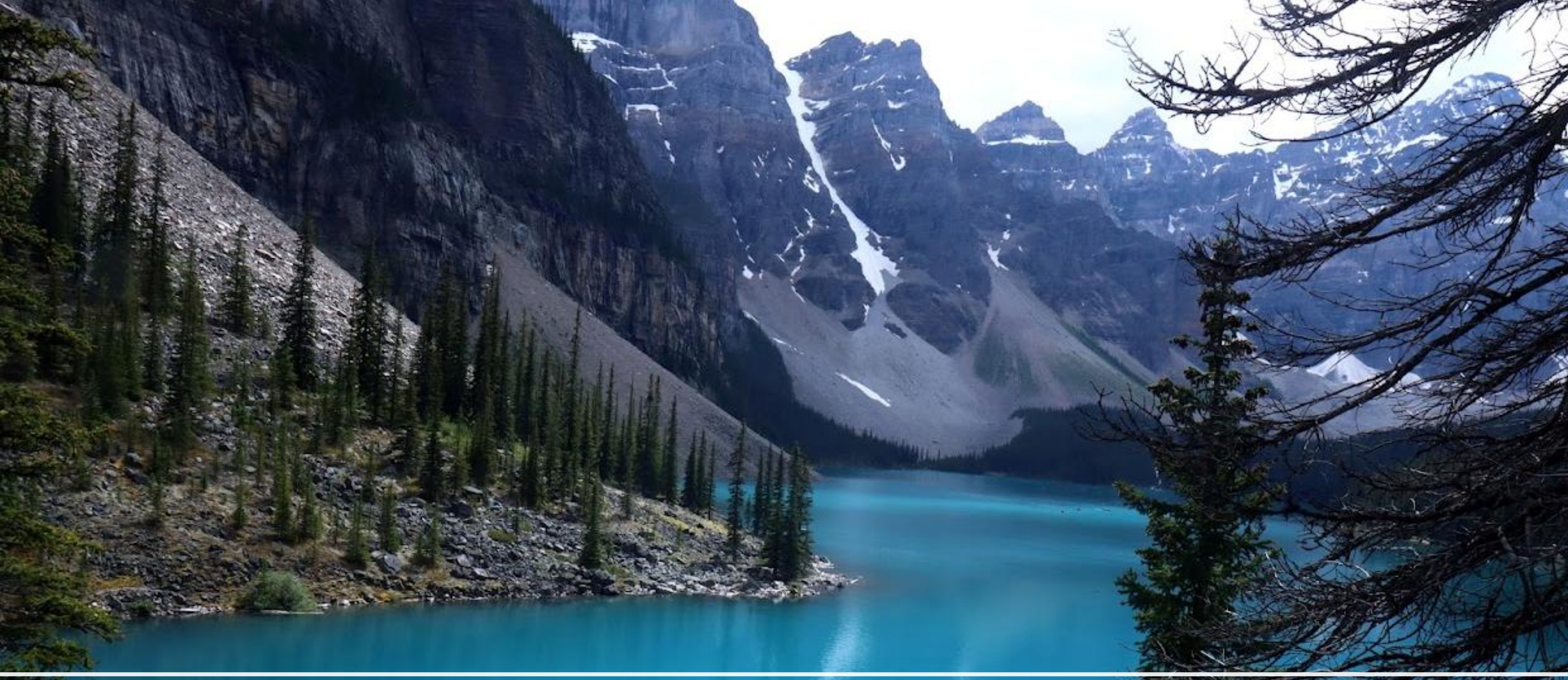


קרו (Horn): כשמספר קרקסים קרחוניים 'נוגסים' בהר מכל עבריו, נותרת פסגה חדה ומשוננת (לדוגמה: המטרהורן).

גב חדיד (Arête): רכס צר דמוי סכין הנוצר מהתרחבות שני קרקסים במדרונות נגדיים.

אוקף (Col): נקודת המפגש של קרקסים היוצרת מעבר הרים רחב (נפוץ מאוד בהרי האלפים).

פיורד (Fjord) - שוקת של זמן: עמקי U שחצבו הקרחונים עמוק מתחת למפלס הים הנוכחי, אליהם חדו חדרו מי הים (לדוגמה: סוגנה-פיורד בנורבגיה, בעומק 1,200 מטר). לעתים נוצרים בקצה הפיורד 'סיפי סלע' (Sills) באזורים בהם הקרחון איבד מעוצמת שחיקתו.

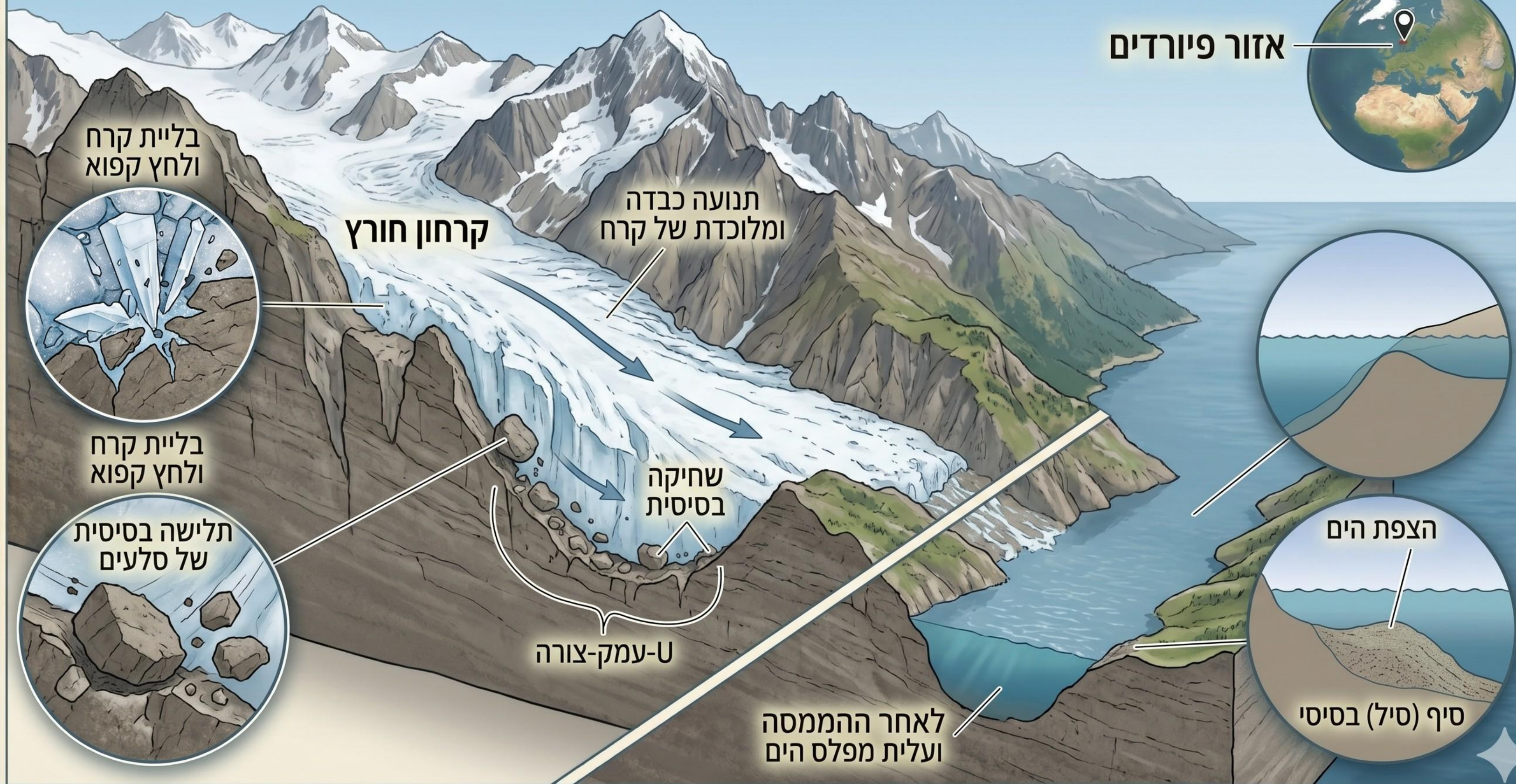


Moraine Lake



היווצרות פיורד: עיצוב קרחוני והצפה

אזור פיורדים



בליית קרח
ולחץ קפוא



קרחון חורץ

תנועה כבדה
ומלוכדת של קרח

בליית קרח
ולחץ קפוא

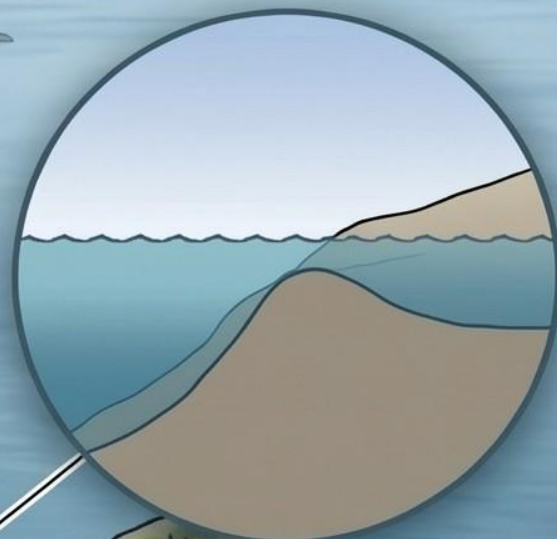


תלישה בסיסית
של סלעים

שחיקה
בסיסית

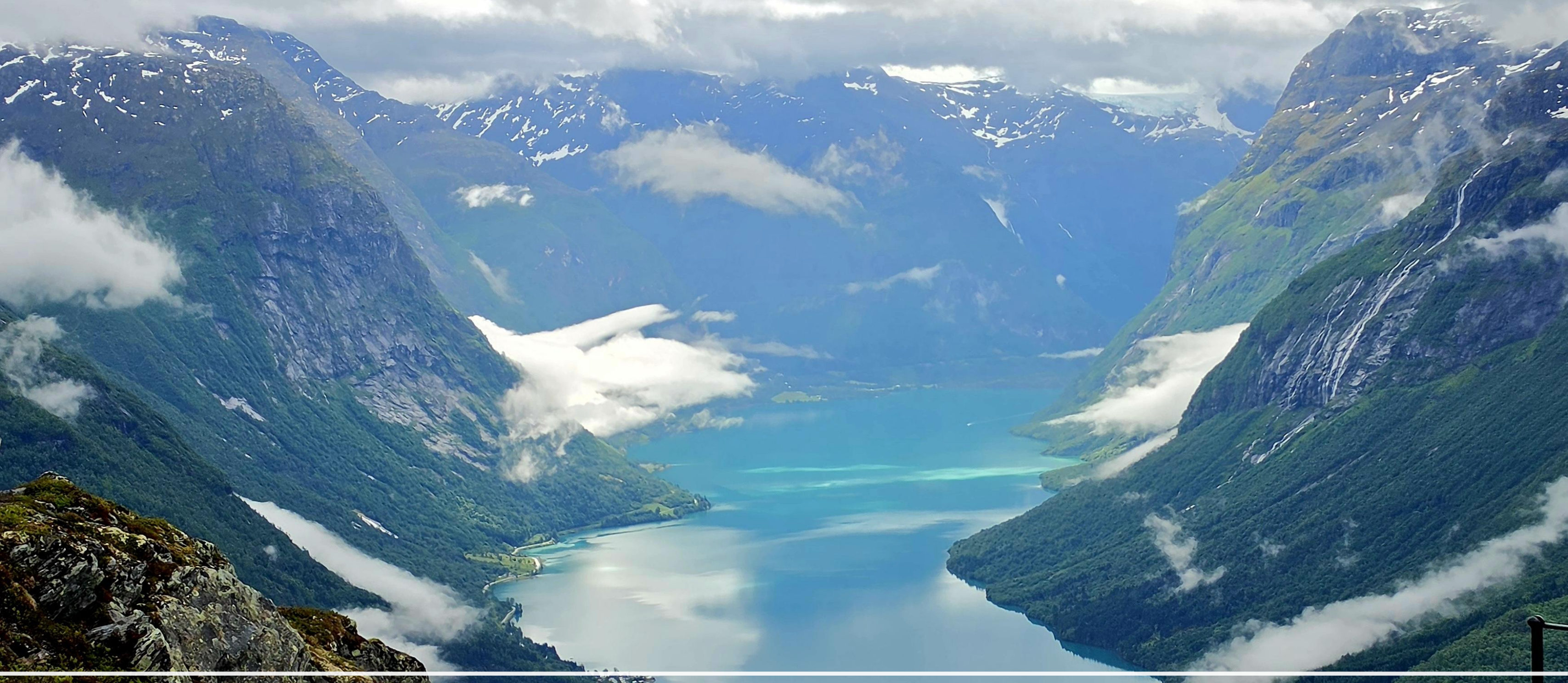
U-עמק-צורה

לאחר ההמסה
ועלית מפלס הים

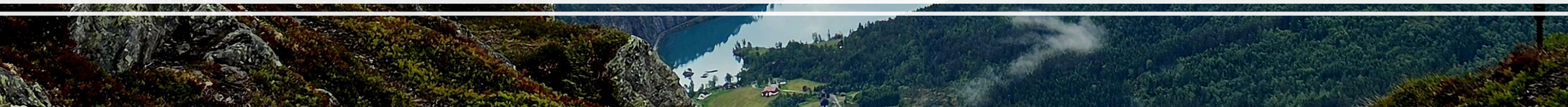


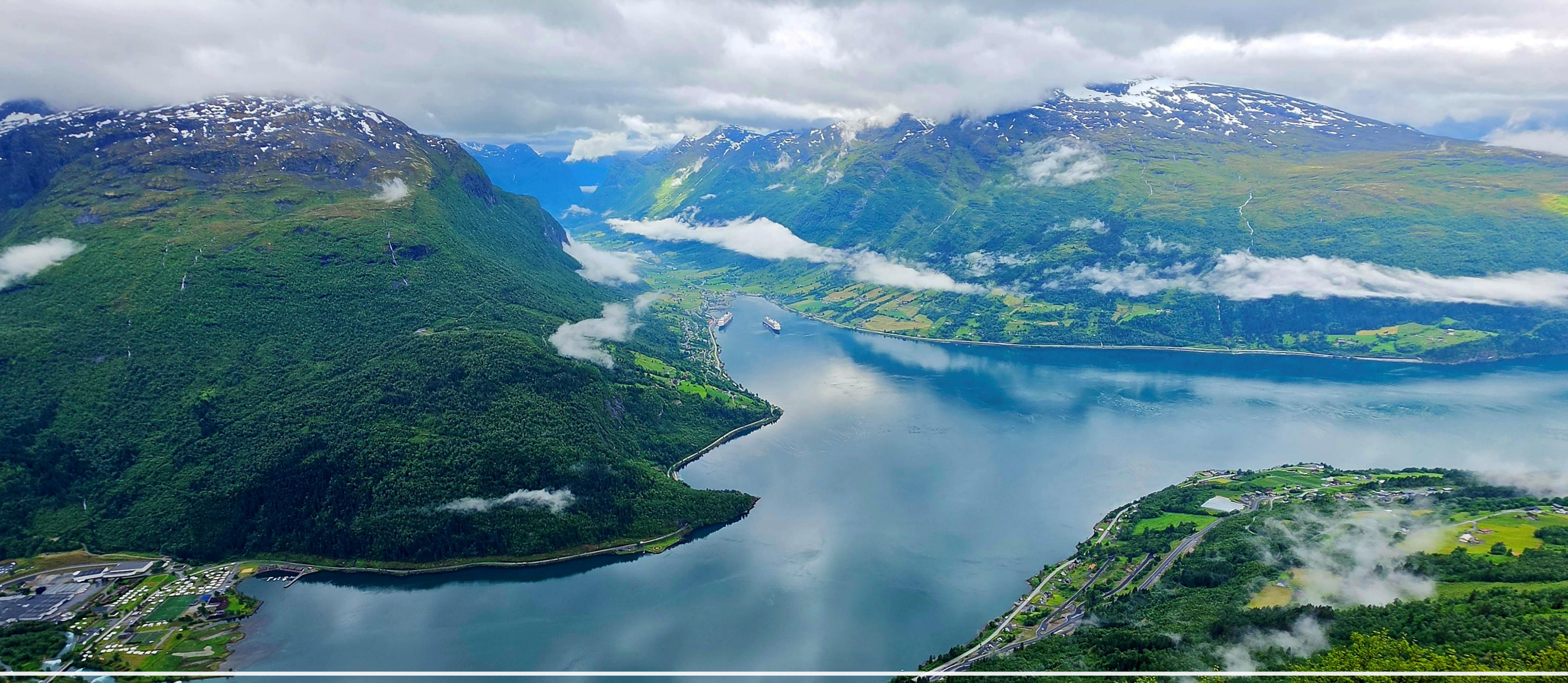
הצפת הים

סיף (סיל) בסיסי



Lovatnet






Innvikfjorden



מסוע האבן: מורינות וקרחוני פסולת

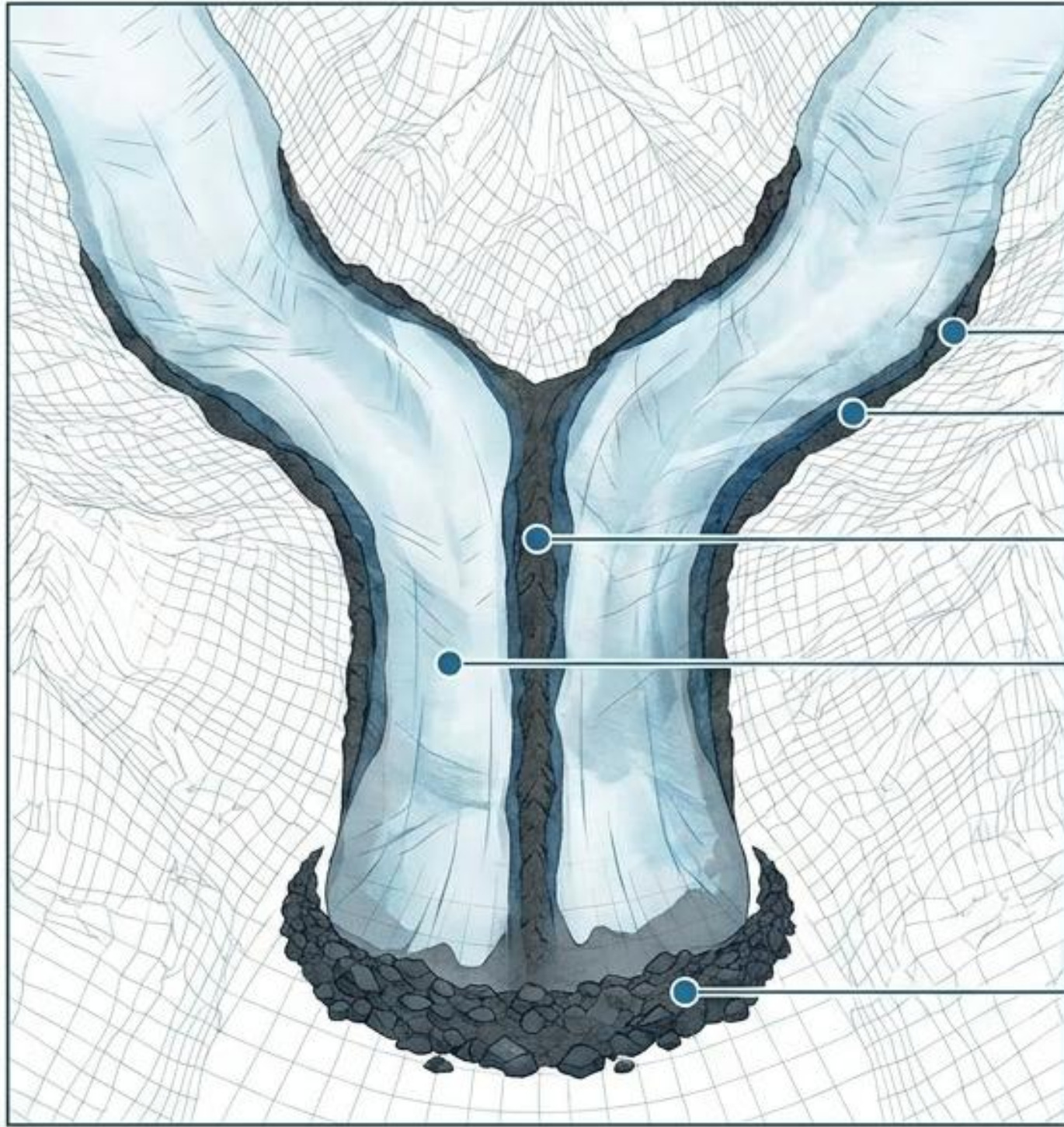
מהי מורינה (Moraine)? החומר הסלעי שנטחן, מוסע ומורבד על ידי הקרחון.

— **מורינה בסיסית:** ציפוי בתשתית. 

— **מורינה צדית:** בפאות הקרחון, עשויה לכסות את הקרח ולהגן מקרינה. 

— **מורינה תיכונה:** נוצרת מחיבור שתי מורינות צדיות כשקרחוני יובל מתמזגים. 

— **מורינת קצה (נסיגה):** קו הרכס הנערם בחזית, המסמן את שיא ההתפשטות. 



פרדוקס קרחוני הפסולת (Debris-Covered Glaciers)

שכיחים במיוחד בהימלאיה.

- **שכבת אבן דקה** (סנטימטרים): בולעת קרינה ומאיצה את המסת הקרחון מתחתיה.

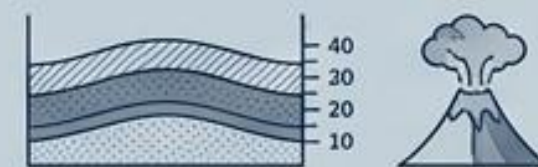
- **שכבת אבן עבה** (עשרות סנטימטרים): פועלת כשמיכת בידוד מצוינת ומאיטה את ההמסה משמעותית. מקשה מאוד על חיזוי מאזן המים באזור.

קפסולת הזמן: הקרח כארכיון אקלימי

שכבות השלג הדחוסות מכילות את העדות ההיסטורית המדויקת ביותר לעברו של כדור הארץ.

שכבות אפר וולקני: תיארוך מוחלט.

התפרצויות הרי געש השאירו חותם ספציפי המאפשר "לספור שנים" (בדומה לטבעות עצים, תוך הבחנה בין שכבות חורף לקיץ).



פחמן 14 (C-14):

מתארך חומרים אורגניים שנקברו בקרח (עלים, חרקים) ומספק מהימנות גבוהה עד ל-50,000 שנה אחורה.



בועות אוויר כלואות: ארכיון אטמוספרי מובהק.

הבועות מאפשרות מדידה ישירה של ריכוזי פחמן דו-חמצני ומתאן באטמוספירה מלפני מאות אלפי שנים.



איזוטופ חמצן 18 (O-18): "מדחום גלובלי".

יחס האיזוטופים בקרח מעיד במדויק על הטמפרטורה ששררה בעת ירידת השלג.



משבר מואץ: לולאת המשוב של האלבדו (Albedo)



הקרחונים הם הסמן הרגיש ביותר באקלים העולמי מכיוון שהם אינם רק מגיבים להתחממות, הם מאיצים אותה כשהם נעלמים.

משבר מגדלי המים: צימאון ושיטפונות

תלות באספקת המים

- בין 1.5 ל-2 מיליארד בני אדם תלויים במים שמקורם בקרחוני הרים ושלג (אגני ההימלאיה, האנדים, האלפים).

- אף על פי שעיקר הספיקה מגיעה משלג עונתי, נסיגת הקרחונים תוביל תחילה לגאות נהרות כוזבת, ולאחריה צניחה דרמטית בשפיעת נהרות כגון הגנגס והאינדוס.

סכנת שיטפונות GLOF

- אגמים קרחוניים (Glacial Lakes): נסיגת הקרח משאירה אחריה אגמים הכלואים בתוך 'סכר' טבעי של אבני מורינה.

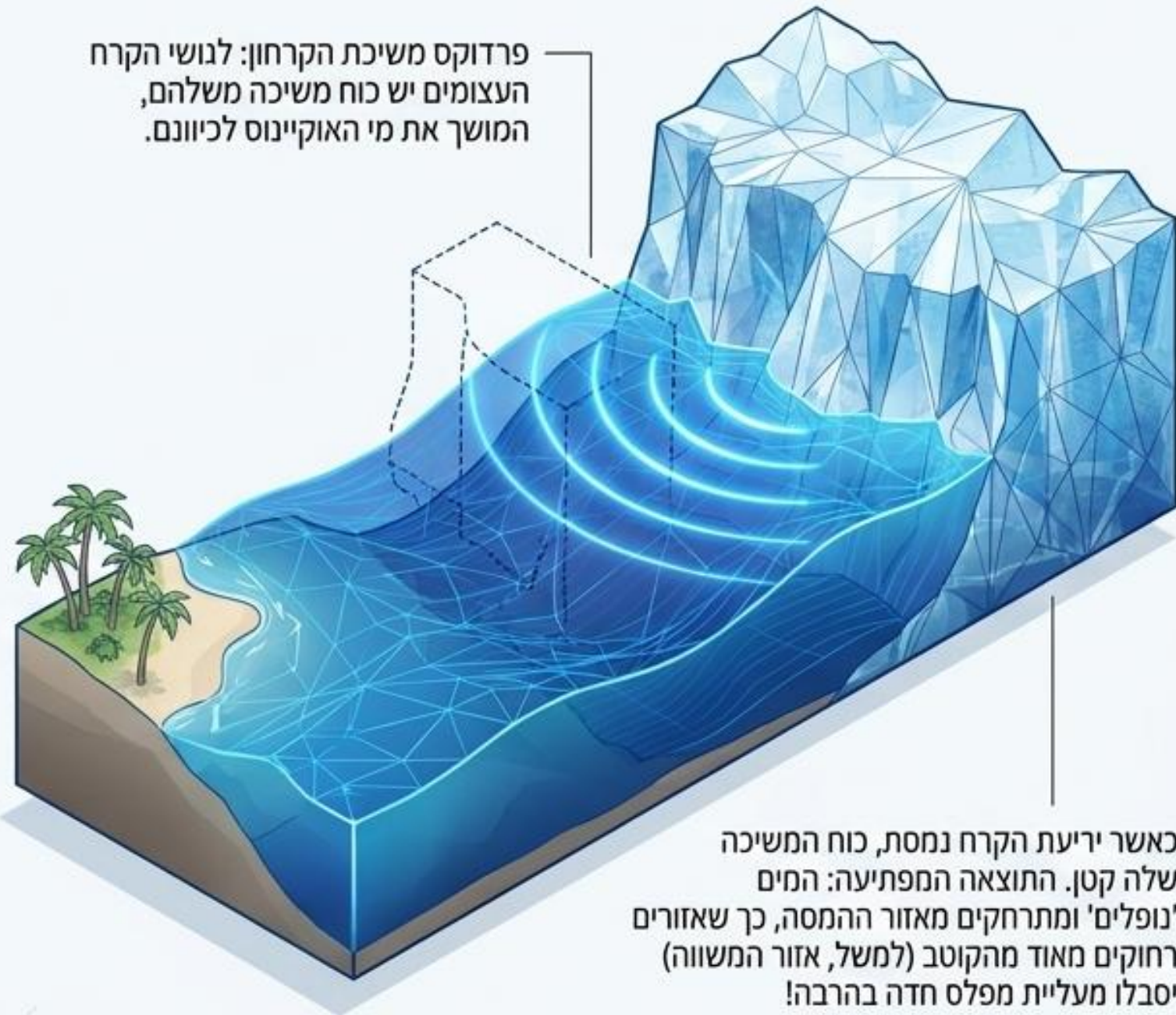
- סכנת GLOF (Glacial Lake Outburst): כאשר הסכר המוריני קורס (מעומס מים, נפילת סלעים, המסה מהירה או רעידת אדמה), מיליוני קוב מים משתחררים בגל צונאמי יבשתי ההורס כפרים ותשתיות עשרות קילומטרים במורד העמק.



מפלס הים: האיום הנסתר ופרדוקס הכבידה

פרדוקס הכבידה

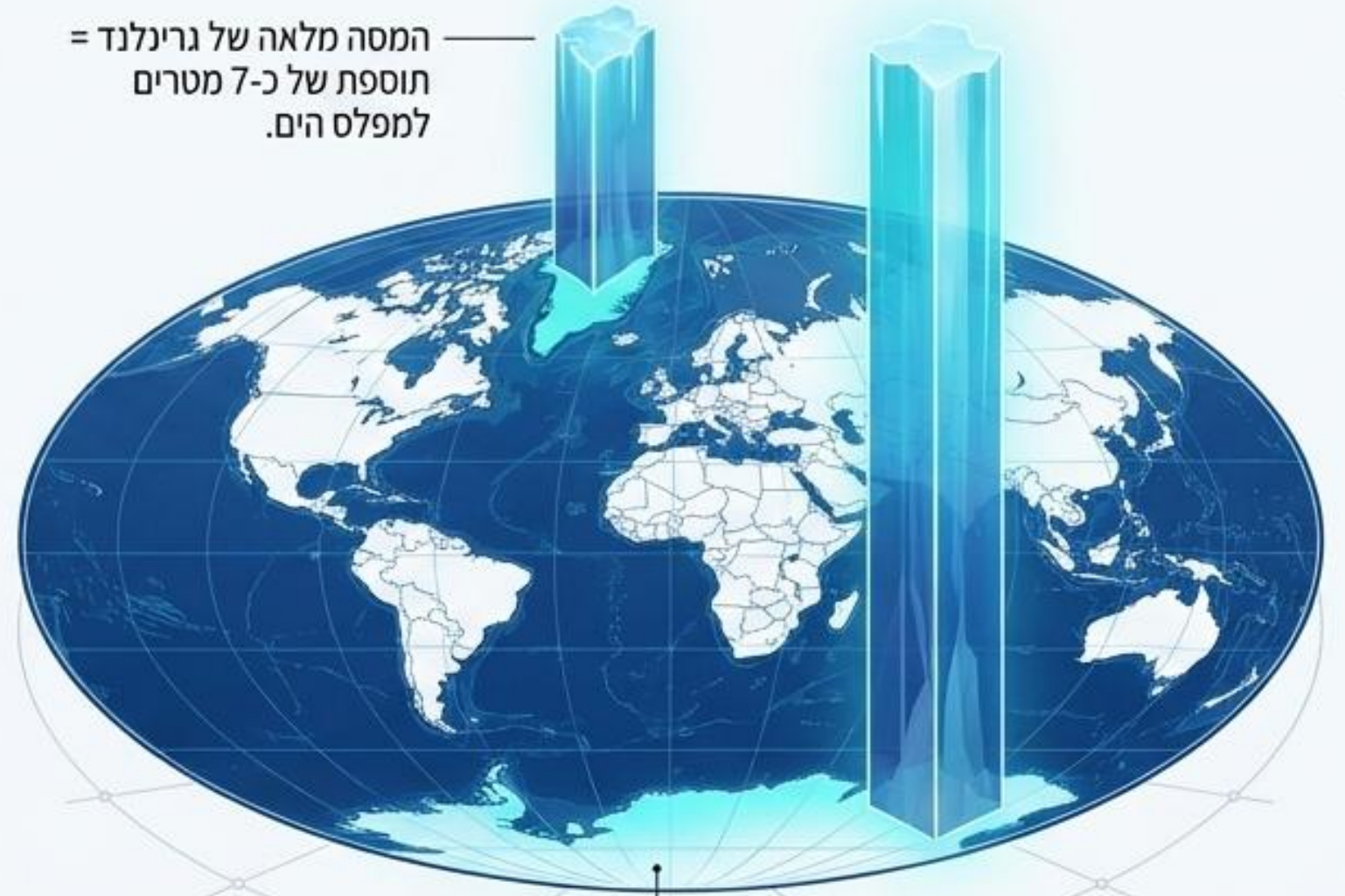
פרדוקס משיכת הקרחון: לגושי הקרח העצומים יש כוח משיכה משלהם, המושך את מי האוקיינוס לכיוונם.



כאשר יריעת הקרח נמסת, כוח המשיכה שלה קטן. התוצאה המפתיעה: המים 'נופלים' ומתרחקים מאזור ההמסה, כך שאזורים רחוקים מאוד מהקוטב (למשל, אזור המשווה) יסבלו מעליית מפלס חדה בהרבה!

חישוב הנפח

המסה מלאה של גרינלנד = תוספת של כ-7 מטרים למפלס הים.



המסה מלאה של אנטארקטיקה = תוספת של כ-58 מטרים.

סה"כ פוטנציאל: 65 מטר.
(הערה: קריסת מדפי הקרח הצפים לא מעלה את המפלס ישירות, אך מסירה את 'פקק התנועה' שמונע מהקרח היבשתי להחליק לאוקיינוס).

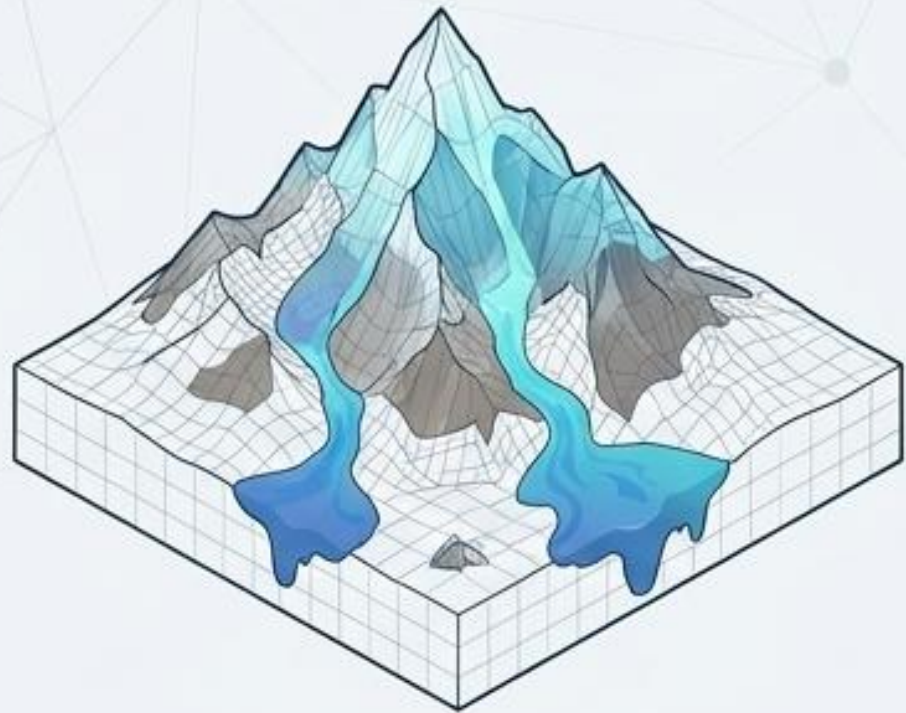
תגובת השרשרת: זרמי אוקיינוס וזינוק יבשתי



1. בלימת זרמי הים (The AMOC Disruption):
מי ההמסה מגרנלנד הם מים מתוקים וקלים, הצפים מעל המים המלוחים. שכבה זו פוגעת במנגנון השקיעה של מים קרים, ומחלישה את ה-AMOC (מחזור המים המוביל חום מהטרופיקה לצפון). הפרדוקס: המסת הקרחונים עשויה להוביל להתקררות מקומית משמעותית בצפון אירופה, למרות ההתחממות הגלובלית!

2. גרר פוסט-גלציאלי (Post-Glacial Rebound):
משקל יריעות הקרח בעידן הקרח דחס את קרום כדור הארץ מטה. עם המסת הקרח, הקרום ה'משוחרר' מזנק מעלה. בסקנדינביה היבשה ממשיכה להתרומם בקצב של 8-10 מ"מ בשנה עד היום. (עליית המפלס בחופי ישראל היא גלובלית, ולא מקומית).

המאה ה-21: האם אנו חוזים בסוף עידן הקרח?

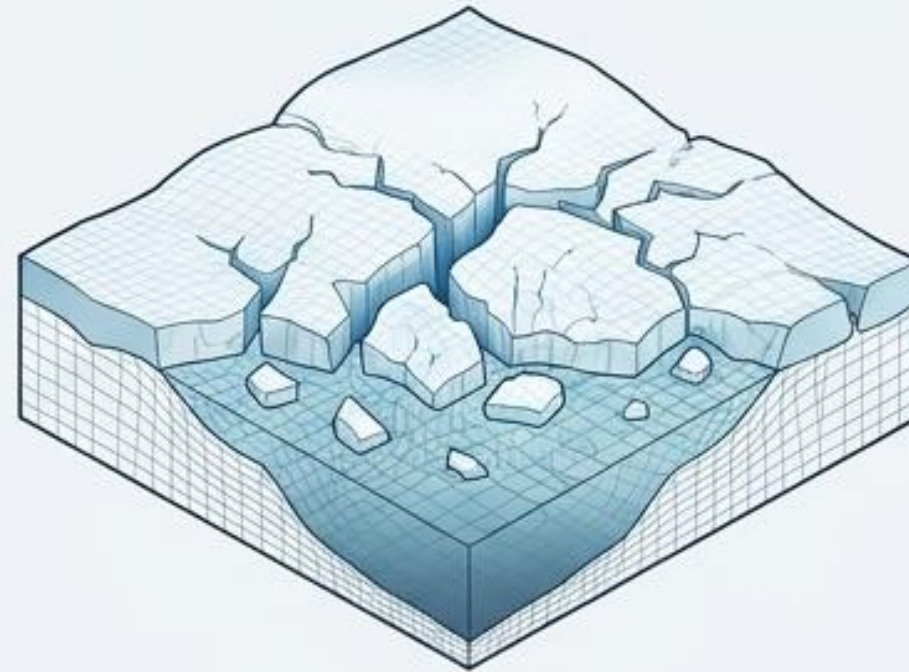


בסכנה מיידית

הרי האלפים (בסכנה מיידית):
מרבית הקרחונים האייקוניים צפויים להיעלם לחלוטין עד סוף המאה. אובדן תרבותי וגיאולוגי.

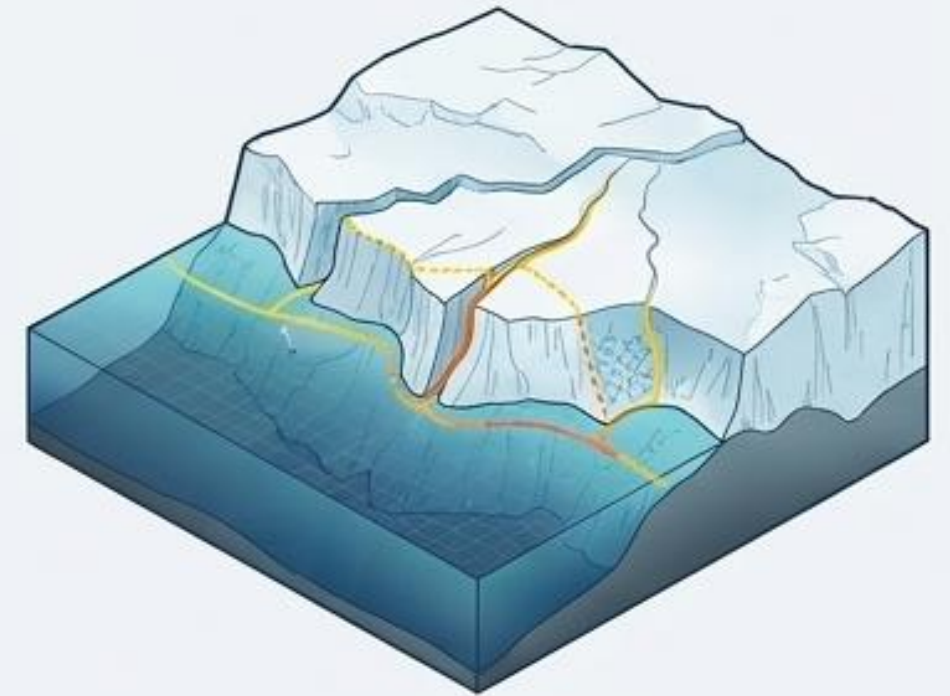


המרוץ לארקטיקה: נסיגת קרח הים פותחת מסלולי ספנות חדשים וגישה למשאבי תת-הקרקע, ויוצרת זירת תחרות גאופוליטית מתוחה.



מעבר לנקודת האל-חזור

גרינלנד (מעבר לנקודת האל-חזור):
המסה מואצת שכבר אינה הפיכה, גם אם ההתחממות תיעצר היום. תוביל בטווח הארוך לעליית מספר מטרים במפלס הים.



אי-הוודאות הגדולה

אנטארקטיקה מערבית (אי-הוודאות הגדולה):
'קרחון יום הדין' (ת'וויטס - בגודל של בריטניה) מאבד מסה בקצב מדאיג. קריסתו עלולה להפעיל שרשרת התמוטטויות (סיכון מהיר ל-2 מטרים נוספים).

הקרחונים הם לא רק שריד של העבר; הם המערכת שמכתיבה את האסטרטגיה, הכלכלה וגבולות המחר. הבנתם היא הצעד הראשון להבנת עתידנו.