
KVARTAR 3-Ledeniki

2 letnik Bolonjskega študija Geologije, 2016/2017
red.prof.dr. Andrej Šmuc



Ledeniki

Ledeniki aktivno predelujejo naše površje. Ponekod erodirajo velike količine podlage, drugod le to odložijo. S svojimi morenami ter ledom na Antarktiki in Grenlandiji predstavljajo tudi izredno pomembne paleoklimatske arhive.

Ledeniki so tudi občutljivi barometri klimatskih sprememb. Neprestano rastejo, se umikajo v odvisnosti od temperature, sneženja in drugih faktorjev. Tako lahko opazimo, da so v različnih obdobjih človeške zgodovine ledenike obravnavali zelo drugače.

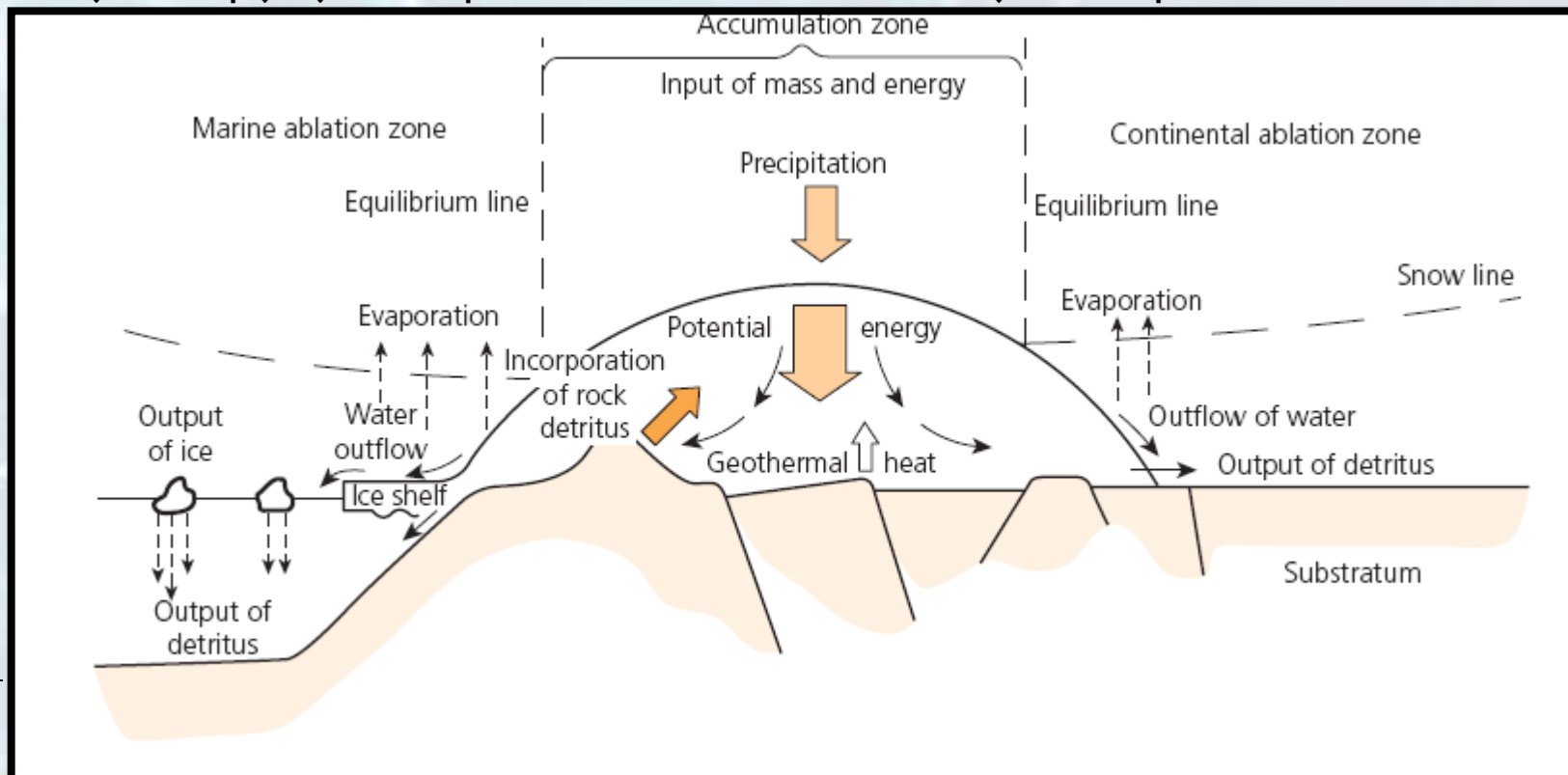
V času male ledene dobe so ledeniki predstavljali grožnjo, danes pa jih smatramo za bolj benigne tvorbe, ki so na robu izumiranja.



Ledeniki kot sistem

Ledenike ponavadi obravnavamo kot sistem, v katere opazujemo kaj v sistem prihaja, kaj iz njega odhaja ter kakšne so interakcije sistema z okolico (atmosfera, oceani, rekami, pokrajino)

Ledniki dobivajo maso preko snega ter kamninskega drobirja. Ker so ponavadi visoko, imajo veliko potencialno energijo, ki jo trošijo, ko se lednik premika navzdol. Energija se porablja za topljenje, transport in se iz sistema odstranja kot toplota ali voda.

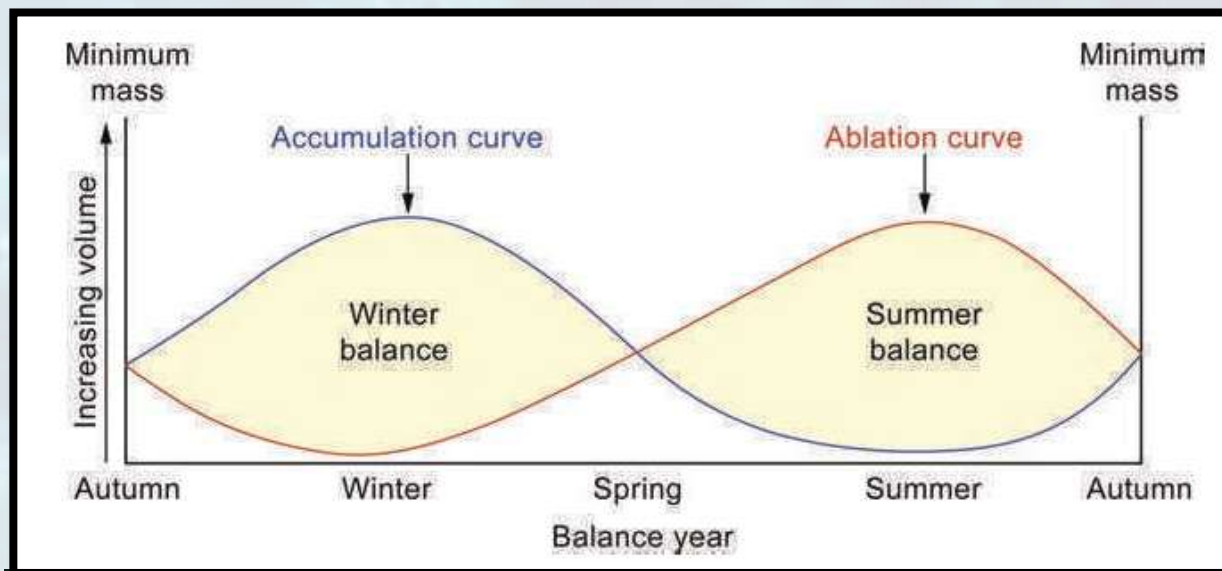


MASNA BILANCA

Ledeniki začnejo nastajati tam kjer se akumulira sneg, ki se nato kompaktira in spremeni v led. To se lahko zgodi v katerem koli klimatskem pasu kjer padavine presegajo taljenje. Čas v katerem nastane ledenik je odvisen od hitrosti padavin in hitrosti spreminjanja snega v led. Če je ta hitrost, velika in hitrost taljenja majhna, bo ledenik nastal hitro.

Ko enkrat ledenik nastane pa je njegova usoda odvisna od ravnotežja med akumulacijo in taljenjem (ablacijo). To ravnotežje imenujemo **masna bilanca** in je v veliki meri odvisna od klime.

Slika prikazuje celoletno bilanco padavin in ablacije. Če je skupni seštevek enak nič, potem je ledenik v ravnovesju in ne napreduje, niti se ne umika.



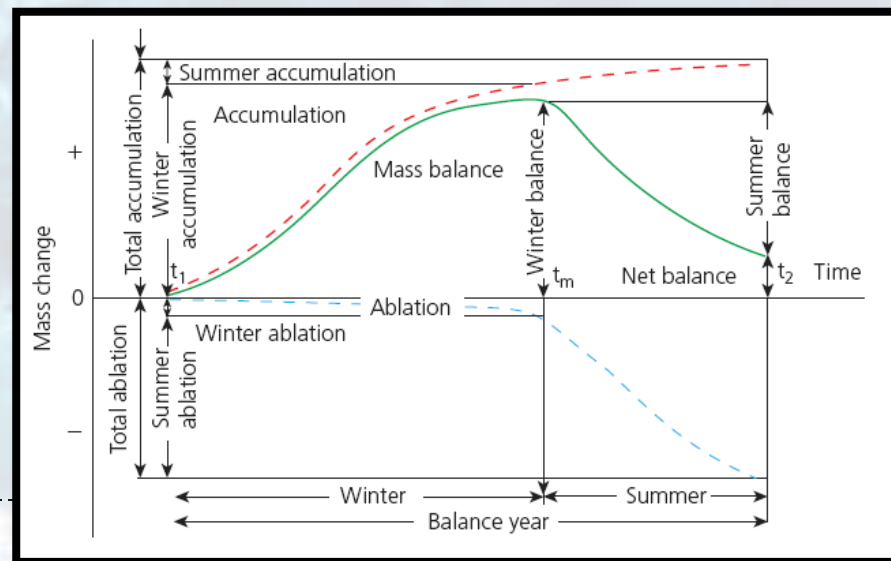
Masna bilanca: definicija

Z **masno bilanco** imenujemo sprememo mase celotnega ledenika v definiranem časovnem obdobju. Običajno je to obdobje enega leta, čeprav se uporabljata dve definiciji 'leta'.

Stratigrafska metoda: tu smatramo za leto interval med dvema zaporednima minimuma v masi ledenika, kar nam da zelo dobro oceno izgube ali pridobivanja mase ledenika. V srednjih in visokih širinah je to v jeseni, ko se zaključi ablacija, akumulacija pa se še ne začne. Kjer poteka akumulacija ledenikov, so ti minimumi vidni med plastmi ledenika in od tod tudi ime stratigrafska metoda.

Koledarska metoda: leto je definirano kot perioda med 1 oktobrom in 30 septembrom.

V visokih in srednjih širinah pogosto uporabljamo poletno (ablacija) in zimsko (akumulacija) bilanco 'Srednjo specifično masno bilanco' pa izračunamo tako, da celotno masno bilanco ledenika delimo z njegovo površino.



Akumulacija snega in ledu

Osnovni vir akumulacije na ledeniku predstavlja sneženje. Ali padavine padajo v obliki snega ali dežja je seveda odvisno od temperature na površini, vendar je odnos bolj zapleten kot le več ali manj kot 0°C (zaradi tega ker temperature padavin niso iste kot temperatura ozračja).

Največje količine padavin so vezne na obmorska gorovja (Patagonija, Nova Zelandija, južna Islandija ipd.) kjer pogosti cikloni v povezavi z orografskim efektom povzročijo izjemne količine padavin. Te ponekod dosegajo celo 15 000 mm/leto.

Obratno, pa na območjih, ki so oddaljena od morske vlažnosti, prihaja le do majhnih padavin. Notranjost Antarktike so tako eno izmed najbolj puščavskih okolij na Zemlji.

Lokalno pa lahko vzorce padanja spremenijo tudi vetrovi in snežni plazovi, ki prerazporedijo sneg.



Metamorfoza snega

Če količina snega presega poletno topljenje se začne nalagati v obliki letnih plasti., ki se na določeni globini spremenijo v led. Sneg, ki preživi sezono topljenja imenujemo FIRN.

Sprememba snega v led se začne, ko se zmanjša volumen zračnih por. Svež sneg ima namreč gostoto od 50–200 kg/m³, firn 400–830 kg/m³, medtem ko ima ledeniški led gostoto 830–910 kg/ m³.

Sprememba iz firna v sneg se zgodi, ko povezane zračne pore postanejo izolirani zračni mehurčki v ledu. Nadaljne višanje gostote gre na račun stiskanja mehurčkov in višanja pritiska znotraj le teh.

Metamorfoza, ki spremeni sneg v led in čas v katerem se to zgodi, sta odvisna od klimatskih pogojev. Kjer klima dovolj hladna, da ne dovoljuje letnega topljenja so ti procesi počasni, kjer pa se zgodi topljenje, pa se sneg hitro spremeni v led.



Benn & Evans, 2013

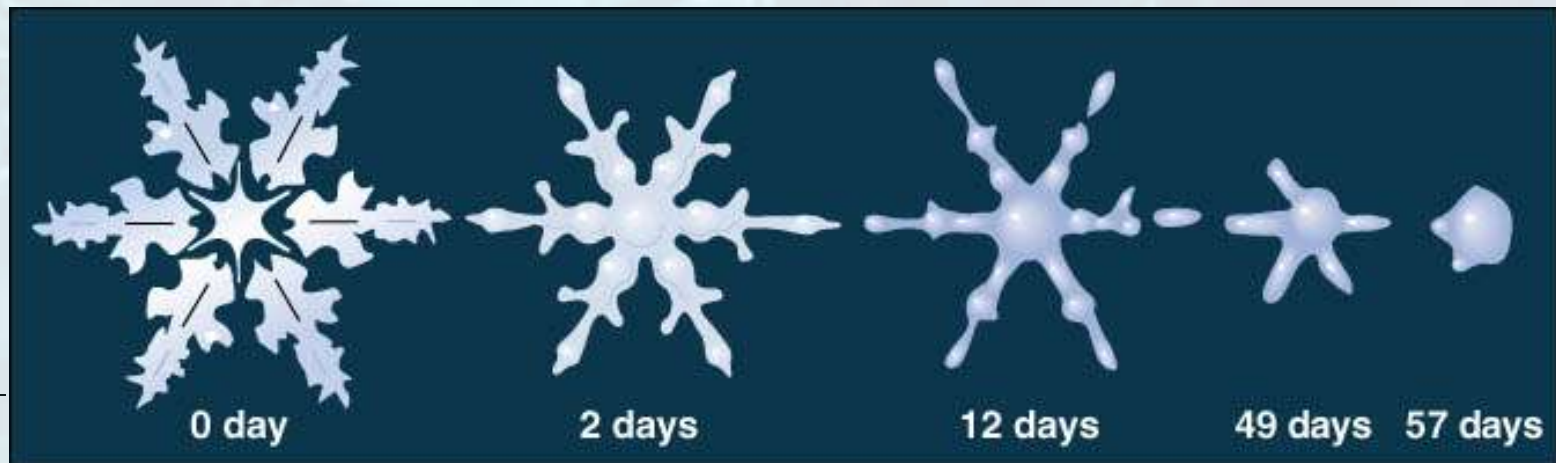


Metamorfoza snega: hladne razmere

Kjer ne prihaja (ali le redko) do taljenja so glavni mehanizmi povečanja gostote snega vezanai na prestrukturiranje zaradi vetra, premikanja kristalov relativno eden do drugega, spremembi v velikosti in obliki kristalov ter notranje deformacije kristalov

Veter razbija snežinke v manj razvejane oblike, ki lahko dosegaajo bolj gost zlog. Ko se sneg enkrat odloži se gostota večja na račun kompaktacije in premikanja kristalov v bolj gost zlog. Kompaktacija se tako večja s prekritjem. Oblika in velikost kristalov se tokom kompaktacije tudi menja. Kristali postajajo vse manj razvejani (migracija molekul). Omenjene spremembe so pomembne predvsem v prvih fazah, ko je še vedno na voljo veliko prostora.

Nadaljnje spremembe pa so večinoma na račun internih deformacij kristalov ter njihovega leženja.

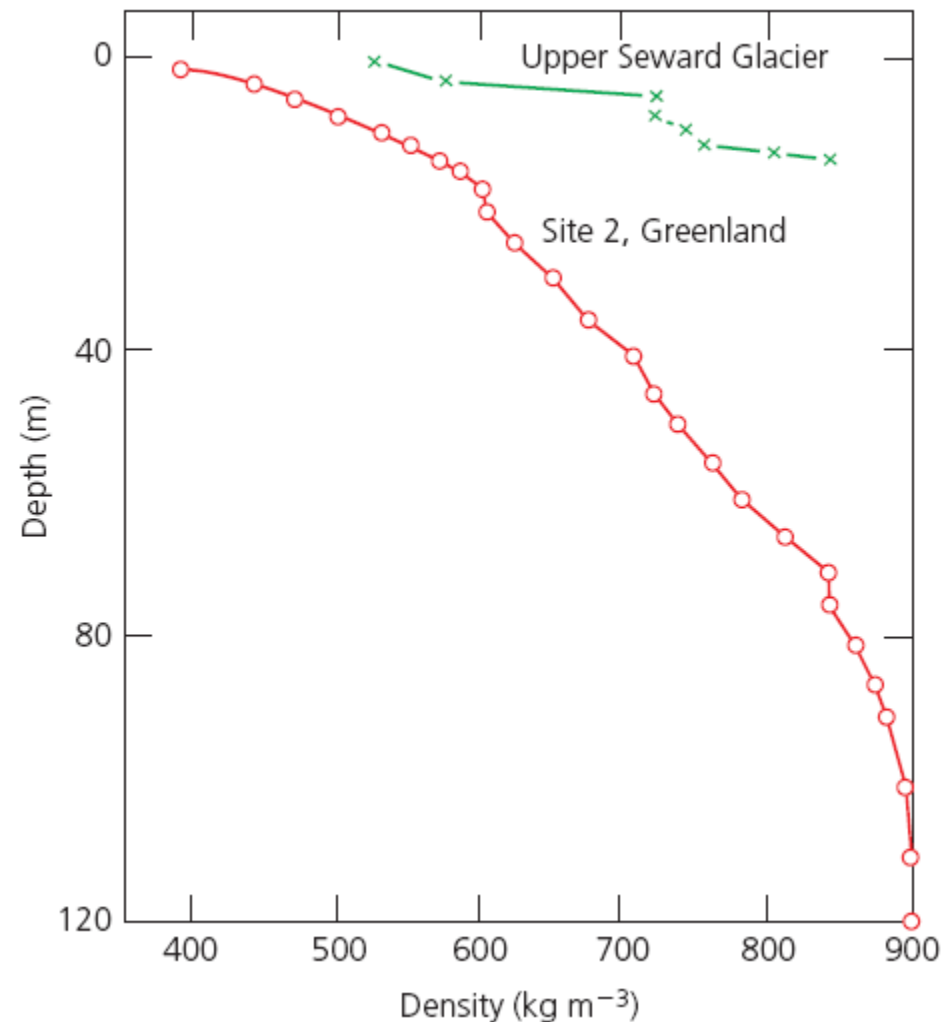


Metamorfoza snega: tople razmere

Sprememba snega v led je občutno hitrejša, če na ledeniku pride do raztapljanja (in kasnejšega ponovnega zmrzovanja).

Kjer se dogaja taljenje na površini, voda pronica navzdol in zapolnjuje proste pore v snegu ter izriva zrak na površje. Če ima sneg nizke temperature, potem voda ponovno zmrzne v kompaktno ledeno telo.

Na tak način se tvori led občutno hitreje. Tako se recimo sprememba v led na ledeniku Seward Aljaska zgodi v 3-5 letih, medtem ko ta proces v notranjost Antarktične ledene police traja tudi 3500 let.

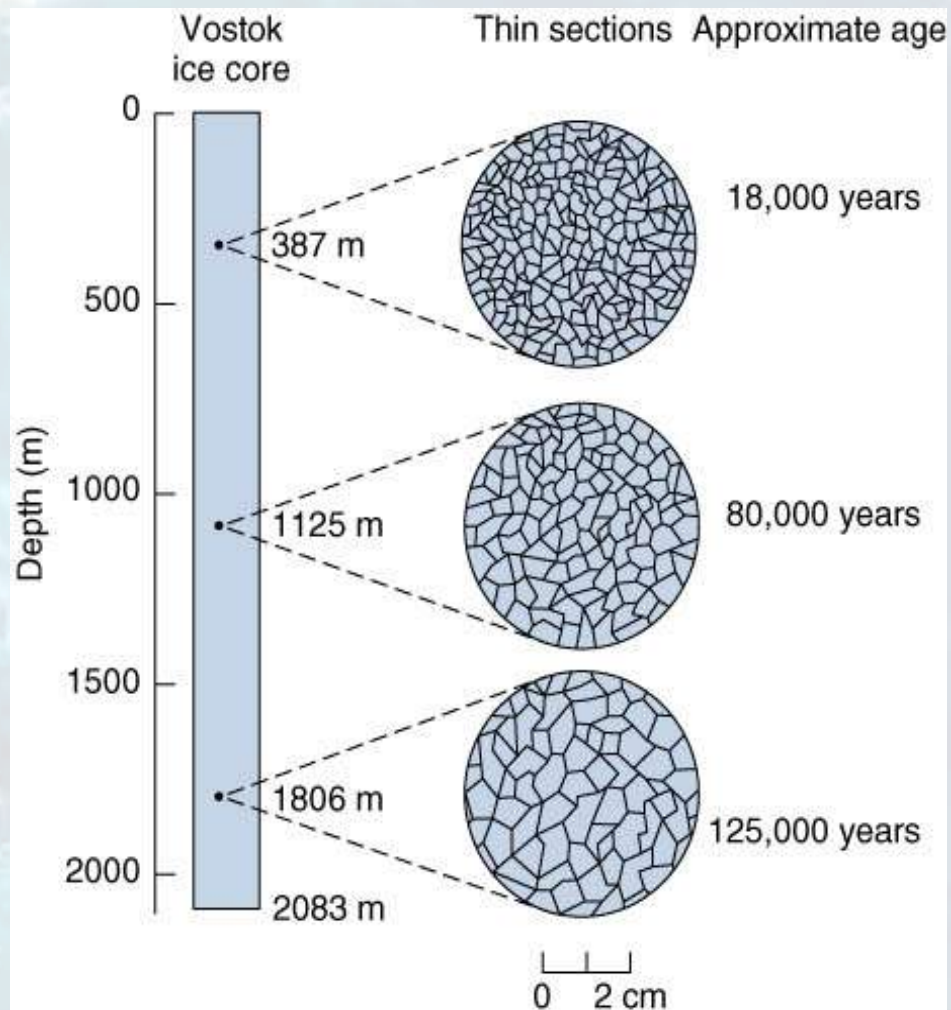


OBLIKA LEDENIH KRISTALOV

V zgornjih 20m v ledeniku se tvorijo homogeni, drobnozrnati ledeni kristali, ki nastanejo zaradi rekristalizacije v coni majhnih napetosti.

V večjih globinah pa začnejo nastajati večji kristali zaradi dinamične rekristalizacije ob povečanih napetostih. 33m globine pomeni začetek obsežne dinamične rekristalizacije in tu pride do hipnega povečanja kristalov

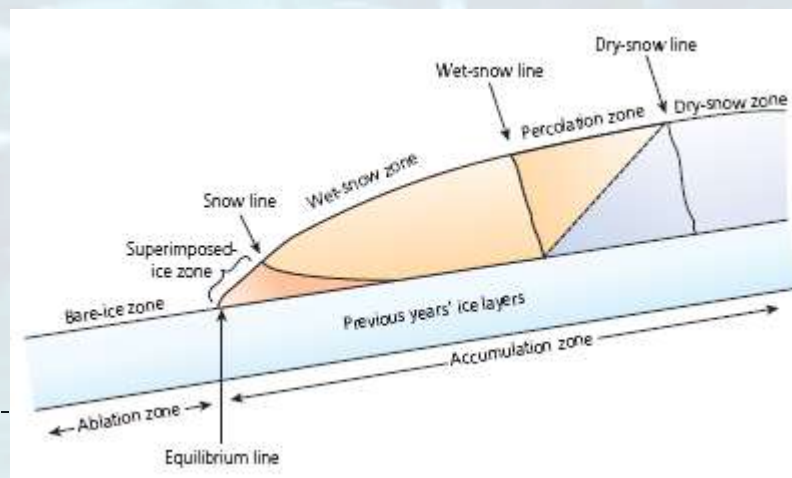
V bazalnih delih ledenikov pa je led sestavljen iz večjih, med seboj prepletenih ledenih kristalov, kar kaže na kontinuirano deformacijo znotraj bazalne cone ledenika



Snežni in ledeni faciesi

V bližini površine ledenika različni procesi metamorfoze povzročijo nastanek različnih faciesov ledu in snega (imenovane tudi cone ledu in snega).

Facies suhega snega nastaja tam, kjer je T vseskozi pod 0 C in ne prihaja do taljenja. Tak sneg najdemo le zelo mrznih predelih (notranjost Grenlandije in Antarktije in na visokih nadmorskih višinah). **Facies pronicanja** nastaja tam, kjer se del snega na površju stopi in pronica v notranjost ledenika, kjer ponovno zmrzne in tvori žile in leče. **Facies mokrega snega** nastaja tam v nižjih predelih, kjer je taljenje na površini tako, da voda pronica do baze lednika. **Facies prekrivnega ledu** nastane, kjer pride do obsežnega ponovne zmrznitve vode, na bazi snega. Ob tem se sproža latentna toplota, ki povzroči dodatno topljenje. Če celotna T v smegu naraste nad 0 , ne bo več ponovnega zmrzovanja. Voda lahko ostane v snegu ali pa odteče.



Masna bilanca ledenika: ablacija

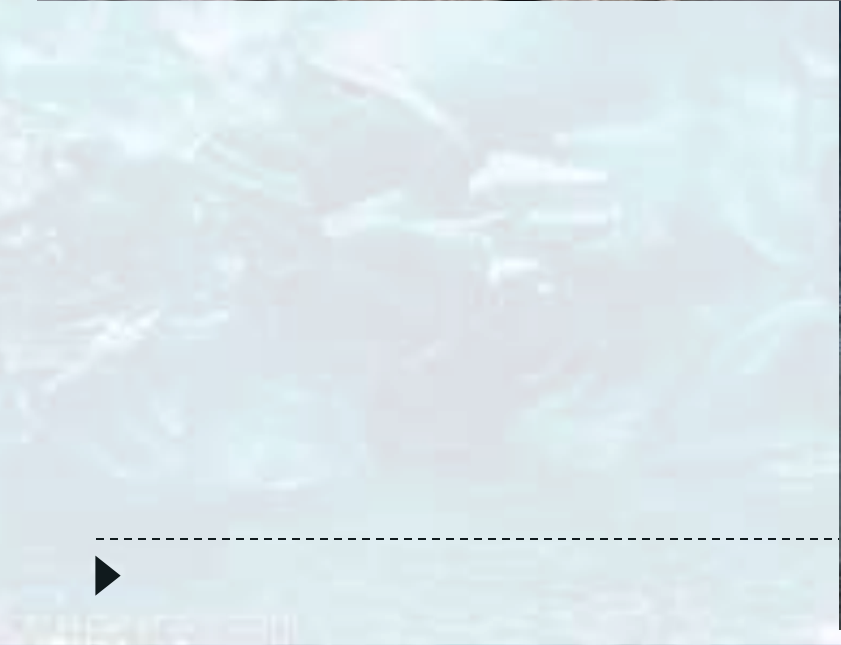
Z izrazom **ABLACIJA** imenujemo vse procese, s katerimi se sneg in led odstranjata iz ledenika. Ti procesi so topljenje, evaporacija, sublimacija, erozija z vetrom, lom ledenih gora v vodnih okoljih ali ledeni plazovi na robovih ledenikov v kontinentalnem okolju.

Ledenica nastaja neposredno s taljenjem ledu na površju ali pa v notranjosti ledenika. Na površini je to funkcija sončne energije in je sezonsko pogojen, medtem ko je v dnu ledenika to odvisno od: trenja ledu in podlage, trenja znotraj ledu in geotermične energije. Pomembno je to, da taljenje ne poteka le na robovih ledenika, pač pa v celotni ledeni površini.

Kjer se ledniki končajo v morju ali jezeru, se bodo na koncu ledenika lomili večji kosi ledu (calving) in postali ledene gore. Preko tega procesa, lahko lednik zelo hitro izgubi veliko ledu.

V zelo hladnih in suhih okoljih, pa poteka tudi sublimacija (evaporacija vode neposredno iz ledu).



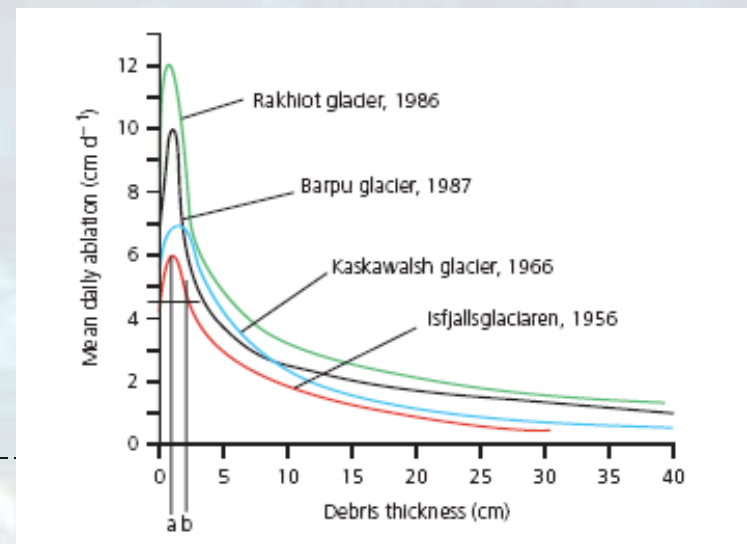


ABLACIJA: vpliv drobirja na ledeniku

Prisotnost drobirja na površini ledenika ima pomemben efekt na energijsko ravnovesje na površini ledenika in s tem na hitrost ablacije.

Obstaja ne-linearen odnos med debelino drobirja ter hitrostjo taljenja. Če je debelina drobirja tanka, se hitrost ablacije večja, do največje vrednosti pri 2cm. Če je debelina drobirja večja, hitrost ablacije eksponentialno pada.

Razlog za to je najdemo v dejstvu, da drobir dvojno vpliva na ablacijo. Običajno imajo kamnine manjši albedo, kot sneg ali led in zato absorbirajo več kratkovalovnega sevanja in s tem povečajo količino energije, ki je na voljo za topljenje. Po drugi strani, pa deluje drobir kot termalna bariera med ledom in atmosfero in znižuje prehod energije na površini ledu.



Meritve masne bilance ledenikov

NEPOSREDNE MERITVE

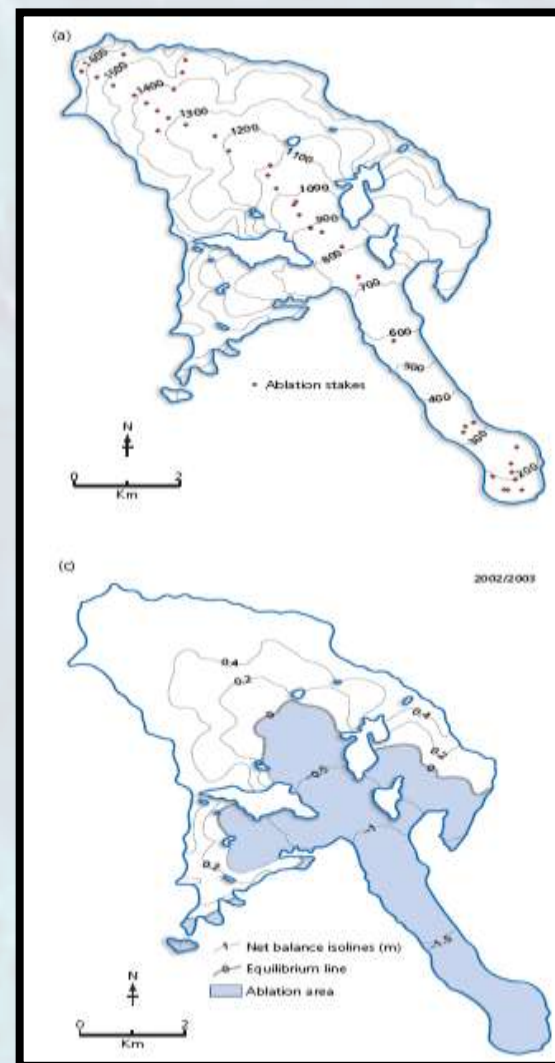
Neposredne glaciološke meritve so seveda vezane na terenske meritve akumulacije in ablacije.

Akumulacija se ponavadi meri v izkopanih jamah ali izvrtanih jedrih. Letni prirastki so vidni v snežnih 'varvah', ki jih med seboj ločimo po velikosti snežnih kristalov ali plasteh, 'svinjarije' iz obdobja topljenja.

Ablacijo pa se meri z uporabo sider (palic), ki se jih v sneg zabije pred topljenjem in nato na njih odčita primankljaj.

Vse meritve so točkaste in totalno masno bilanco ledenika lahko dobimo z interpolacijo, kar pomeni napako.

Danes v svetu neposredno merijo 280 ledenikov, vendar so le 86 v primerih preko daljšega časovnega obdobja (10 let).



Meritve masne bilance ledenikov

POSREDNE MERITVE

Med posredne meritve štejemo hidrološke, geodetske ter gravimetrične metode.

Hidrološke metode temeljijo na dejstvu, da letna masna bilanca ledenika pomeni spremembo v shranjeni vodi v zaledju ledenika. Masno bilanco ledenika lahko izračunamo, če poznamo vse ostale hidrološke paramere.

Geodetske metode ugotavljajo masno bilanco ledenikov na podlagi aerofoto ter satelitov, s katerimi lahko izračunamo spremembe volumna ledenika, ki se preko gostote spremenijo v masno bilanco. Te metode imajo prednost, saj pokrivajo večje dele ledenike, vendar pa imajo tudi napake, predvsem v oceni gostote.

Gravimetrične metode (Gravity Recovery and Climate Experiment: GRACE), s katerimi ugotavljamo majhne spremembe v Zemljinem gravitacijskem polju.



Masna bilanca ledenika

Akumulacija in ablacija ne potekata na istih območjih ledenika. Ponavadi se količina letne ablacije in akumulacije spreminja z višino (pogosto pa je ta preprost vzorec dodatno zakompliciran zaradi lokalnih vplivov).

Generalno gledano pa akumulacija poteka v višjih delih ledenika, medtem ko ablacija poteka večinoma v končnih delih ledenika, kjer je dovolj toplo, oziroma se led lahko lomi.

Prav ta prostorska razlika med enim in drugim ter gravitacija povzročijo, da ledenik **teče**.

Ledenik tako lahko razdelimo na dva dela: (i) cona akumulacije (kjer akumulacija presega ablacijo) in (ii) ablaacijsko cono kjer je ravno obratno.

Linijo ki razmejuje eno in drugo cono imenujemo **ravnovesna meja ledenika**.



Accumulation zone (all parts of glacier above equilibrium line)

Equilibrium line

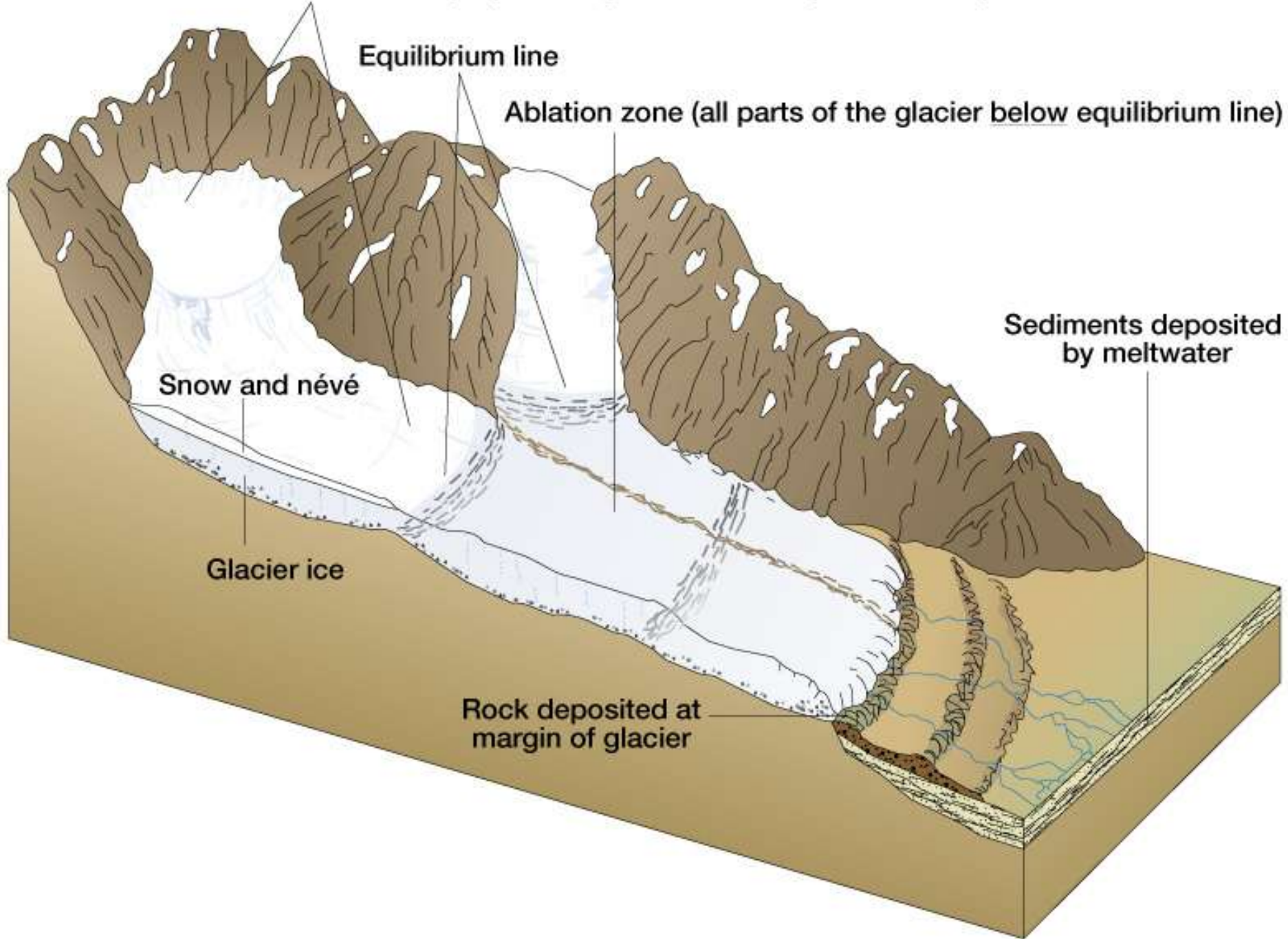
Ablation zone (all parts of the glacier below equilibrium line)

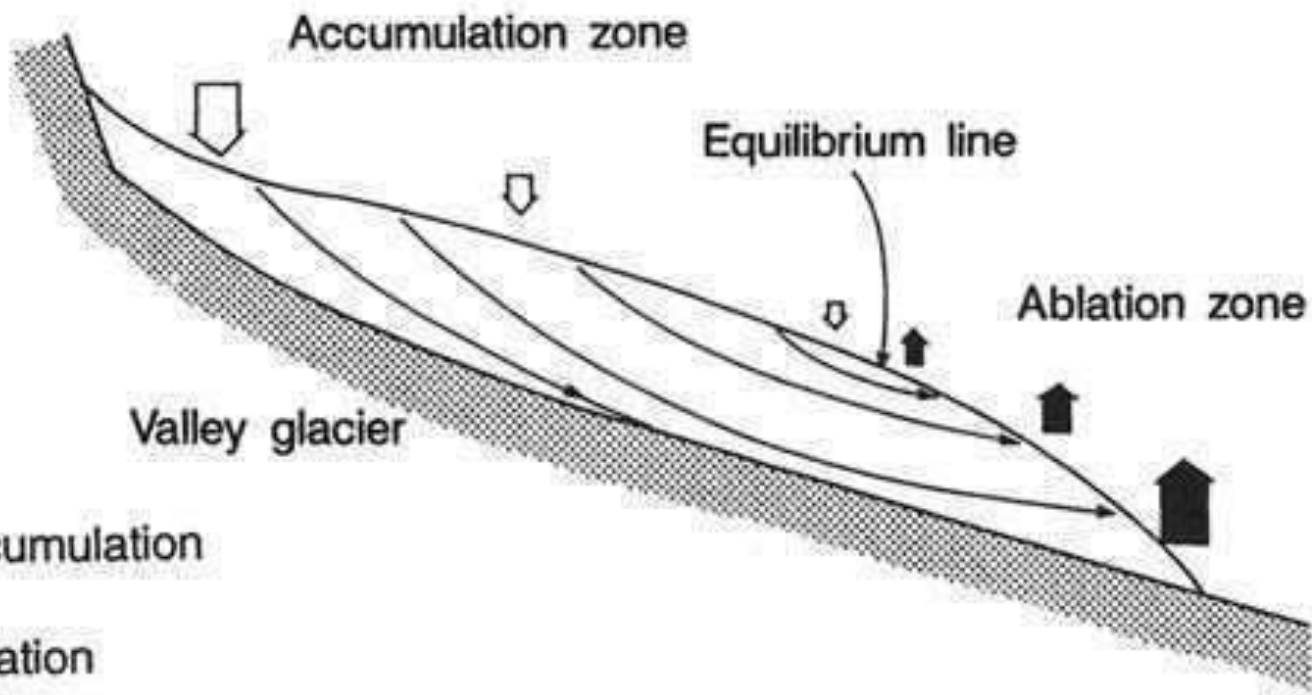
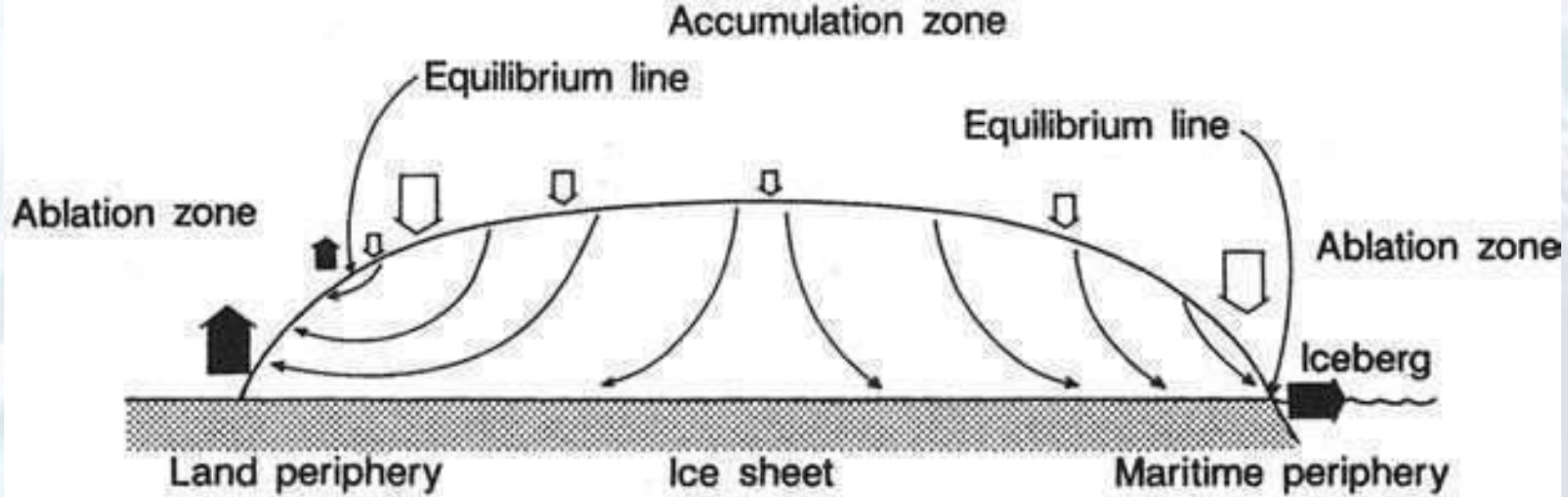
Snow and névé




Glacier ice

Sediments deposited by meltwater

Rock deposited at margin of glacier





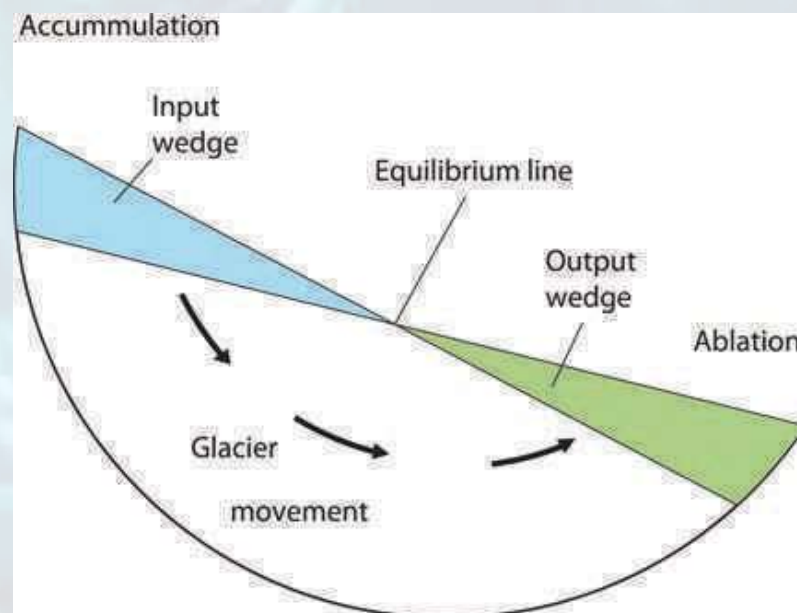
-  Accumulation
-  Ablation
-  Partical trajectory

Gradient masne bilance ledenika

Led dodajamo na vrhu ledenika v akumulacijski coni in ga odvezemamo v terminusu, zato je površinski profil ledenika bolj strm z večanjem akumulacije. Ko napetost preseže strižno trdnost, začne led teči.

Led se tako transportira iz cono akumulacije v cono ablacije in s tem zmanjša napetost in naklin. Tako transport ledu ohranja približno konstanten (ravnotežen) naklon ledenika. Gradient med cono akumulacije in cono ablacije je "kriv" za tok ledenika.

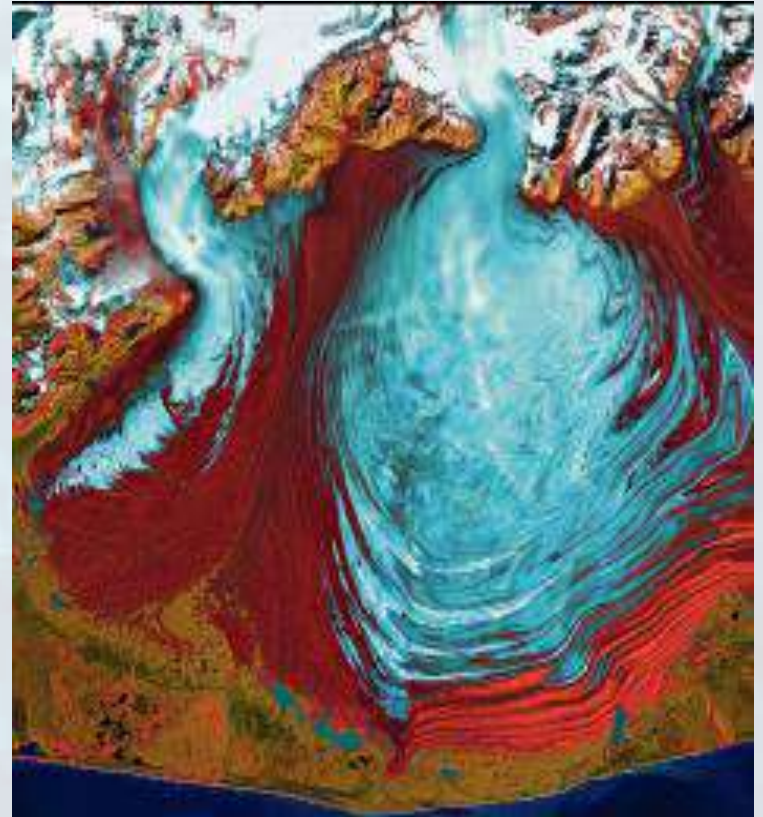
Večji je gradient, hitrejši mora biti transport.



PROCESI PREMIKANJA LEDENIKA

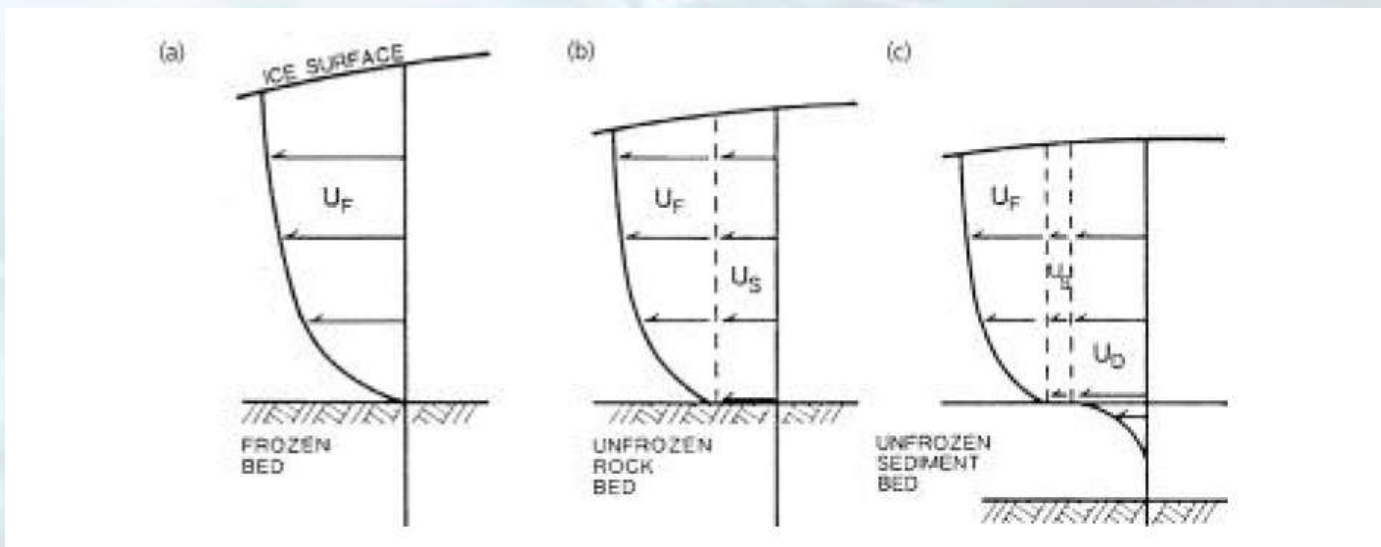
Osnovna lastnost ledenika je njegova zmožnost, da **teče**. Tok ledenika transportira led iz višjih nadmorskih višin ali notranjosti kontinentov, kjer poteka akumulacija, v nižje dele, kjer poteka ablacija. Tako igrajo ledeniki pomembno vlogo v globalnem hidrološkem ciklu.

Odziv kriosfere na spremembe v klimi in posledično spremembe gladine morja je zato intimno povezan z mehaniko premikanja ledenikov. Nadalje, ledeniki pomembno spreminjajo pokrajino saj prenašajo velike količine materiala iz con erozije v cone akumulacije.



Mehanizem tečenja ledu

Gibanje ledenika se dogaja zaradi deformacij v samem ledeniku ali na bazi ledenika ter zaradi drsenja materiala na meji med ledenikom ter podlago.



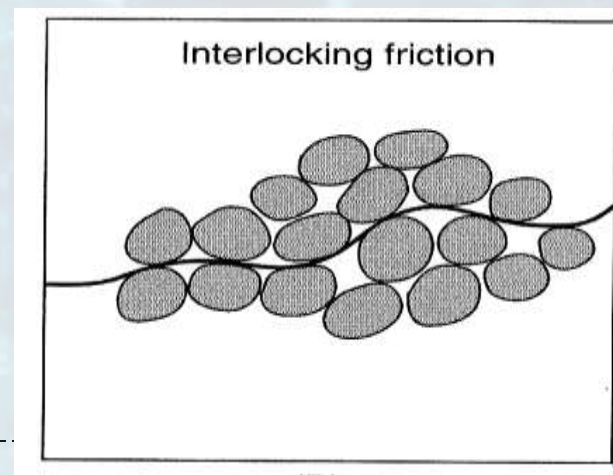
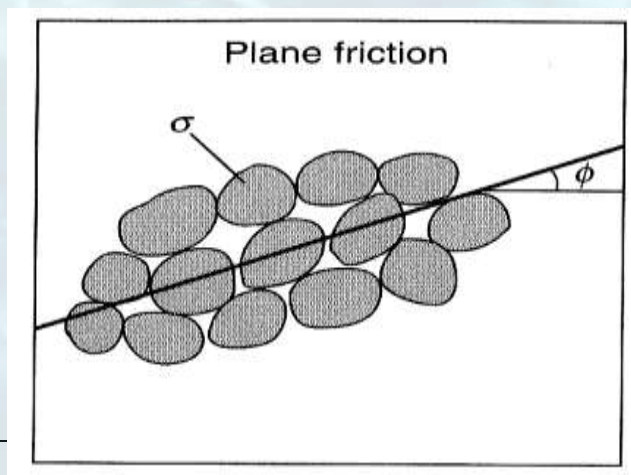
Vsak material ima določeno trdnost, ki jo definiramo kot napetost pri kateri se zgodi elastična deformacija. Led v tem smislu nima trdnosti, kar pomeni, da se bo deformiral že ob najmanjši napetosti. Pač pa ima določeno trdnost sediment ali kamnina po kateri ledenik teče.

Mehanizem tečenja ledu

Trdnost delimo na dva dela: kohezijo ter strižno trdnost.

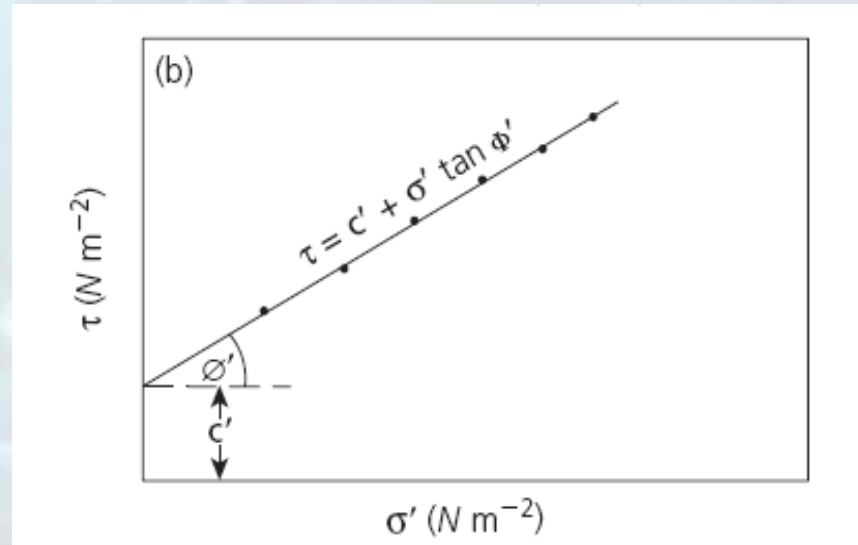
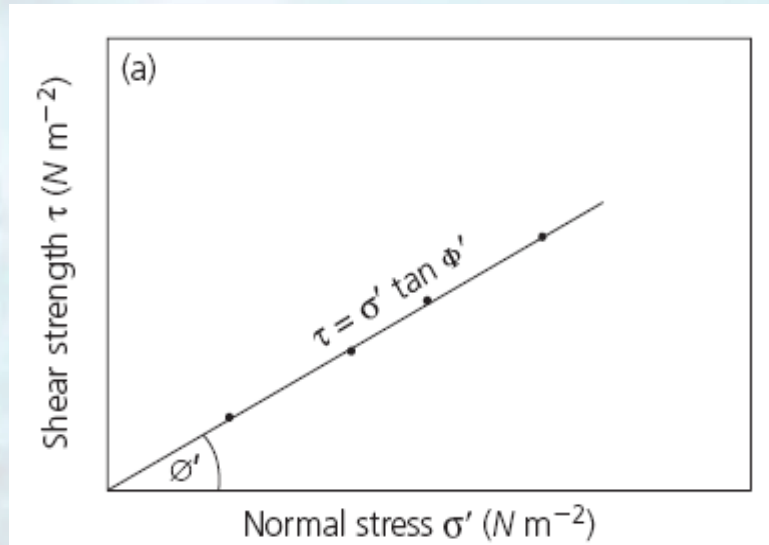
Kohezija obsega vse sile, ki vežejo material skupaj: tako kemijske vezi kot elektrostatični privlak med delci. Za nelitificirane delce je kemijski privlak praktično nepomemben, elektrostatične sile pa so zanemarljive pri delcih večjih od 1 mikrona (in večino vezane na gline).

Strižna trdnost je makroskopski odraz interakcije med hrapavimi materiali na mikroskopskem nivoju. Je neposredno odvisna od normalne sile in napetosti (vsakdanji primer je 'šmir papir'). Vsak material ima različno strižno trdnost, ki jo izrazimo s kotom notranjega trenja (Θ). Ta je odvisen od hrapavosti in 'odpornosti' na lomljenje teh nepravilnosti na meji med dvema površinama.



Mehanizem tečenja ledu: Coulombov zakon

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \operatorname{tg}\Theta$$



Mehanizem tečenja ledu

Tok ledenika je odvisen od gradienta sil, ki delujejo zaradi samega ledu (poganjanje ledenika) ter sil zaviranja, ki nastajajo zaradi vleka na meji ledenika ter podlage ter zaradi viskoznosti ledu.

V večini ledenikov so ene in druge sile blizu ravnovesja, zaradi tega v dinamiki ledneikov ponavadi ignoriramo pospešek.

Ledenik poganja strižna sila, ki je odvisna od debeline ledu ter površinskega naklona ledenika in jo izrazimo z enačbo:

$$\tau = \rho g(s-z)\sin(\alpha) \quad \text{ali} \quad \tau = \rho g(s-z)\tan(\alpha)$$

ρ : gostota ledu, g : gravitacijski pospešek, s je nadmorska višina ledenika, z je nadmorska višina nekje v ledniku, α pa je naklonski kot na površini ledenika

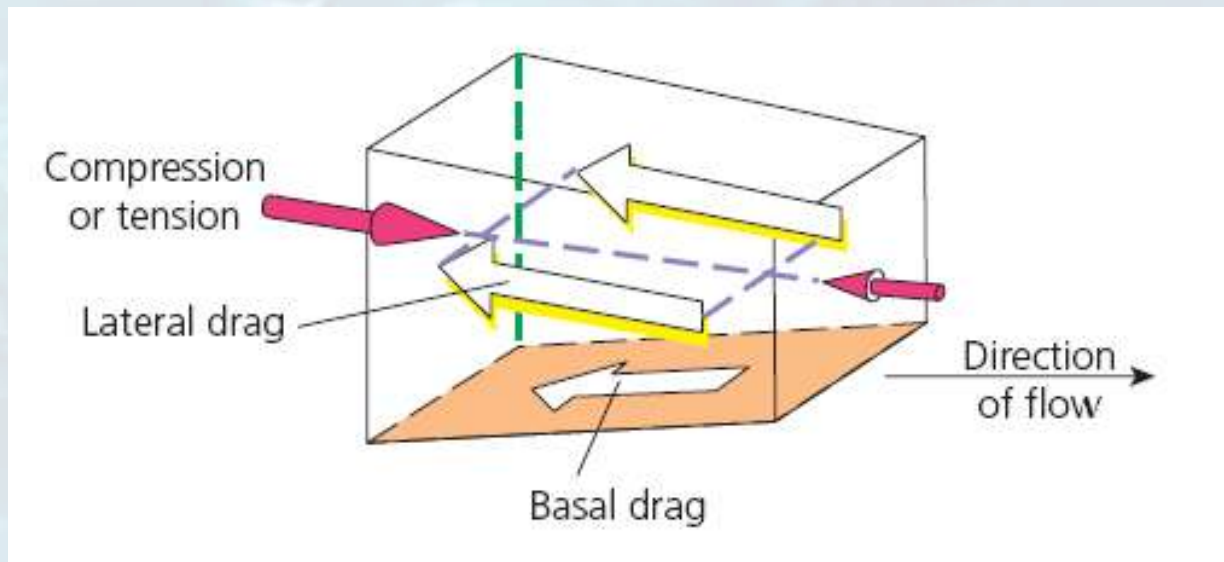
V bazi ledenika (na stiku s podlago) je razlika med s in z enaka debelini ledu. Strižna napetost na bazi lednikov je zelo podobna in znaša od 50 do 100 kPa



Mehanizem tečenja ledu

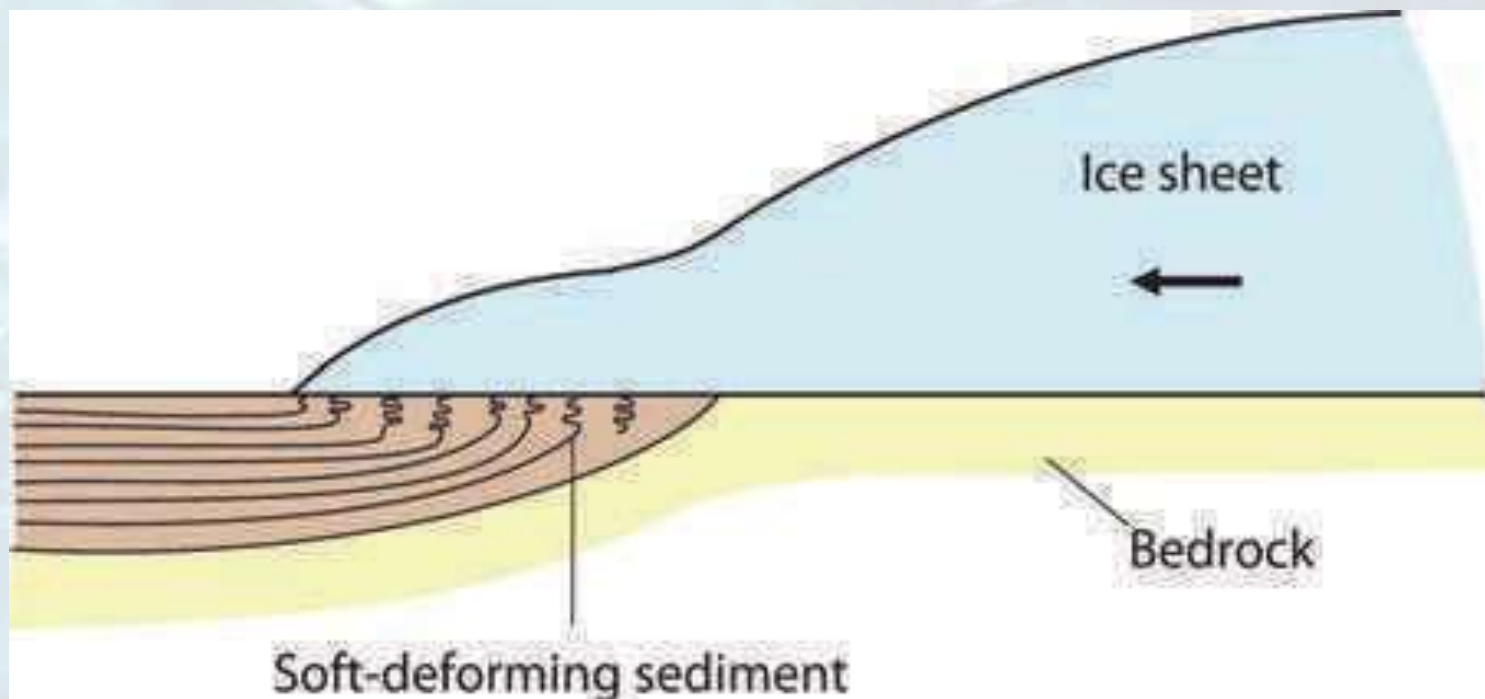
Sile, ki zavirajo ledenik nastajajo zaradi vleka na dnu ledenika (bazalni vlek), na njegovih straneh (lateralni vlek) in prostorske razporeditve v kompresiji in tenziji znotraj ledenika.

Lateralni vlek nastaja zaradi različnega odpora, ki ga dolina izvaja na ledenik, ko ta teče. Odvisna je od spremembe geologije vzdolž toka ledenika, tektonskega settinga, temperature ter količine vode.



STRIŽNA NAPETOST NA BAZI

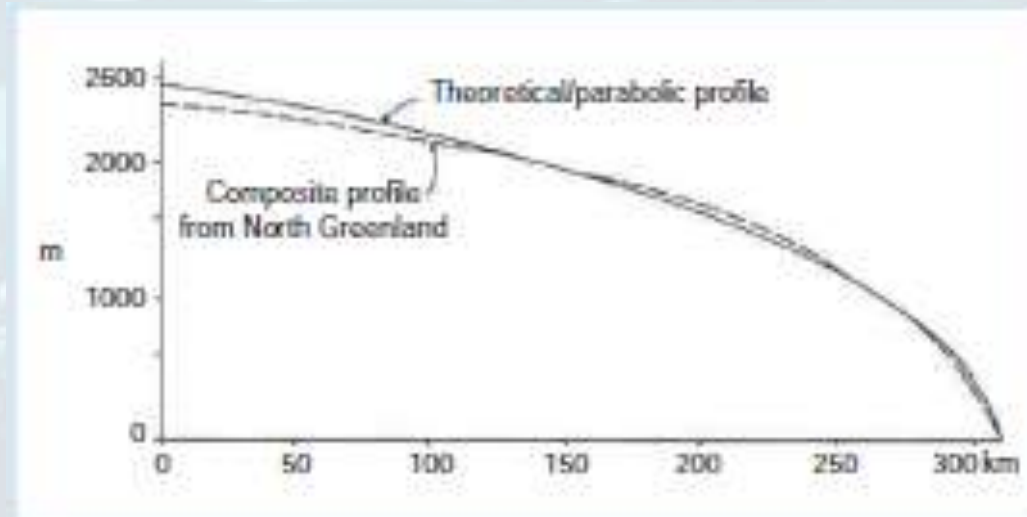
Strižna napetost pa je lahko tudi manjša, če ledenik teče čez mehko podlago, ki se lahko deformira, V tem primeru se napetost prenese na sediment in ledenik lahko teče zaradi deformacija v sedimentu



REKONSTRUKCIJE POLEDENITEV

Rekonstrukcije ledenikov danes slonijo večinoma na geomorfoloških dokazih. Vendar pa obstaja metoda s katero lahko preverimo kvaliteto svojih interpretacij.

Sloni na predpostavki, da so ledeniki v preteklosti morali ubogati iste fizikalne zakone, kot tisti danes. Se pravi, da morajo imeti strižne napetosti na bazi nekje v rangu med 50 in 150kPa.



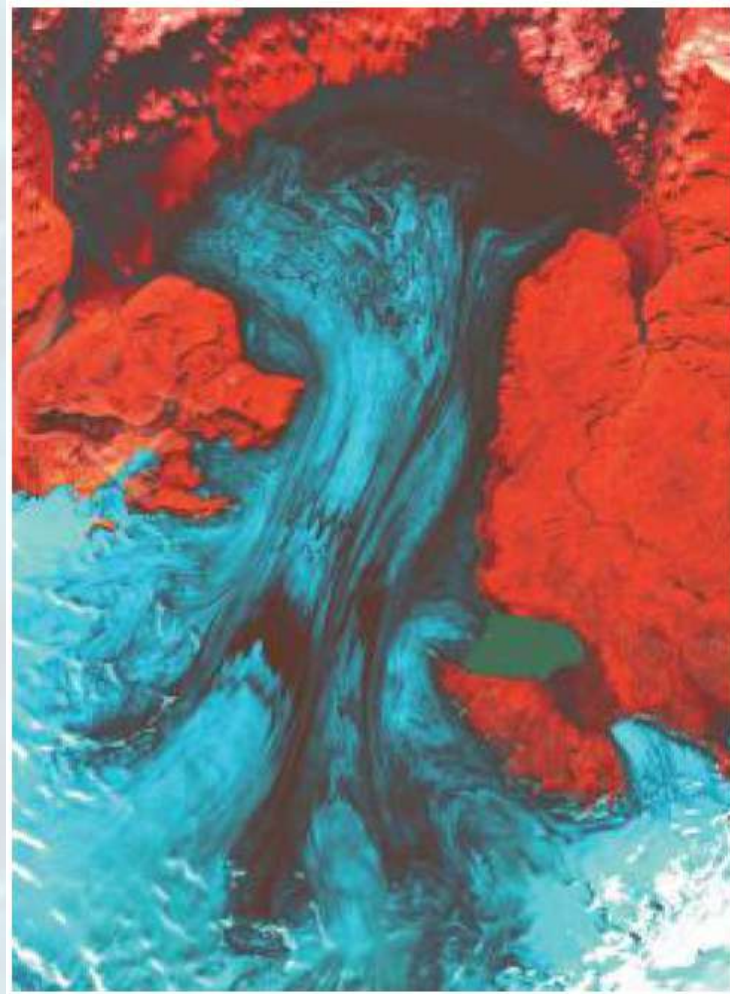
DEFORMACIJE LEDU

Deformacije ledu nastanejo kot odgovor na napetosti, ki na ledenik delujejo. Led se deformira na dva načina; z lezenjem (*creep*) ter s prelamljanjem. Lezenje ledu je v kontekstu premikanja najpomembnejše. Razpoke in povezane strukture pa po drugi strani povejo mnogo več o ledeniku

LEZENJE definiramo kot deformacijo ledu zaradi premikov znotraj ali med posameznimi ledenimi kristali. Celotno lezenje je kompleksen proces, ki združuje več stvari.

Premiki v kristalih se lahko dogajajo po klivažnih ploskvah ali premikih ob napakah v kristalni rešetki ledu. Premiki med zrn pa so vezani na proces rekristalizacije na kontaktih zrn.

Nastali prostorski vzorci deformacije so zelo kompleksni in jih lahko lepo opazujemo na ledenikih, ki so prekriti s sedimentom).



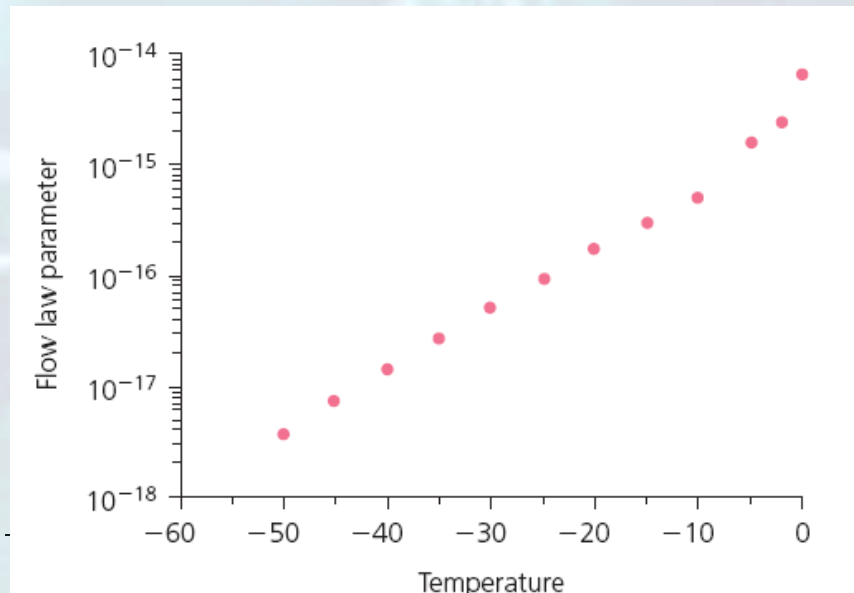
DEFORMACIJE LEDU

GLENOV ZAKON

Hitrost lezenja je odvisna od velikosti strižne napetosti. Večja je strižna napetost, večji bodo premiki zaradi lezenja. To odvisnost opisuje Glenov zakon.

Poudarja predvsem odvisnost od strižne napetosti, ki ni linearna (višanje za strižne napetosti za 2x bo povečalo lezenje za 8x). Zakon tako pojasnjuje zakaj se večino lezenja dogaja v bazalnih delih ledenika, kjer je napetost zaradi debeline ledu največja.

Pomembna je tudi odvisnost od temperature. Tudi ta odnos ni linearen. Razlog za to je v tem, da so procesi lezenja najbolj učinkoviti, ko se dogajajo taljenje na meji med zrnji.



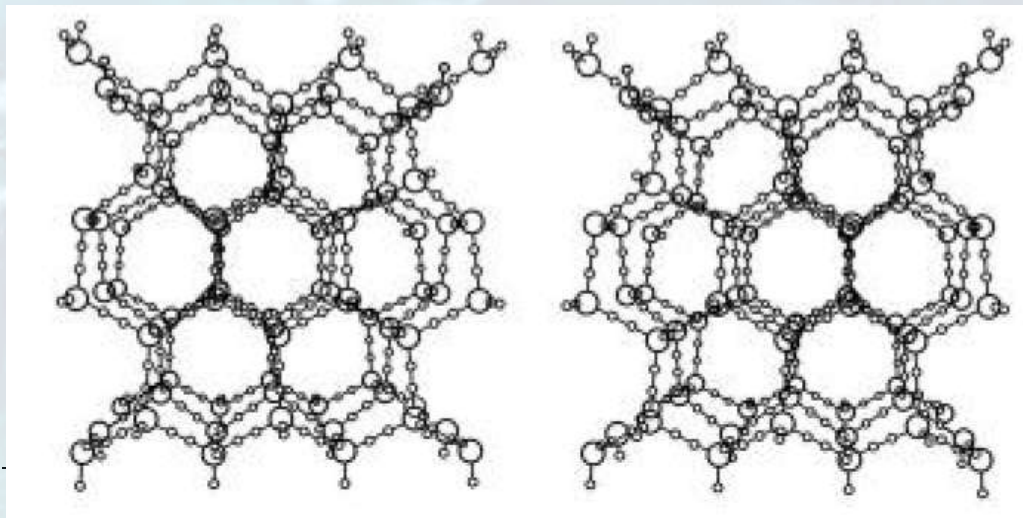
DEFORMACIJE LEDU

V naravi pa se hitrost lezenja rahlo razlikuje od tiste po Glenovem zakonu, Razlog je v tem, da na hitrost lezenja vplivajo tudi drugi faktorji, ne samo napetost in temperatura

Ti faktorji so vezani na velikost in orientiranost kristalov ledu, prisotnost 'smeti' ter prisotnosti vode.

Ledeni kristali se lažje deformirajo v določenih smereh, se pravi ob klivažnih ravninah, ki so definirane s kristalno strukturo (od 100 do 1000x raje). Tako je v polikristalnem ledu zelo važno kako so orientirani kristali (crystal fabric). Led z naključno orientiranimi kristali tako težje leze.

Pomagajo pa tudi defekti v kristalni mreži.



DEFORMACIJE LEDU

Nečistoče v ledu imajo prav tako velik vpliv na obnašanje ledu pod pritiskom. Nečistoče so raztopljeni ioni (raztopine), mehurčki plina ter drobir (trdni delci)

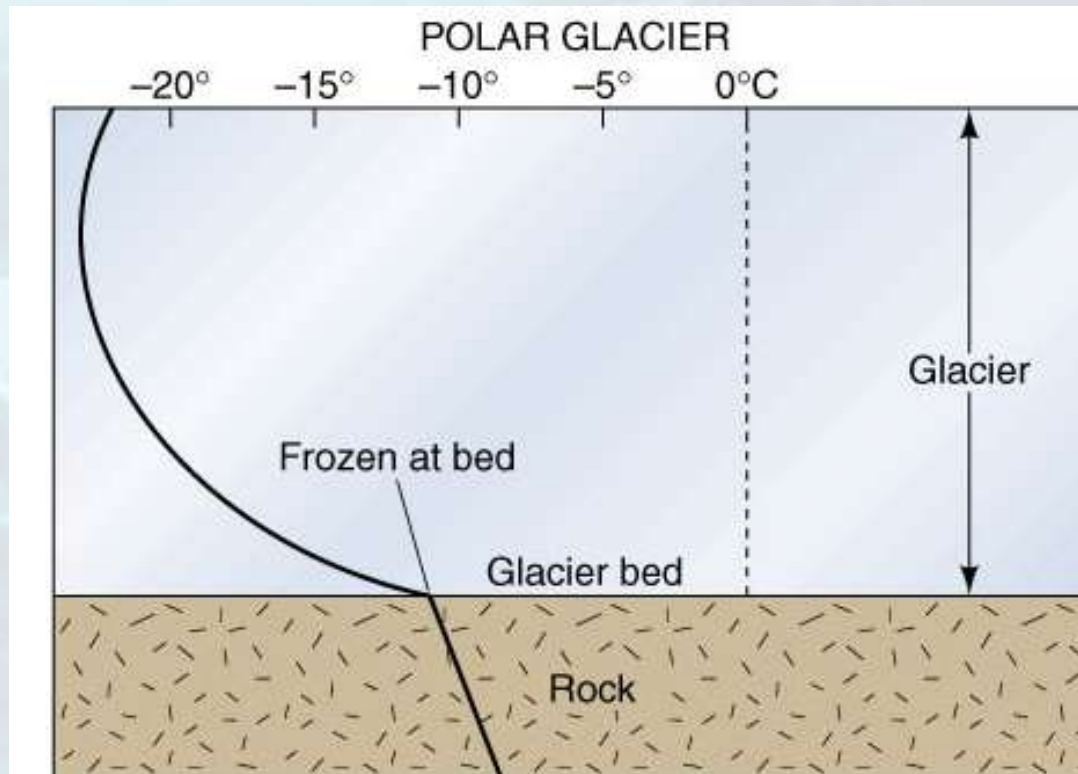
Vpliv raztopin je različen, nekatere led omehčajo, nekater pa ga otrdijo. Večje količine mehurčkov plina običajno omehčajo led in povzročajo določene smeri šibkosti. Drobir ima pomembno vplogo, saj ga je zelo veliko ravno v bazalnih delih ledenika, kjer led najbolj intenzivno leze. Led je vedno bolj trden, ko razmerje med drobirjem in ledom raste do 75%, potem pa drastično pade.

Voda v medzrnskih prostorih ima velik vpliv na reologije in temperaturo ledu. V bazalnih delih z veliko vode, je led mehkejši. Prav tako pa je se hitrost ledenikov močno poveča, če je na meji med ledom in podlago prisotna nevezana voda.



HITROST LEZENJA

Hitrost lezenja v ledeniku ke odvisna od skupnega efekta lezenja znotraj ledenika. To pomeni, da so hitrosti tik nad kontaktom ledenik podlaga nič, nato se zelo hitro povišajo (saj je tu napetost največja) in potem zmanjšujejo proti površini ledu.



Hitrost lezenja je v različnih delih ledenika različna: odvisno od tega ali ledenik pospešuje (ekstenzijska) ali zavira (kompresija).

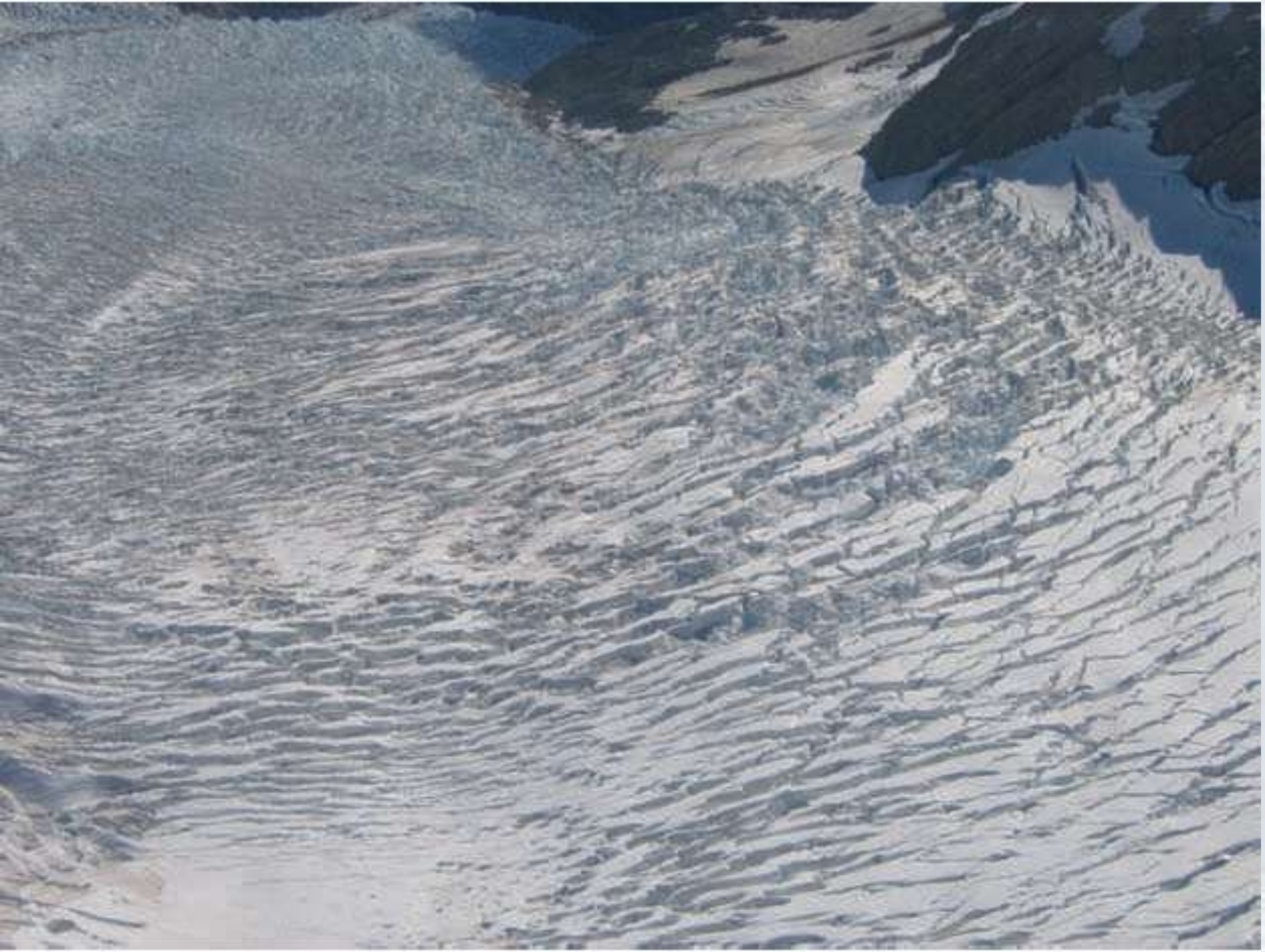
Porazdelitev con ekstenzije in kompresije je odvisna od merila gledanja ledenika.

Kompresijsko lezenje nastaja tam kjer se debelina ledenika manjša navzdol (ablacijska cona) in ekstenzijsko lezenje tam, kjer se debelina ledu večja navzdol (akumulacijska cona)

V manjših merilih pa je tip lezenja odvisen od naklona podlage: kjer je večji naklon bo lezenje ekstenzijsko in kjer je manjše kompresijsko.

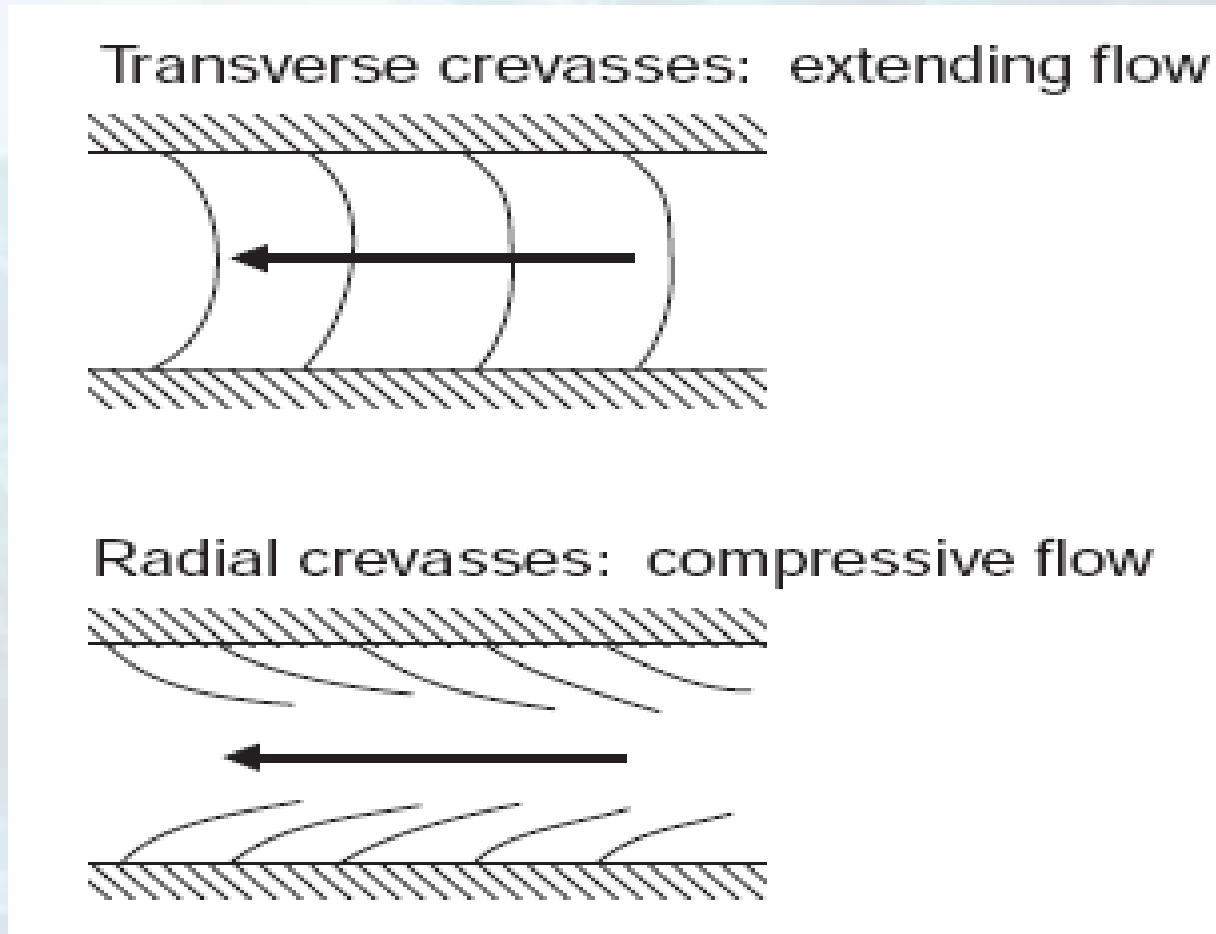
Na način lezenja nam kaže vzorec razpok na ledu: **crevasee**





NOTRANJE DEFORMACIJE V LEDENIKU

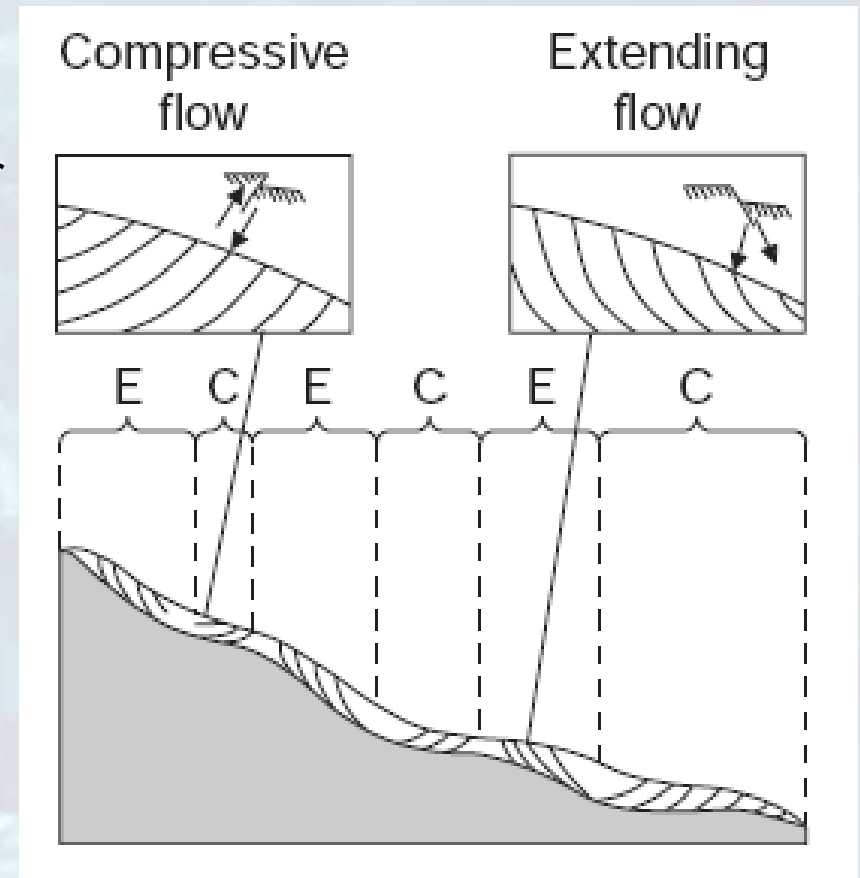
Vzorec razpok na ledeniku nam kaže na tip lezenja.



NOTRANJE DEFORMACIJE V LEDENIKU

Prelamljanje in narivanje

V določenih pogojih pa lezenje samo ne more slediti napetostim, zaradi tega se na ledeniku pojavijo tudi prelomi (normalni in reverzni) ter gubanje.

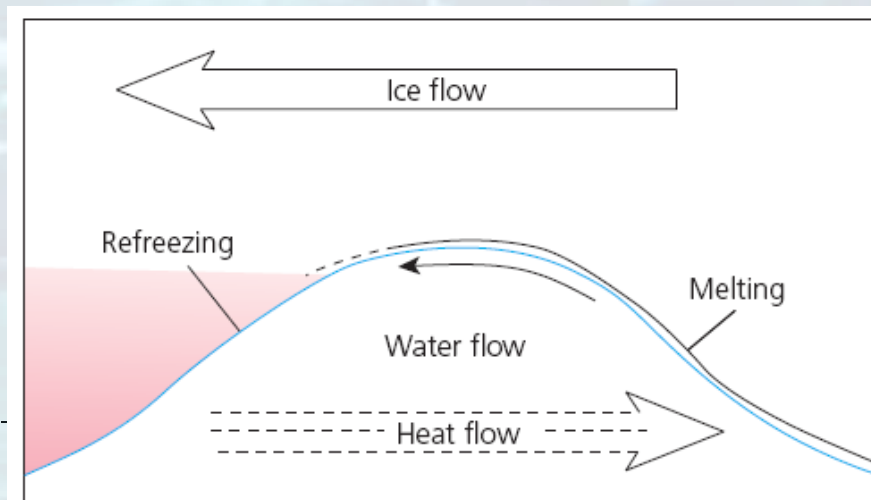


DRSENJE PO PODLAGI

Drsenje ledenika po podlagi poteka na dva načina: s pospešenjem lezenja in z raztapljanjem in ponovnim zmrzovanjem (regelation).

- ▶ Pospešeno lezenje je le hitrejšo normalno lezenje ledenika. Z njim pojasnujemo kako se ledenik obnaša in deformira preko nepravilnosti v podlagi čez katero teče (ni nikoli ravna). Tak način drsenja je značilen za večje ovire
- ▶ Drsenje s taljenjem in ponovnim zmrzovanjem pa se zgodi takrat, ko je led, ki teče čez podlago blizu tališča. Ob oviri se poveča napetost in led se stopi. Ledenica teče okoli podlage, tam pritisk pade in hitro zmrzne. Ta proces je najbolj učinkovit pri majhnih ovirah (latentna toplota ob ponovnem zmrzovanju se lažje prenaša navzgor).

Drsenje po podlagi se močno poveča, če je na meji med ledenikom in podlago prisotna ledenica.



Termalni režim v bazi ledenika

Glavni faktor, ki vpliva na drsenje po podlagi je temperatura ledu na bazi ledenika (na meji s podlago).

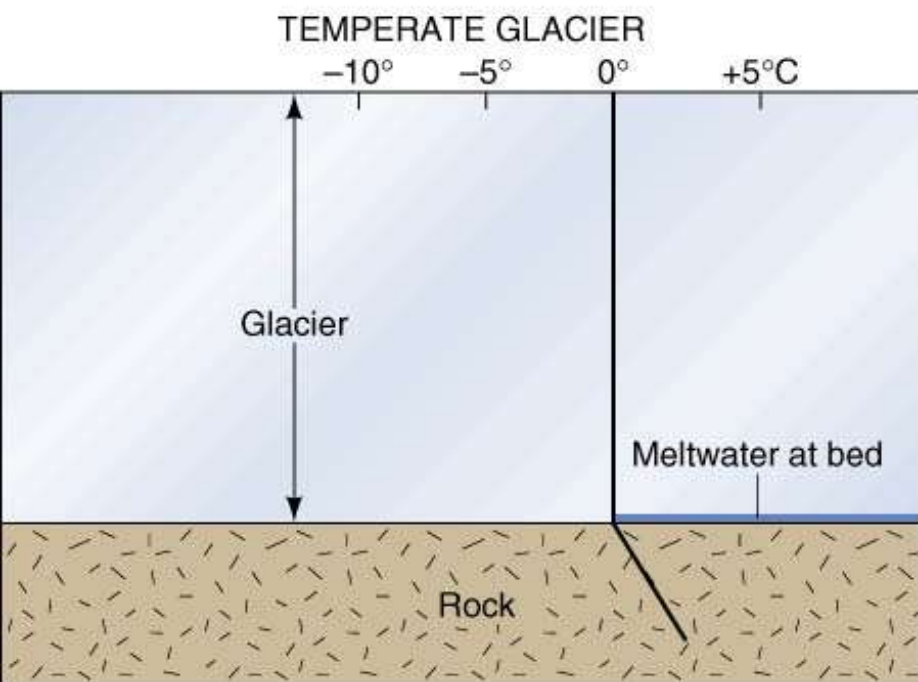
Nekateri ledeniki so zmrznjeni vse do podlage in na meji ne vsebujejo ledenice (hladni ledeniki). Na teh poteka bolj malo drsenja po podlagi.

Topli ledeniki pa na meji med ledom in podlago vsebujejo ledenico. V tem primeru je drsenje po podlagi pomemben način premikanja ledenika. Ti ledeniki tečejo hitreje in imajo večjo zmožnost erozije

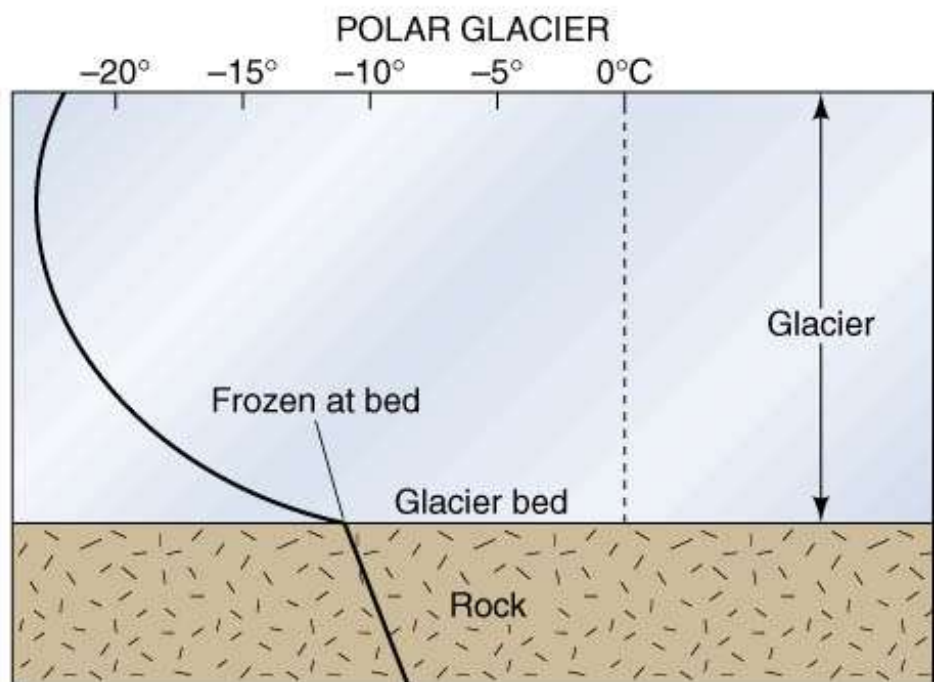
Temperaturo na bazi ledenika imenujemo **termalni režim v bazi ledenika**. Termalni režim pa ni različen samo od ledenika do ledenika, pač pa se lahko spreminja tudi v samem ledeniku.



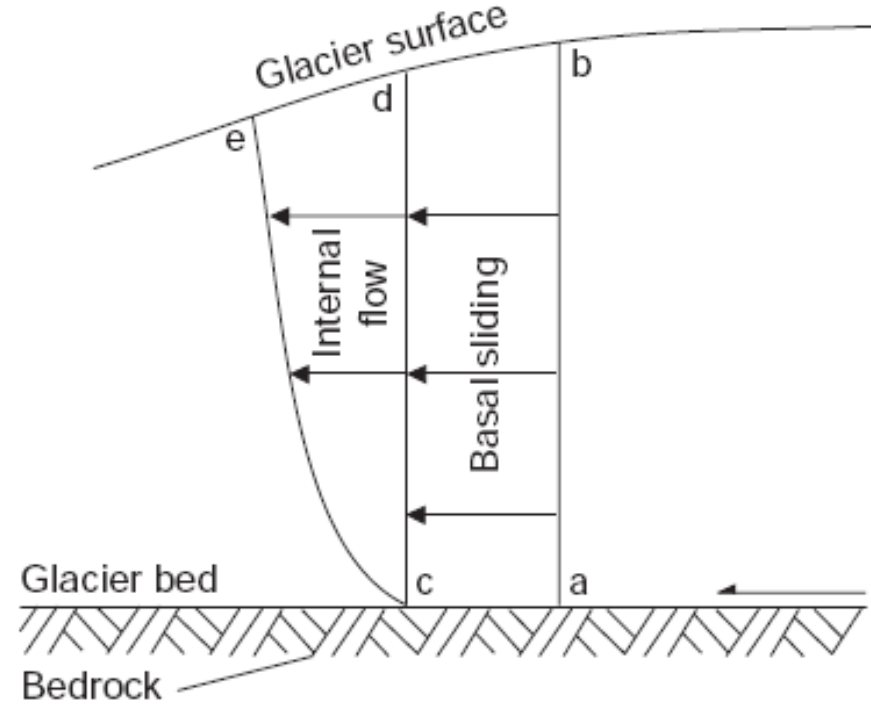
A.



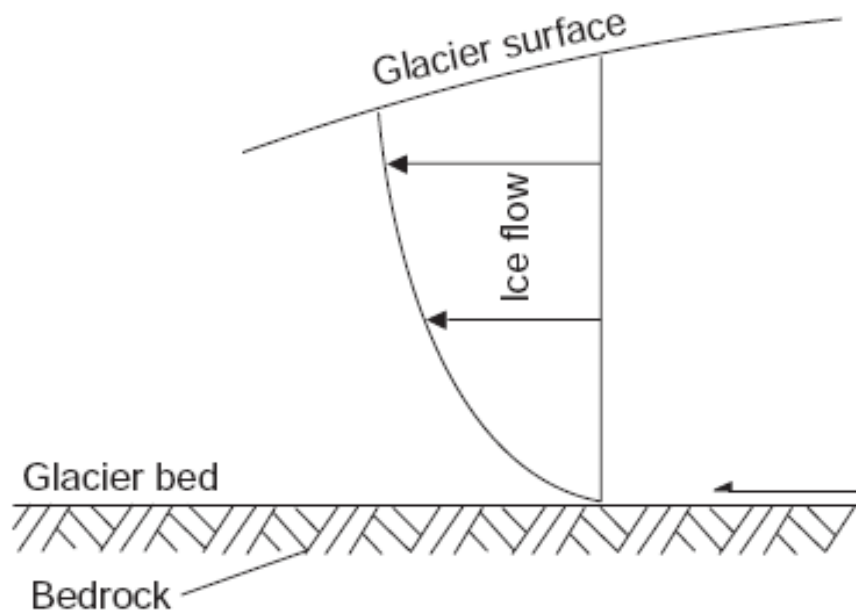
B.



A: Warm-based glacier resting on bedrock



B: Cold-based glacier resting on bedrock



Temperatura na bazi lednika je odvisna od ravnotežja med toploto, ki nastaja na bazi ledenika in temperaturnih gradientov v ledu, ki teče čez podlago (ki definira hitrost odvajanja toplote s kondukcijo)

Baza ledenika se greje na različne načine:

- ▶ Geotermalna toplota
- ▶ Toplota zaradi trenja med ledenikom in podlago
- ▶ Toplota zaradi trenja v notranjosti ledenika

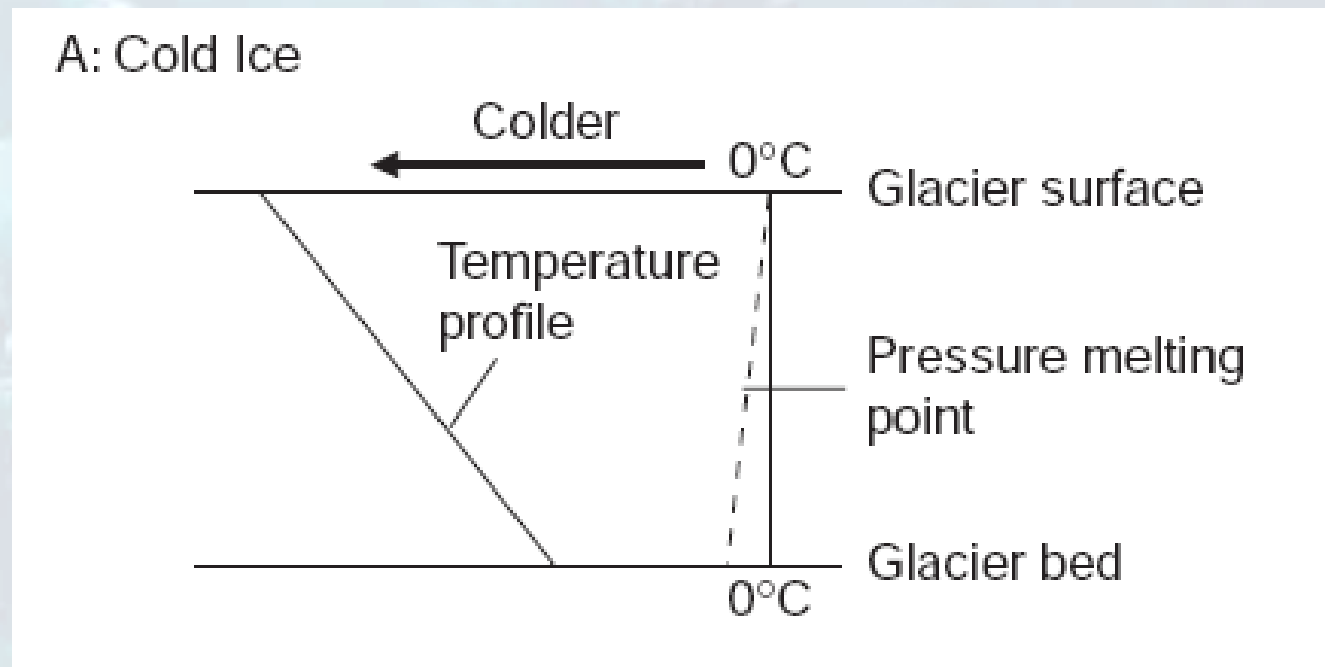
Temperaturni gradient pa je odvisen od:

- ▶ Temperature na bazi ledu
- ▶ Temperature na površini ledu
- ▶ Debeline ledu
- ▶ Toplotne prevodnosti ledu



Termalni režim v bazi ledenika

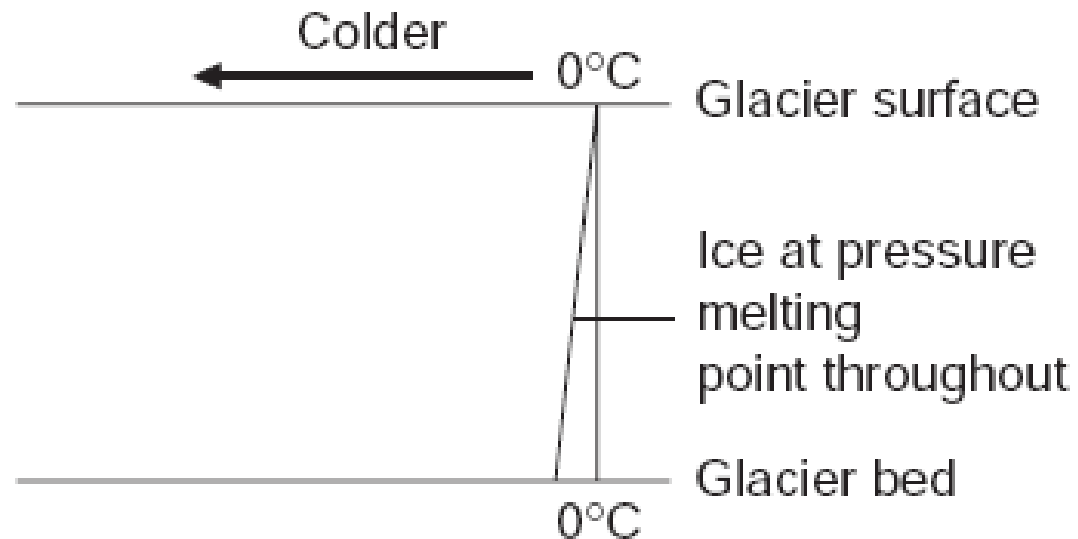
Hladni ledeniki ponavadi nastajajo tam, kjer je ledenik tanek, se premika počasi in kjer ni površinskega taljenja ledenika v poletnih mesecih, zime pa so dovolj mrzle, da se površina ledenika zelo shladi.



Termalni režim v bazi ledenika

Topli ledeniki pa nastajajo tam kjer je led debel, se hitro premika in taljenje poleti je močno. Prisotna je ledenica in kjer ponovno zmrzne sprosti latentno toploto, ki dodatno ogreva ledenik.

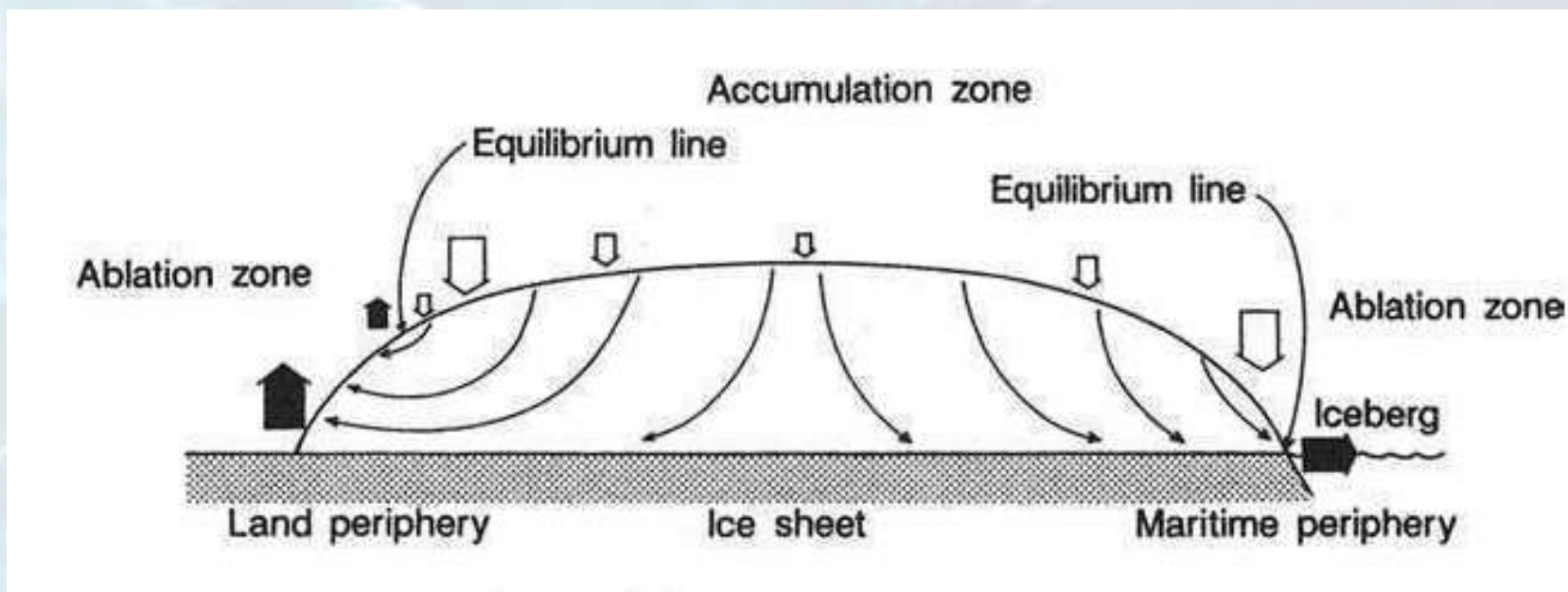
B: Warm Ice

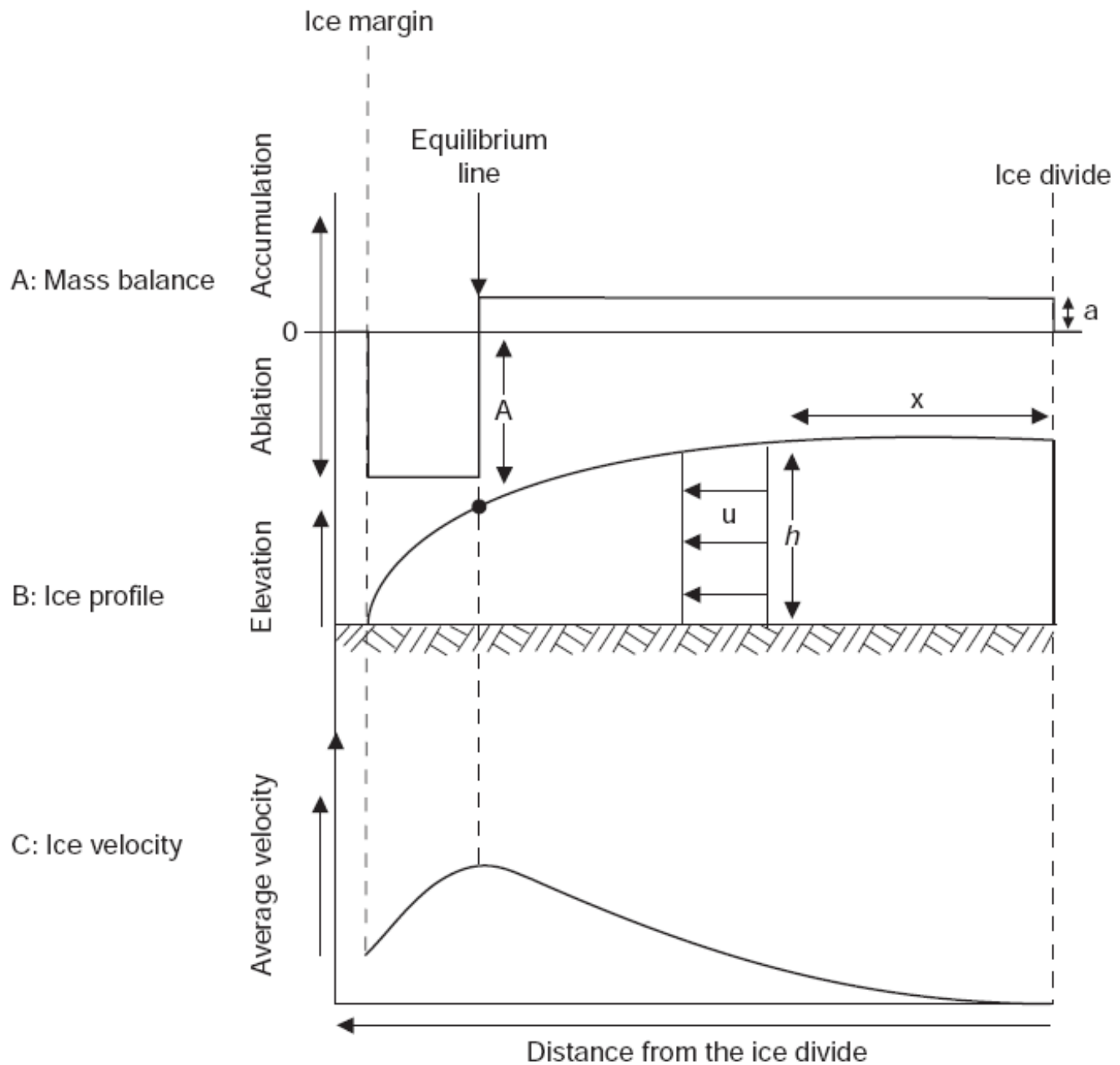


Vzorec in hitrost toka ledu

Znotraj ledenika tok ledu ponavadi sledi smeri naklona pobočja čez katerega teče.

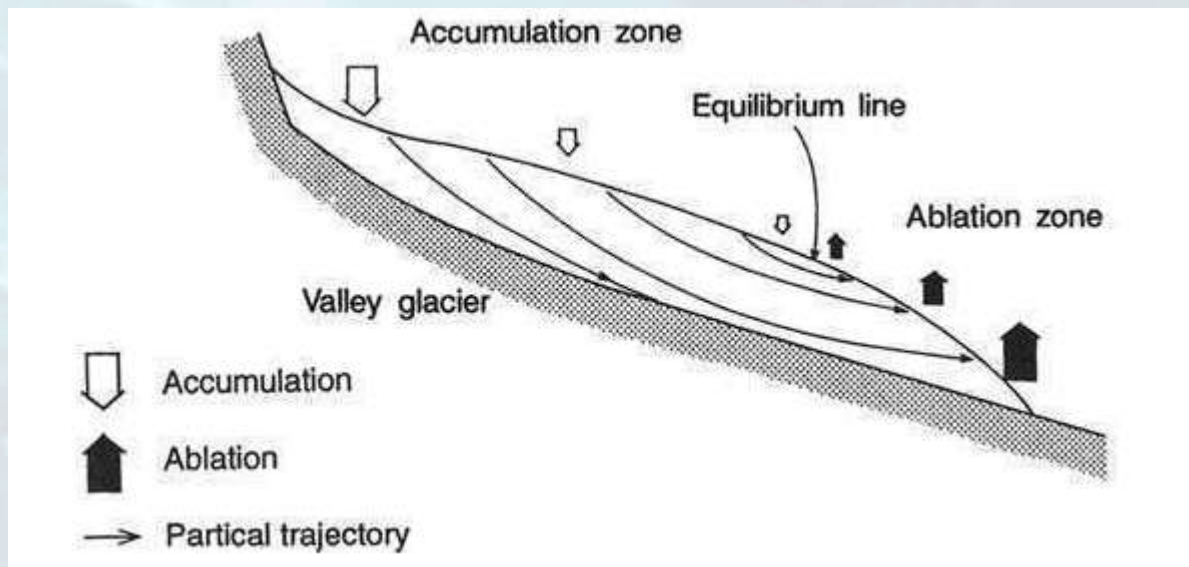
Pri ledenih pokrovih led teče v različnih in nasprotnih si smereh.

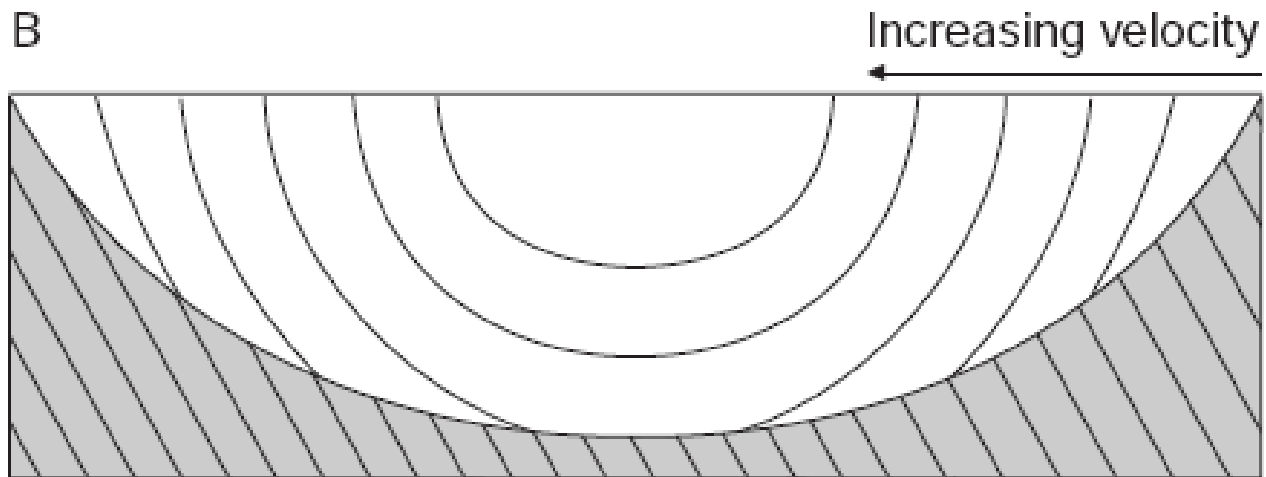
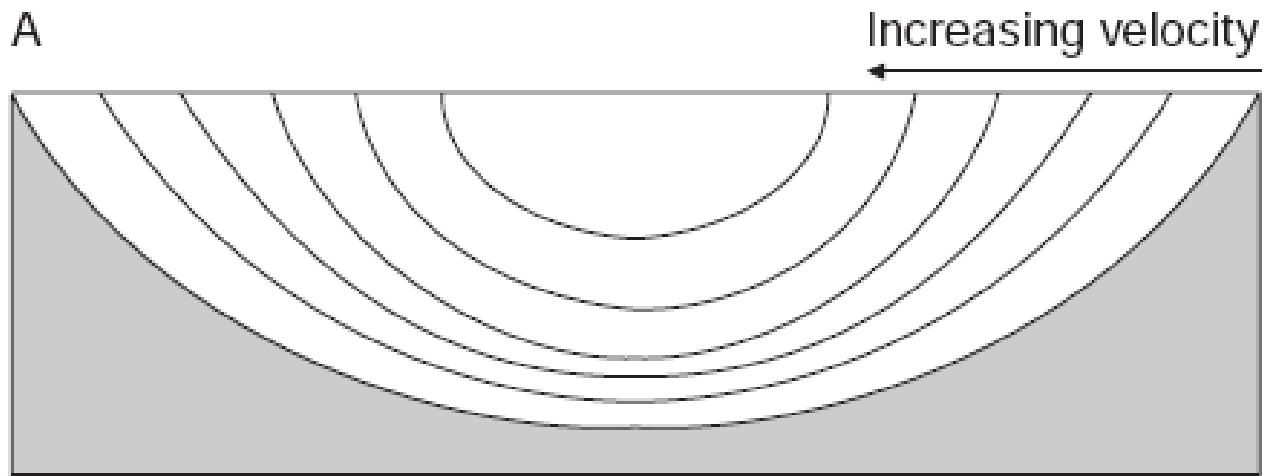




Vzorec in hitrost toka ledu

Tok v dolinskem ledeniku kaže na podoben vzorec. Hitrost toka je največja v centru ledenika ali blizu površja (to so področja, ki so najbolj oddaljena od trenja)





A: brez drsenja po podlagi, B: drsenje po podlagi



Hitrost ledenikov

Hitrost ledenikov je ponavadi okoli 3-300m na leto.

V strmih predelih pa lahko doseže celo 1-2km na leto.

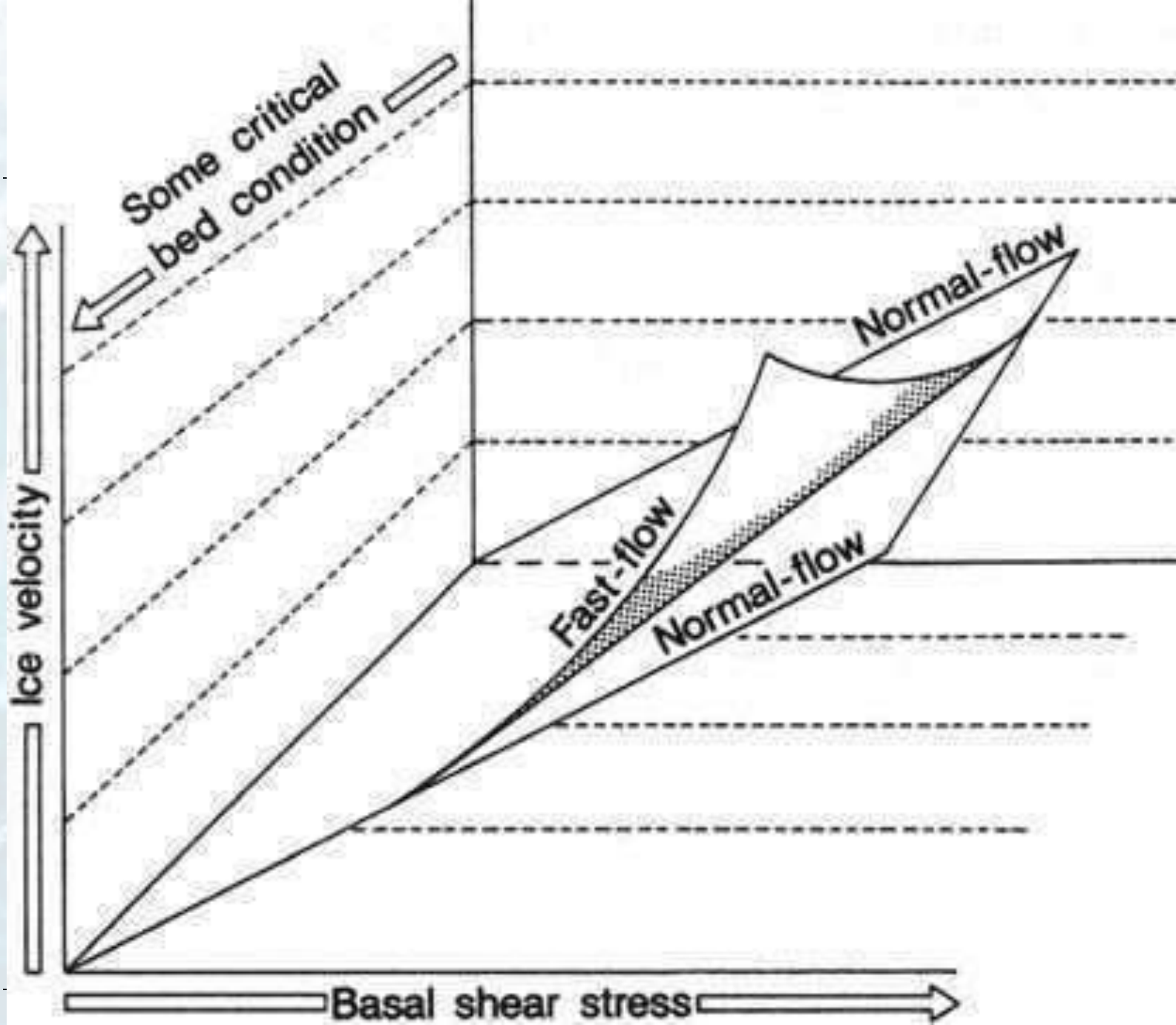
Zelo redki so ledeniki, ki tečejo še z večjimi hitrostmi. Ti so ponavadi vezani na preifrene ledene tokove, ki odvajajo led iz večjih ledenih površin (Antarktika, Grenlandija). Ti dosegajo hitrosti kar 7-12km na leto. (lahko tečejo tako hitro, ker imajo na voljo neomejeno količino ledu)

Nekateri ledeniki pa imajo faze (valove), v katerih dosežejo 10-100x vrednosti običajnih hitrosti (surge type glaciers). Hitro tečejo le takrat, ko je na voljo dovolj ledu.



Lednik Lowell (Yukon)

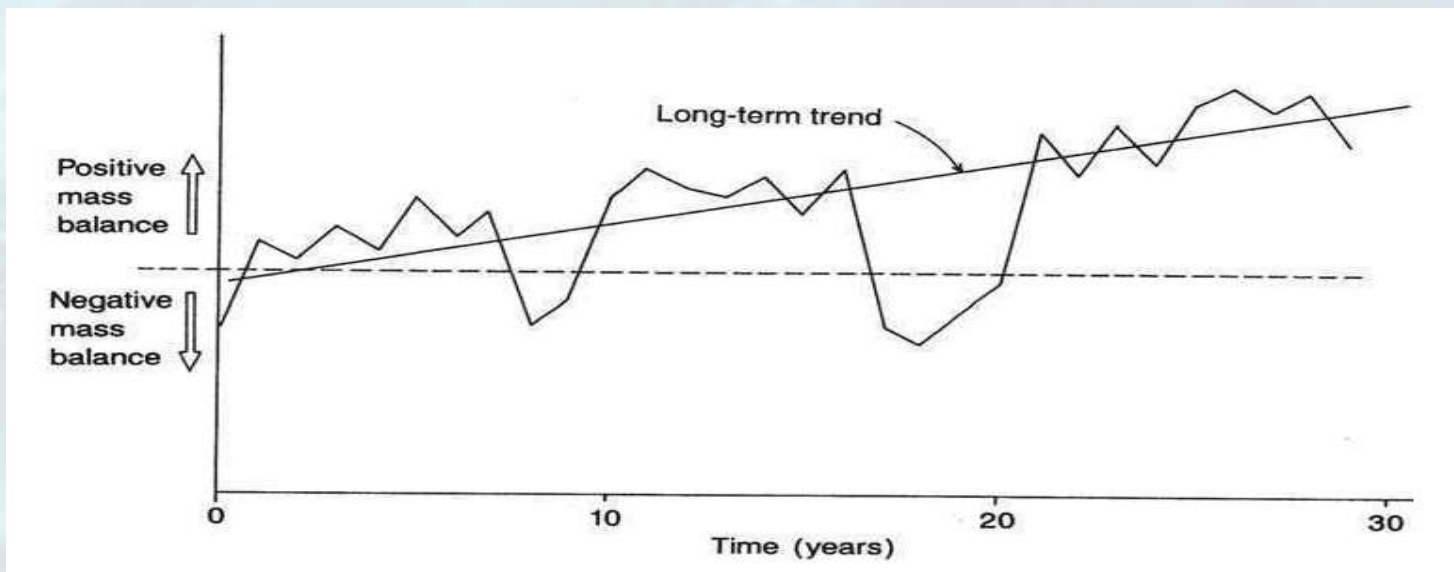




LEDENIKI IN KLIMATSKE SPREMEMBE

Velikost ledenika je primarno odvisna od klime. Spremembe klime bodo torej pomembno vplivale na velikost ledenikov, saj kontrolirajo masno bilanco ledenika. Če je pozitivna, bodo ledeniki napredovali, če pa je negativna pa se bodo krčili.

Ledeniki se tako vseskozi prilagajajo klimatskim spremembam, tako kratkoročnim kot tudi dolgoročnim.



GLACIALNA HIDROLOGIJA

Ledenica je v primerih nekaterih ledenikov edini produkt ablacije in predstavlja pomemben ekonomski del oskrbe z vodo (recimo Ind in Ganges).

Glacialna hidrologija pomembno vpliva na dinamiko ledu in ledenika (hitrost in način premikanja, deformiranje sedimenta ipd)

Hipni odtoki vode iz lednika predstavljajo geohazard

Ledenica nadalje odnaša drobir izpod ledenika in ga prenaša daleč naprej. Kjer ga odloži je lahko ekonomsko pomemben (recimo naše Kranjsko-Soriško polje, ki sta pomembna vodonosnika).



IZVOR LEDENICE

Ledenico v ledeniških okoljih dobimo na treh mestih

1. Supraglacialno okolje (na površini ledenika)
2. Subglacialno okolje (pod ledenikom, na meji s podlago)
3. Englacialno okolje (v ledeniku samem)





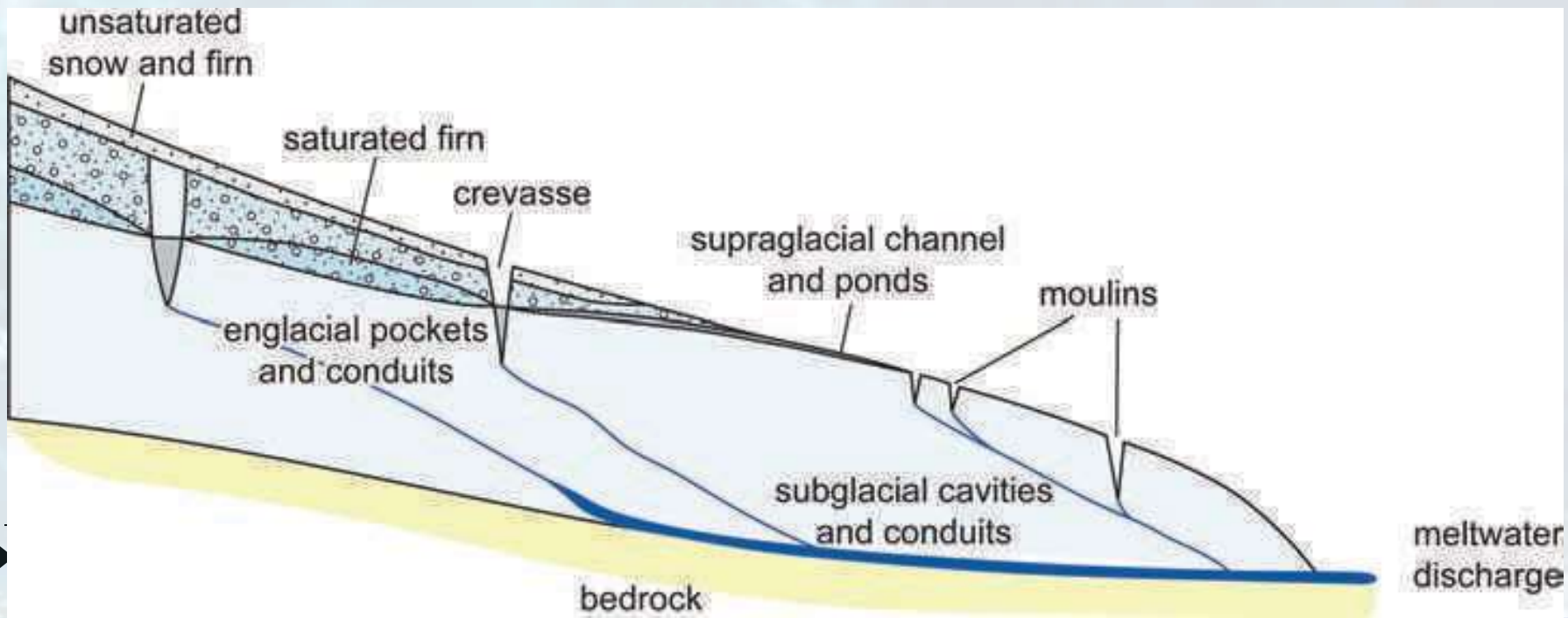
LEDENICA

Ledenica nastaja tam, kjer je na voljo dovolj toplote, da povzroči taljenje ledu. Toplota lahko pride od Sonca, zaradi trenja ali pa je to geotermalna toplota.

Taljenje na površju ledenika je najpomembnejše in se v lednikih zmernih širin meri v metrih na leto (en in subglacialno pa le v mm na leto)

Topljenje na površini pa je seveda močno sezonsko pogojeno.

Dodatne količine vode pa na lednikih dobimo še preko dežja, dotoka potokov neposredno v lednik.



SKLADIŠČENJE VODE V LEDENIKU

V ledenikih voda potuje ter se tudi skladišči v različnih oblikah in različno dolgo časa.

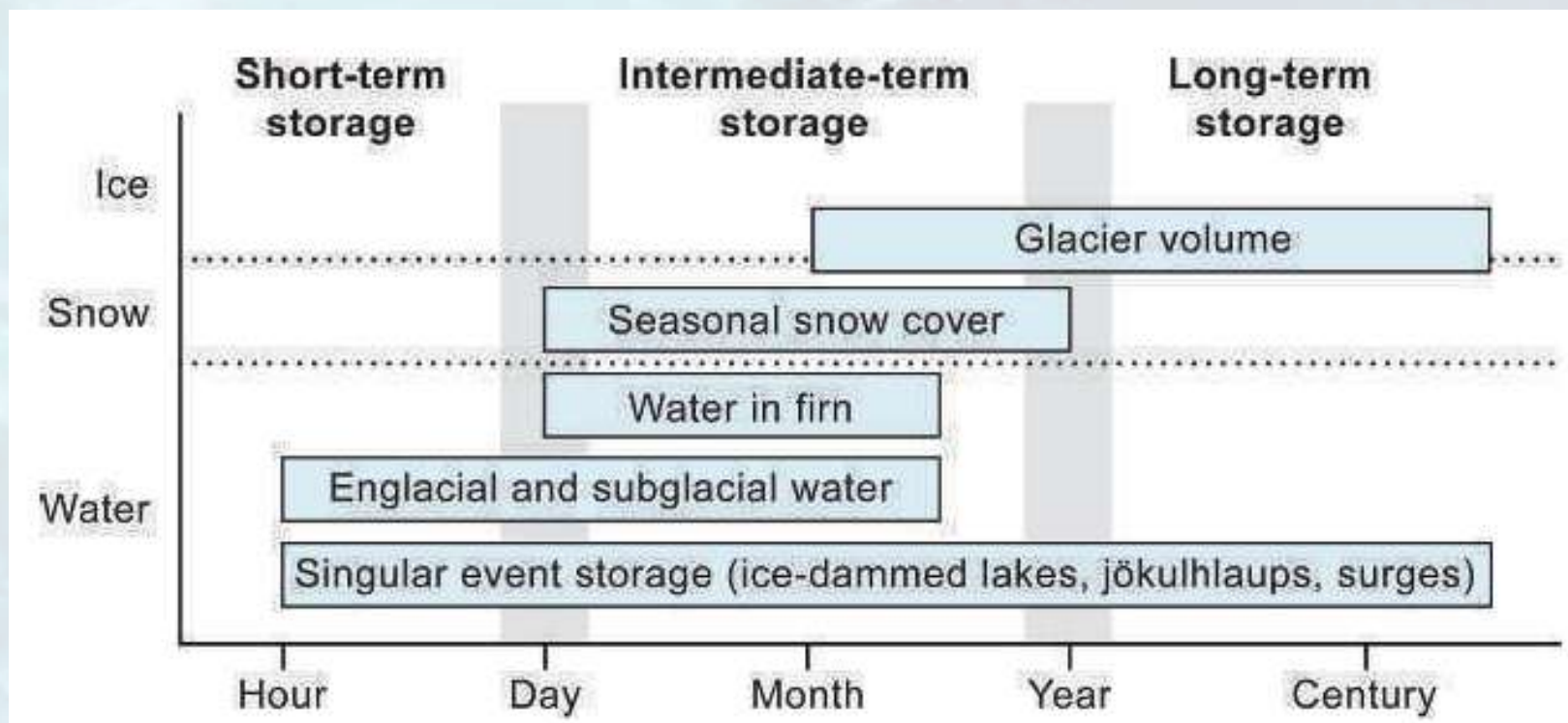
V subglacialnih okoljih se lahko skladišči v jamah, depresijah, kot porna voda v sedimentih in v subglacialnih jezerih.

Znotraj ledenika ostaja v kanalih, vodnih žepih in jamah ter na ledeniku kot firn in sneg in v obliki jezer.

Voda se shranjuje tudi v bližini ledenikov v proglacialnih in robnih jezerih.



Voda se v ledeniku skladišči v treh različnih časovnih okvirjih: dolgotrajno (leta do stoletja), srednjetrojano (nekaj dni do nekaj let) ter kratkotrajno (nekaj ur do dni).



LEDENIŠKI HIDROLOŠKI SISTEM

- ▶ Ledenica potuje skozi ledenik preko različnih poti. Ledenica iz površine ter tista iz dna ledenika potujeta drugače
- ▶ Tip kanalov je večinoma odvisen od termalnega režima ledenika. V hladnih ledenikih voda ne more potovati v ledu, ker hitro zmrzne. Tako potuje večinoma po površini in v robnih delih ledenika.
- ▶ V toplih ledenikih pa voda lahko potuje tudi znotraj ledenika. Prav tako pa se lahko skladišči na mejah ledu različnih temperatur.



LEDENIŠKI HIDROLOŠKI SISTEM

Supra in englacialni tok ledenice

Supraglacialni kanali so nekaj metrov široki in ponavadi sledijo strukturne šibkosti v ledu. Lahko so meandrirajoči ali pa ravni in hitrosti vode v njih so relativno visoke. V ledenikih zmernih širin so ponavadi kratki in se končajo ob ledeniških razpokah ali vertikalnih brezni (moulin), ki dovajajo vodo v ledenik.

V samih ledenikih pa voda izkorišča razpoke in druge že prej definirane drenažne poti. Kanali pogosto migrirajo proti dnu z vrezovanjem kanjonov v led.



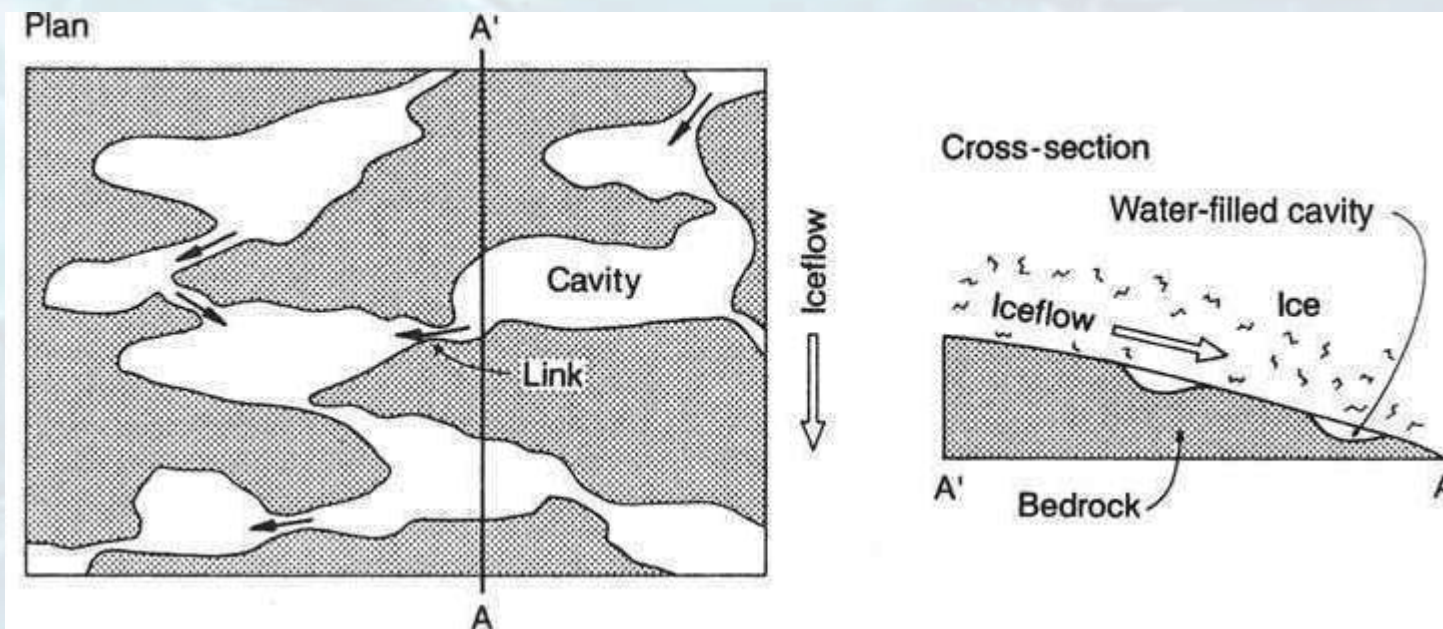
LEDENIŠKI HIDROLOŠKI SISTEM

Subglacialni tok ledenice tvori svoj drenažni sistem. Poznamo 4 različne oblike:

- ▶ Ledenica teče v obliki tankega, nekaj mm debela filma na meji ledu in podlage (Weertmanov film). Nastaja tam, kjer je veliko bazalne vode in je zelo nestabilen, saj se hitro organizira v sistem kanalov.
- ▶ Voda teče po mreži večjih a maloštevilčnih med seboj povezanih kanalov. Kanali so lahko en ali subglacialni. Velikost je rezultat dveh nasprotujočih si sil: taljenja na robu kanala (ki ga odpira) ter deformacij ledenika (ki zapirajo kanal). Kanali se hitro spreminjajo v odvisnosti od količine vode.
- ▶ Ledenica lahko potuje tudi znotraj sedimenta, ki je pod ledenikom, če je ta dovolj mehak, deformabilen in porozen.

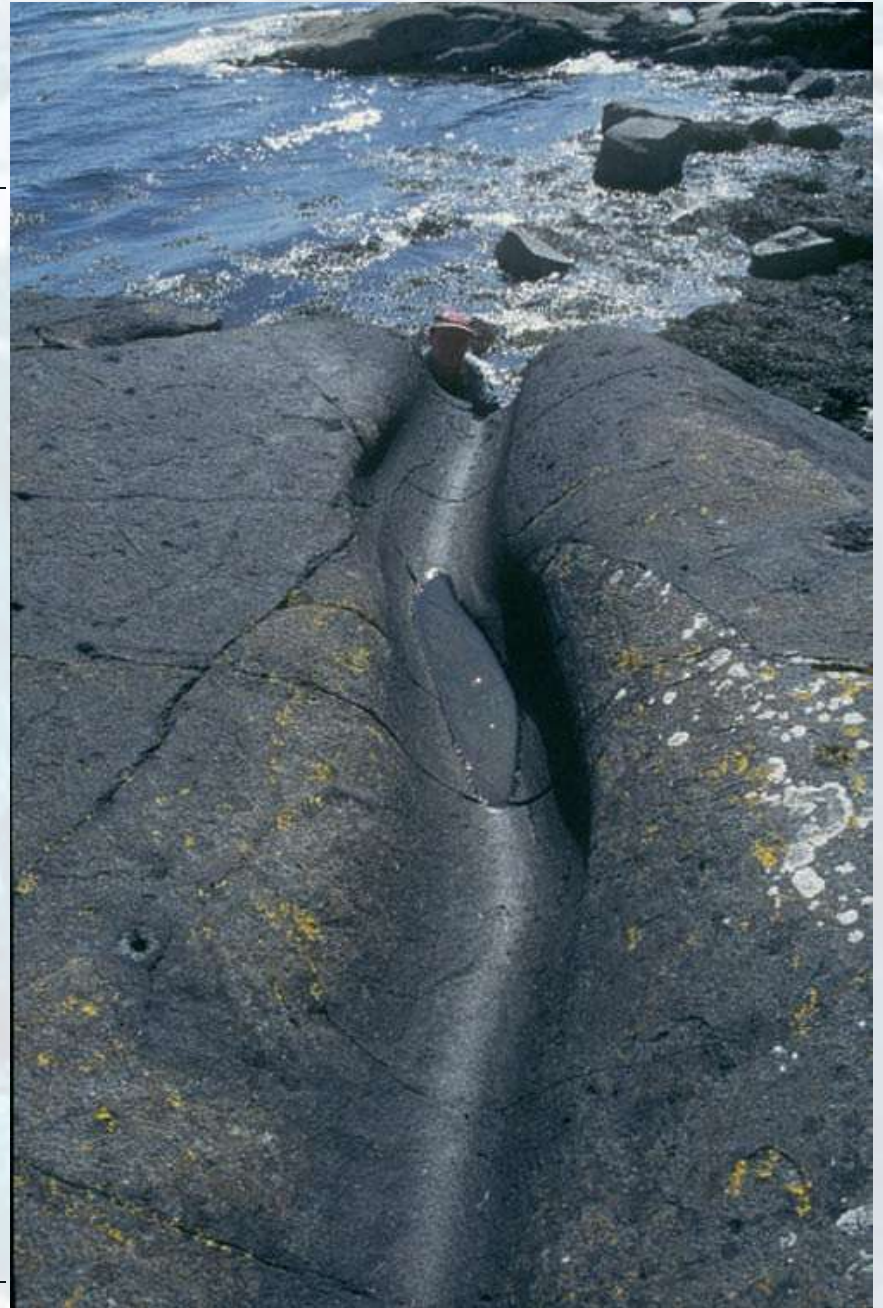


-
- ▶ Sistem povezanih jam nastaja tam kjer voda izkorišča tok ledenika čez ovire in nastajajo območja nizkega pritiska. So prisotne povsod na bazi ledenika in povezane med seboj, vendar voda potuje le počasi.





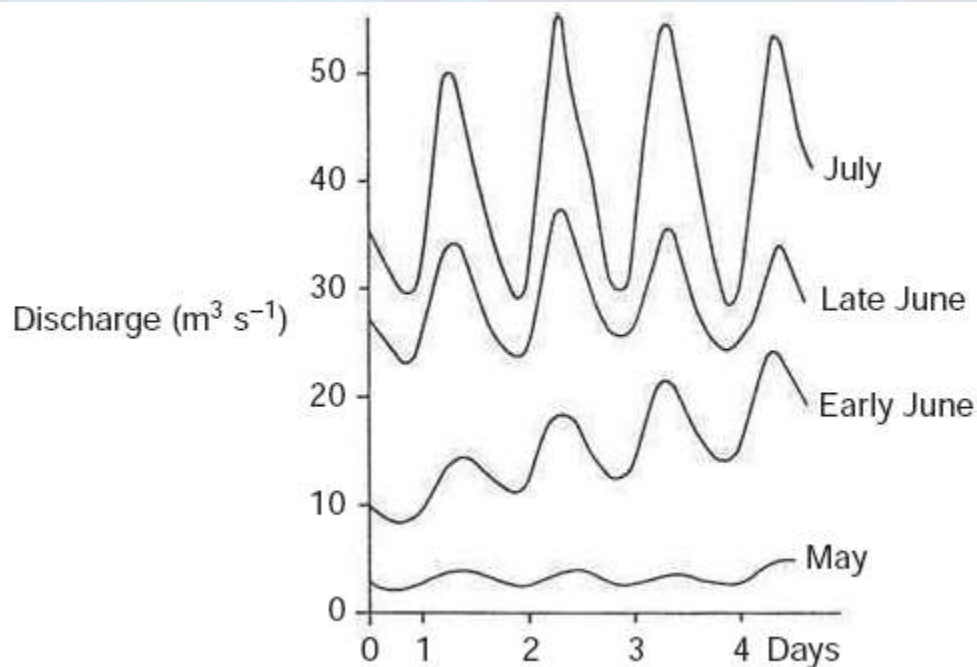
Voda lahko vreže kanale navzgor v led: R
(Röthlisberger) kanali,
Ali pa v podlago: N (Nye) kanali.



Spremembe v odtoku ledenice

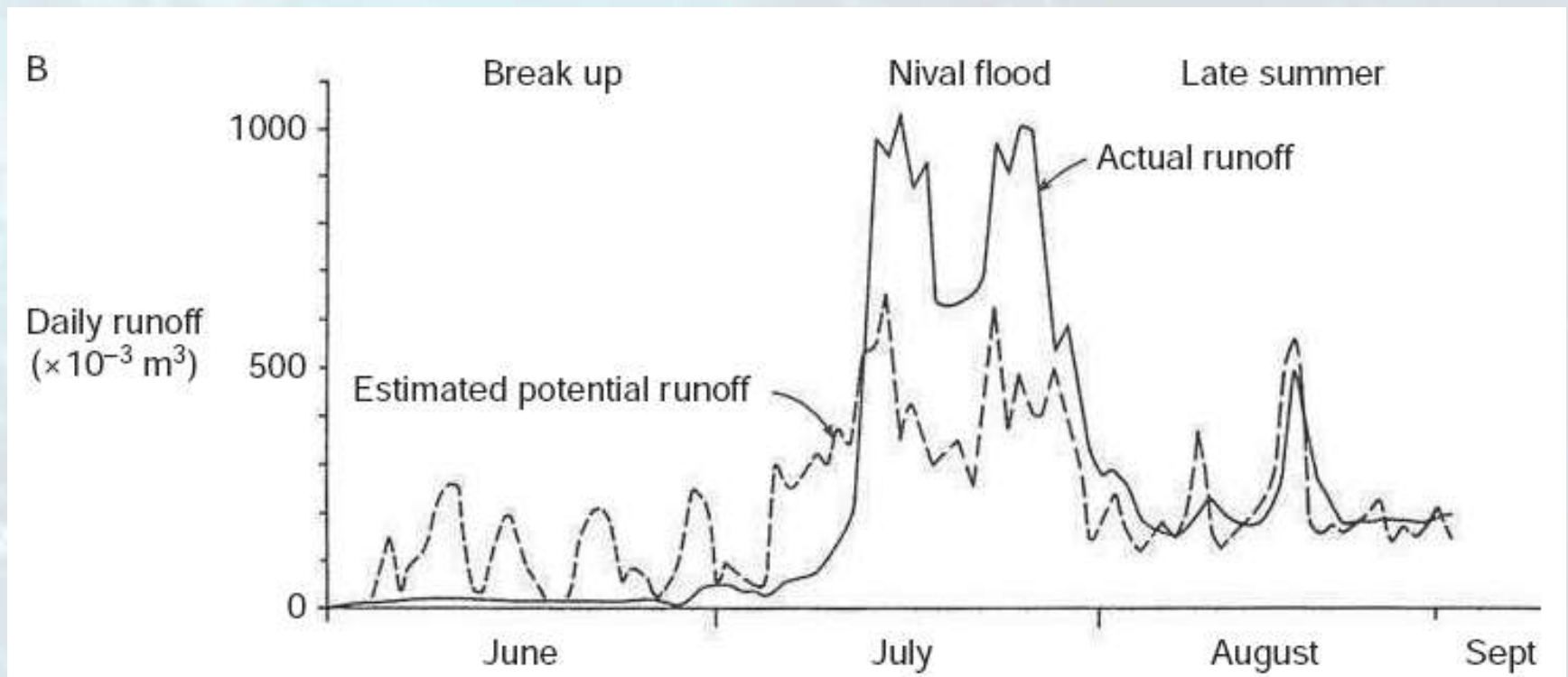
Odtok ledenice iz ledenika se dramatično spreminja tako v dnevno kakor tudi sezonsko.

Dnevne variacije so odvisne od temperatur ozračja, ki vplivajo na ablacijo ledenika. Majhni odtoki so ponavadi zjutraj in se povišajo proti popoldnevu in večeru. V zimskem času je tako spreminjanje zmanjšano v poletnih mesecih pa doseže maksimum.



Spremembe v odtoku ledenice

Sezonske variacije so podobno velike. Odražajo dve stvari: sezonsko pogojeno ablacijo ter sezonsko pogojeno razvijanje interne drenažne mreže ledenika.



Spremembe v odtoku ledenice

V sezonsko pogojenih lednikih lahko razločimo:

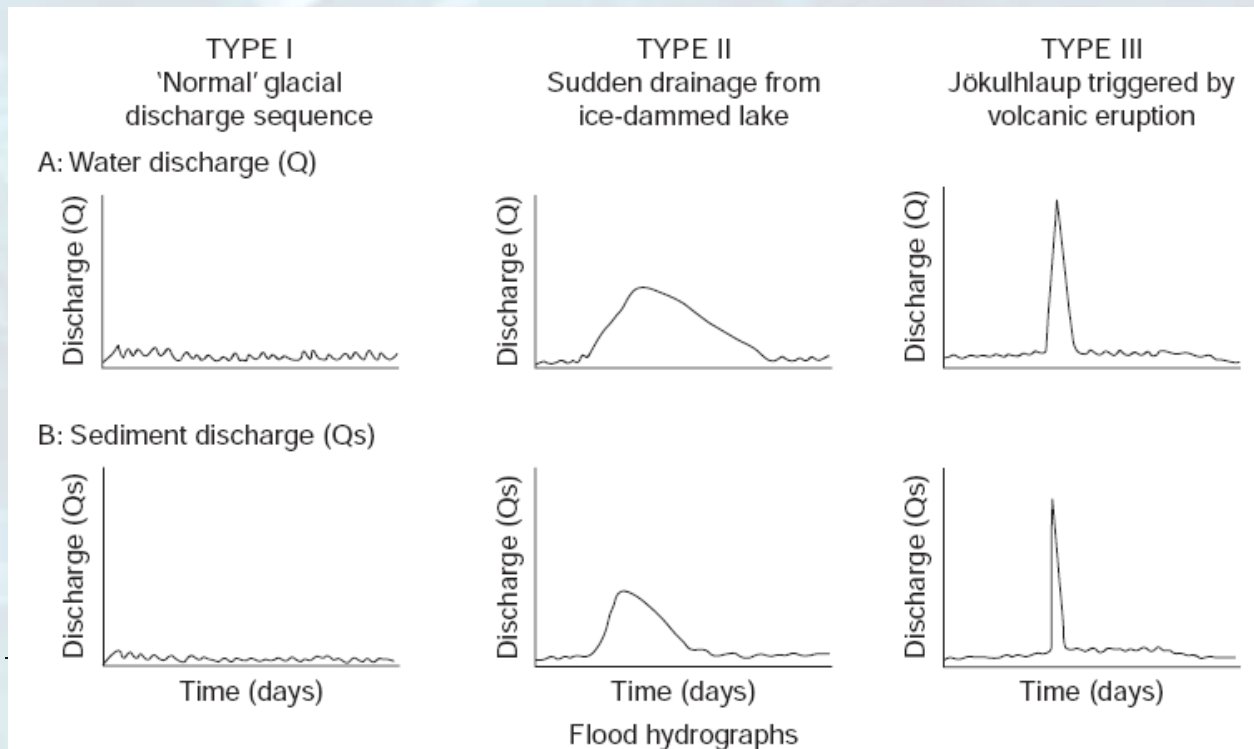
- ▶ Pomladno taljenje, ki stopi novi zimski sneg, pritisk vode se poveča in led v proglacialnih rekah se lomi.
- ▶ Pozno pomladansko taljenje. Ablacija zimskega snega poteka v polnem teku na površju, odtok v vseh kanalih in tunelih se povečuje in ti rastejo in se povežejo v drenažno mrežo in količina vode presega zmoglosti odvajanja.
- ▶ Zgodnje poletje: zaradi dobro razvitega sistema drenaže se sprostí večino uskladiščene vode. Dnevni odtoki presegajo količine ledenice, ki nastajajo in sistem se v kratkem času izprazni
- ▶ Pozno poletje: sistem se je izpraznil, drenažni sistem dobro deluje in drenira toliko vode kot jo nastane. Pritisk vode je na minimumu.
- ▶ Jesen: konec taljenja iz površine ledu povzroči dramatičen padec količine ledenice in kanali se zapirajo.
- ▶ Zima: kanali se zapirajo in vsa ledenica nastaja le na bazi zaradi trenja



Spremembe v odtoku ledenice

Na nekaterih ledenikih pa se ta sezonski cikel prekine z obsežnimi subglacialnimi poplavami, ki presežejo pretoke za nekaj razredov magnitude. Imenujejo se **Jökulhlaups**. (<http://www.youtube.com/watch?v=fjll-u-4lLg>)

Nastanejo zaradi subglacialne vulkanske aktivnosti ali pa hipne drenaže z ledom zajezenih jezer in ti slednji so najbolj pogosti.



EROZIJA LEDENICE

Ledenica lahko pomembno erodira pokrajino. Erozijska je tako kemična kot mehanska.

Efektivnost erozije pa je odvisna od dovzetnosti matične kamnine za erozijo (tektonika ipd.), režima odtoka (predvsem količina, hitrost in turbulentnost vode) ter od količine sedimenta, ki ga voda nosi s seboj.

Mehanska erozija deluje preko dveh procesov: fluvialna abrazija ter fluvialna kavitacija.

Fluvialna abrazija nastane zaradi talnega in suspendiranega sedimenta, ki ga ledenica nosi s seboj. Ta sediment abradira stene kanala.

Fluvialna kavitacija pa nastane, ko hitrost vode preseže 12m/s. Takrat v turbulentni vodi začno nastajati področja nizkega pritiska v katerih se voda lahko celo upari in tvori mehurčke. Ko ti pripotujejo v območje višjega pritiska pride do trenutne implozije. Če se to zgodi v bližini stene kanal, se iz tam izbijejo zrnca. Proces je pozitivno povratno povezan.

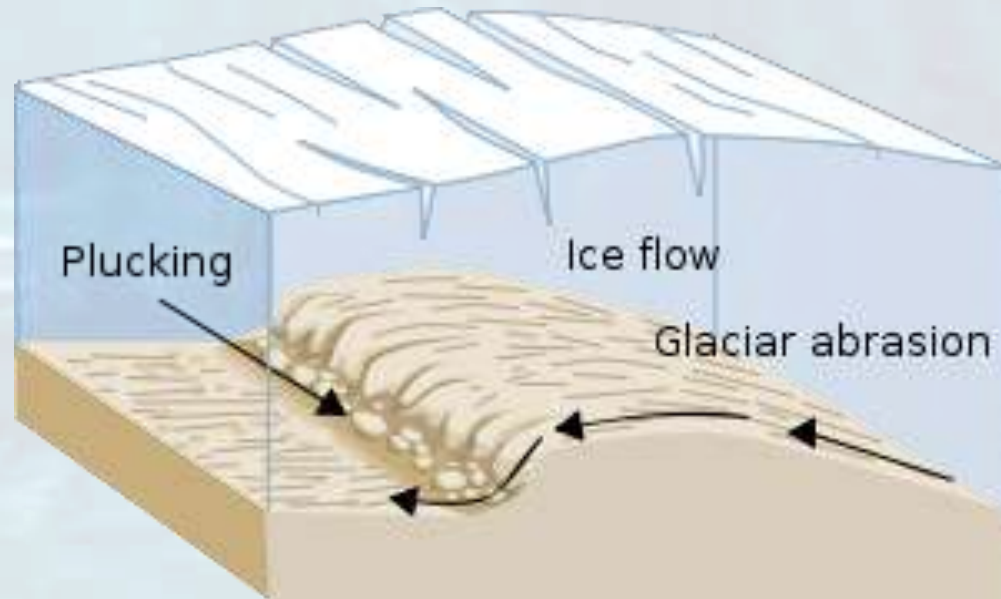


GLACIALNA EROZIJA

Z izrazom glacialna erozija imenujemo skupek procesov s katerimi lednik odlomi ter odnese kamine in sediment. Ledeniki in ledeni pokrovi so tako v osnovi erozijski.

Procesi in mehanika ledeniške erozije so slabo pozani, predvsem zaradi tega ker poteka pod ledom, kar onemogoča neposredna opazovanja.

Poznamo dva osnovna principa: glacialna abrazija (z ledom, ki nosi seboj veliko materiala) ter glacialno “skubljenje” (glacial plucking ali quarrying), ki odlomi večje kose iz matične podlage.



GLACIALNA ABRAZIJA

Ledeniška abrazija je proces v katerem kamini delci, ki se transportirajo v bazi ledenika praskajo in brusijo odstranjajo kamnito podlago (analogija je brusilni papir, oziroma pravimo, da ima ledenik zobe).

Ledeniška abrazija tvori raze in strije ter zgladi kamnino.

Koščki kamnin, ki so večji od 1 cm večinoma razijo kamnino, medtem ko jo manjši brusijo. Iz vidika neto erozije je bolj pomembno brušenje.

Zmožnost abrazije ledenika je odvisna od: pritiska med ledom in podlago, prisotnosti in hitrosti drsenja ledenika po podlagi ter koncentracije delcev v ledu.

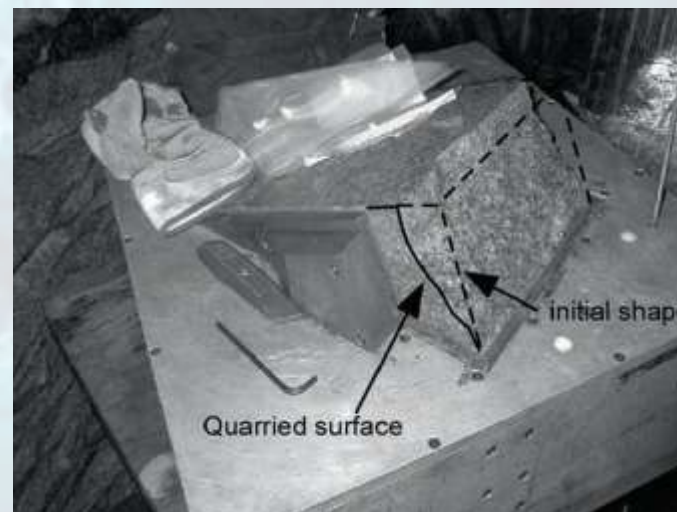


LEDENIŠKO DOLBENJE

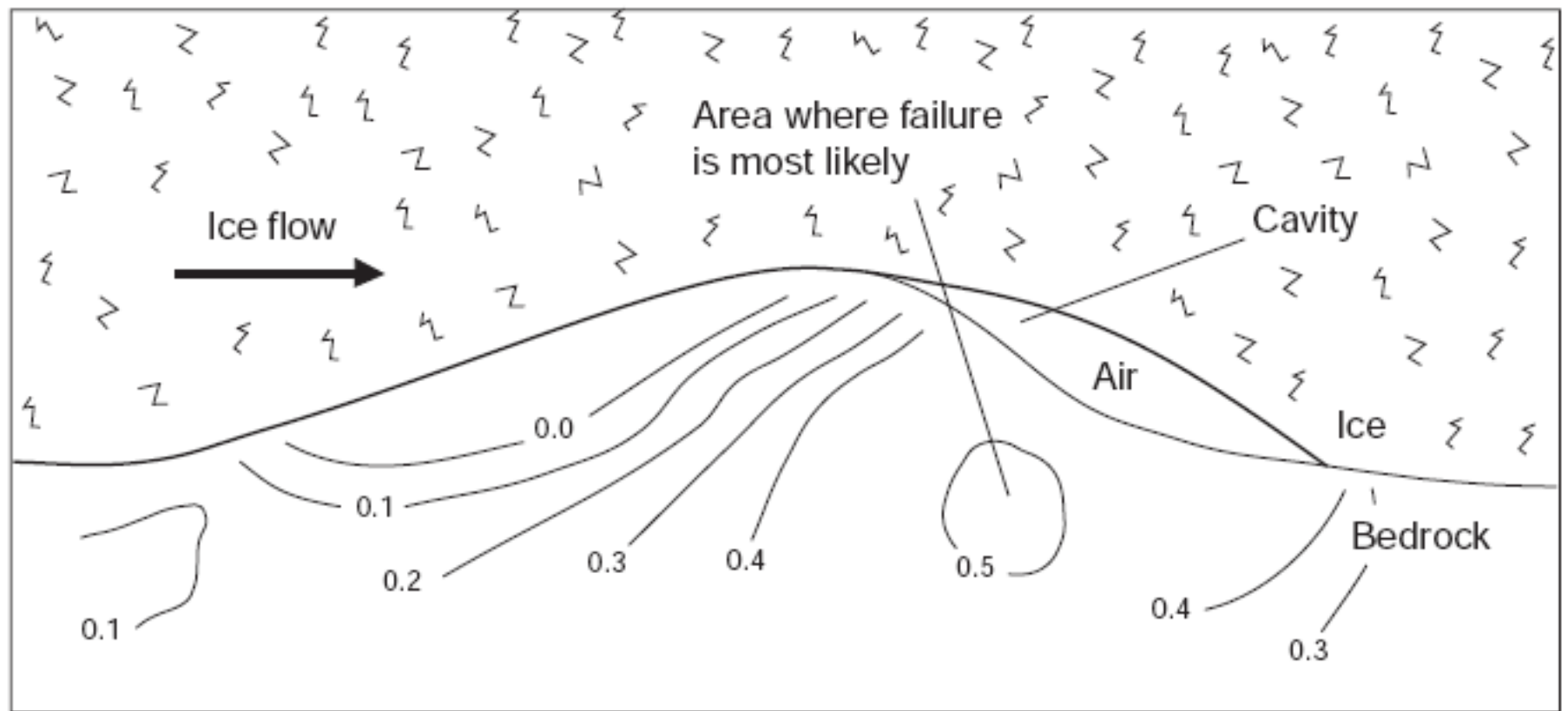
S tem izrazom označimo ledeniško odstranjevanje večjih drobcev iz matične kamnine. To se zgodi v dveh korakih: lomljenje ali drobljenje kamnine in ujetje odlomkov v led.

Napredovanje razpok, ki povzročijo lomljenje in drobljenje je bistveno za dolbenje. Razpoke so lahko starejše (in odražajo podedovan tektonski zlog), lahko nastajajo pred prihodom ledenika z zmrzalje ali pa jih naredi ledenik sam (zaradi visokih pritiskov vode, ki se lahko pojavijo na meji ledu in podlage).

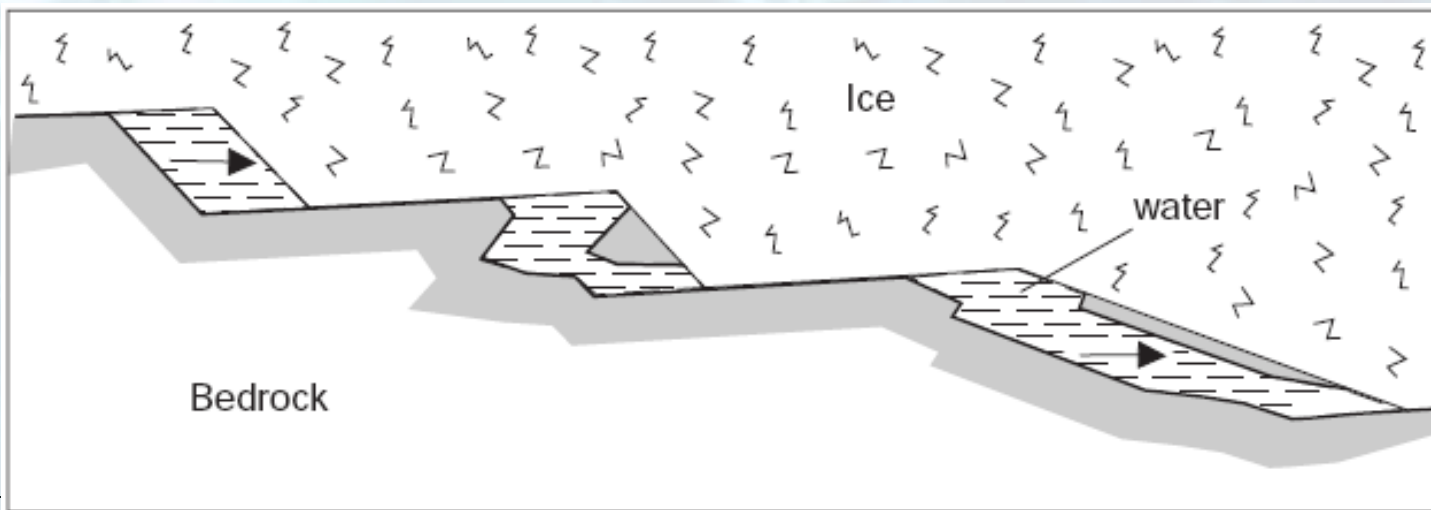
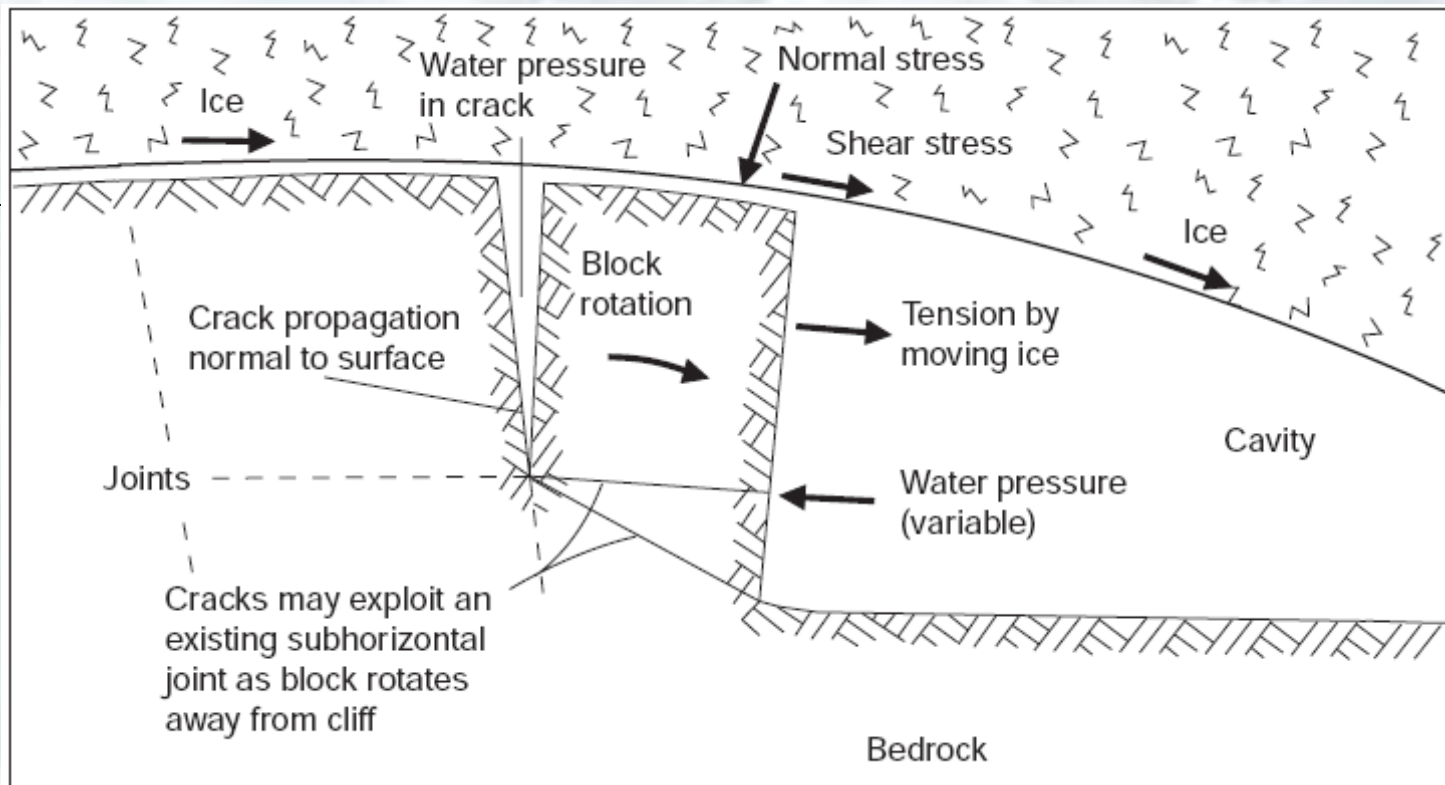
Posredno lahko nastajajo razpoke tudi zaradi odstranjevanja velikih količin sedimenta in s tem sproščanja kamnine.











UJETJE MATERIALA

Ujetje materiala je proces v katerem se drobci odstranijo iz matične kamnine in ujamejo v led. Odstranitev in ujetje je posledica ravnovesja med silami vlečenja in trenja (oboje izvaja ledenik na podlago).

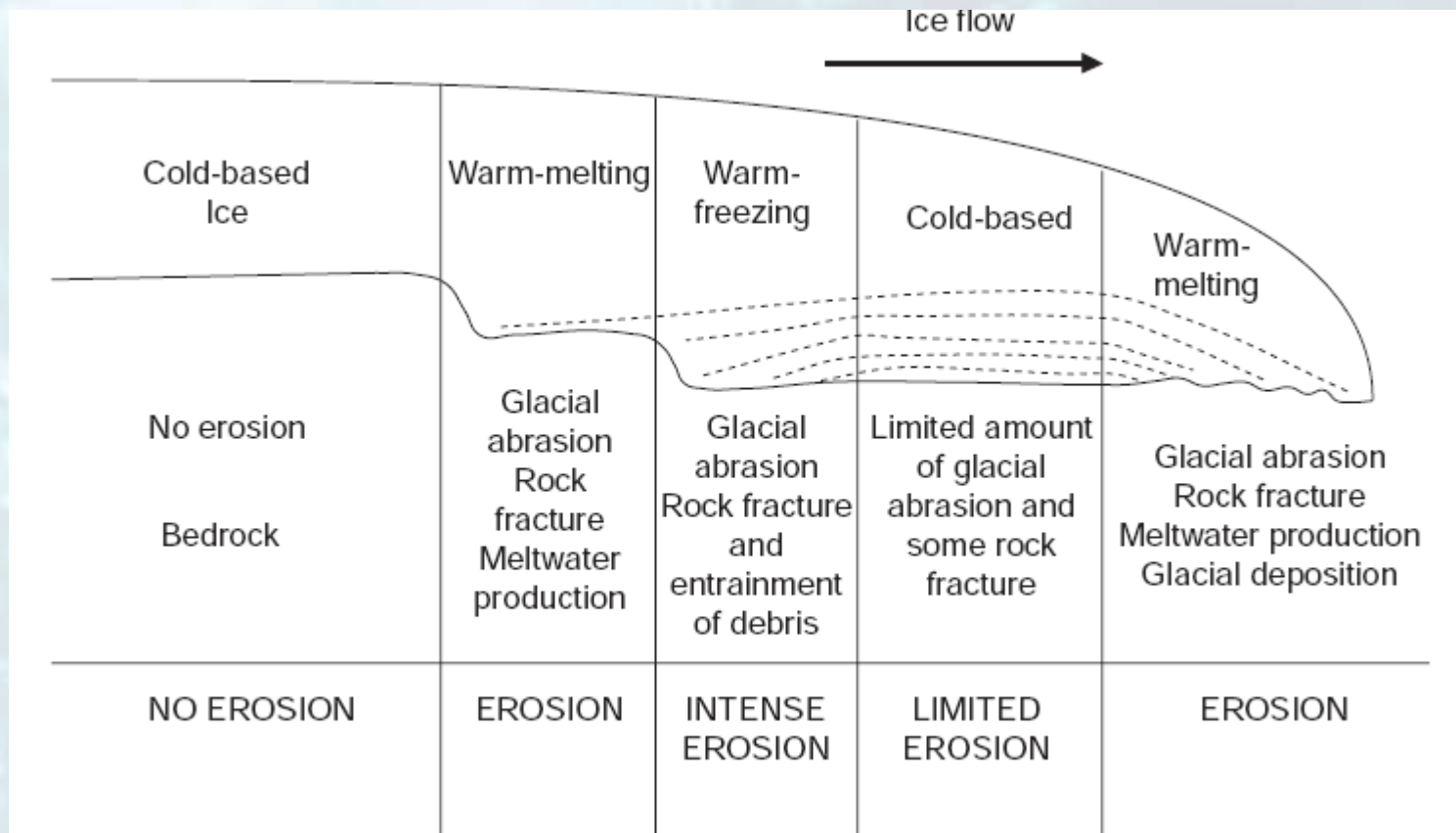
Ujetje pa lahko poteka na naslednje načine:

- ▶ Primrznjenje ledu na podlago (heat pump effect).
- ▶ Sila vleka med ledom in kamnino odstrani in ujame delce.
- ▶ Drobir v votlinah se prepoji z ledom in potem ko se votlina zapre ga led odnese s seboj.
- ▶ Zmrzovanje ledenice na zatišni strani ovir.
- ▶ Zmrzovanje zaradi podhlajene vode.
- ▶ Zmrzovanje z vodo prepojenega materiala.
- ▶ Ujetje v razpoke in narive v ledu.



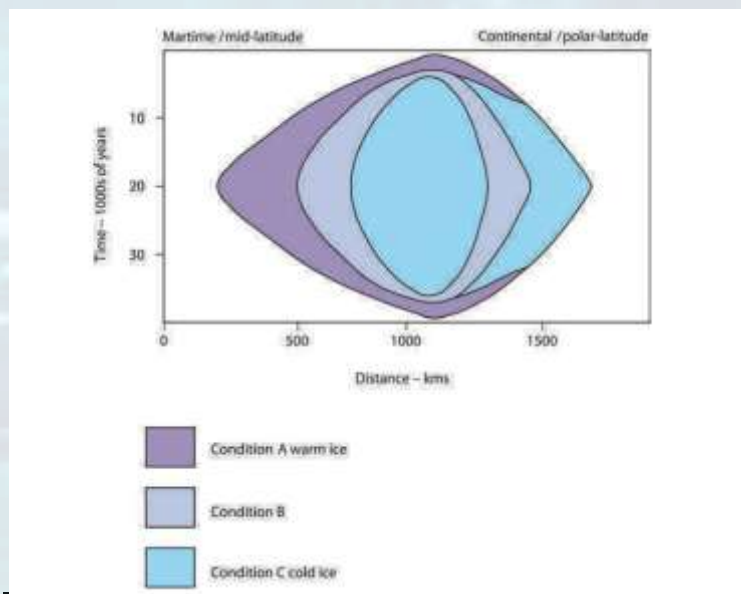
GLACIALNA EROZIJA

Vzorec pojavljanja glacialne erozije je večinoma odvisen od bazalnega termalnega režima.



GLACIALNA EROZIJA

- ▶ Glacialna erozija (sploh abrazija) je najbolj učinkovita v področjih kjer so topli ledeniki in kjer imamo veliko ledenice.
- ▶ Glacialna erozija je omejena v hladnih ledenikih, kjer imamo tudi malo ledenice
- ▶ Dolbenje ledenika je predvsem močno tam, kjer se izmenjujejo topli deli lednika (kjer nastaja ledenica) s hladnimi (kjer ponovno zmrzne)
- ▶ Če se ledeni pokrov razvije tako, da je v notranosti hladen in topel v obrobju, bo erozija potekala na obrobju in sledila premikom ledenika



GLACIALNA EROZIJA

Čeprav je bazalni termalni način tisti, ki najbolj definira erozijo, pa v manjšem merilu na erozijo vplivajo še:

- ▶ Geologija matične podlage (poroznost, visoki porni tlaki, močno pretre kamnine ipd.).
- ▶ Področja preko katerih led teče hitreje, se bolj erodirajo.
- ▶ Tam kjer nastaja več ledenice, bo erozija večja.
- ▶ Spremembe v tlakih vode tudi povečajo erozijo.
- ▶ V področjih, kjer imamo ponavljajoče se glaciacije, je večino erozije vezano na prvo pojavljanje ledenikov na tem območju.



Erozijske ledeniške oblike

Nekdanji ledeni pokrovi in ledniki za seboj pustijo značilen tip pokrajine, ki jo sestavljajo posamezne ledeniške erozijske oblike.

Običajno jih razdelimo na mikro, mezo in makroskopske oblike.

Mikroskopske erozijske oblike dosegajo dimenzije manj kot 1 m in so običajno prekrivajo oblike večjih dimenzij. Poznamo strije, „crag and tail“ razpoke zaradi trenja, p-kanale in kanale manjših dimenzij.

Mezoscopske erozijske oblike so oblike med 1 m do 1 km in združujejo pozitivne oblike (whaleback ali streamline bedrock), žlebove in bazene, kanale nastale zaradi ledenice.

Makroskopske erozijske oblike pa so oblike, ki so večje od 1 km. V to skupino štejemo območja erozijskega glajenja (areal scour), doline, fjorde, cirkeje,.



Ledeniške brazde ali strije

Ledniška abrazijo povzroči nastanek brazd v matični kamnini, ponavadi v kombinaciji z zglajenim površjem matične kamnine.



Ledeniške brazde ali strije

V matično podlago jih vrežejo drobci kamnin v ledu. Tako nam kažejo na orientacijo toka ledu, ne pa njegove smeri.

Brazde so ponavadi nekaj mm globoke in dolge do nekaj metrov.

Poleg smeri nam povejo tudi to, da je ledenik vseboval kamnit drobir, da je bil ledenik topel in se premikal z drsenjem po podlagi in da so bili srednje močni normalni pritiski.



„crag and tail“

So pozitivne reliefne oblike na zglajeni površini, ki nastanejo na zatišni strani, ponavadi za kakšnim bolj odpornim delom kamnine.



Razpoke zaradi trenja

Razpoke zaradi trenja so manjše razpoke, vdolbine in nazobčani deli in nastanejo tam, ker je led pritisnil ob podlago večje kose kamnine.

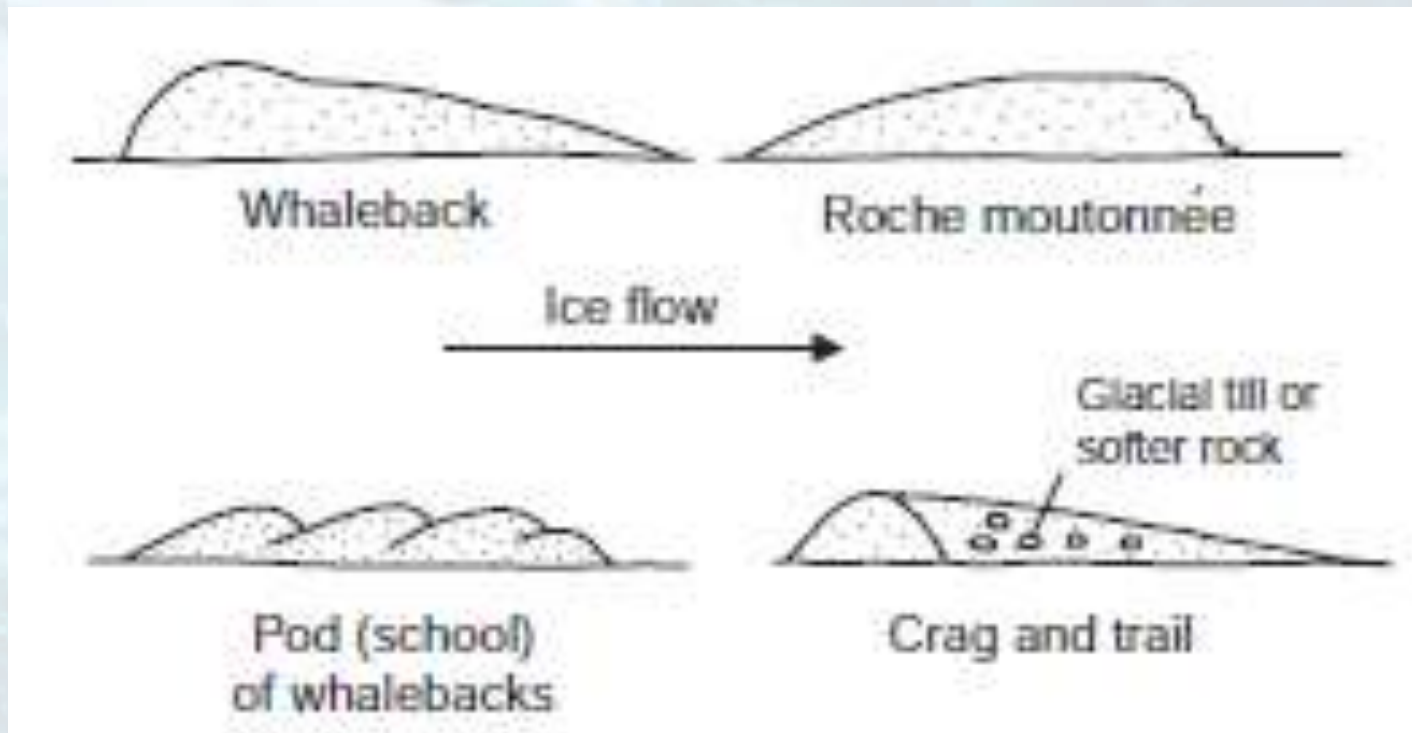


P- oblike (plastically moulded forms)

So gladke valovite depresije vrezane v matično podlago. Lahko so skledaste, srpaste oblike in kanali, ki so dolgi do 1 m in le redko presegajo 10 m. Njihov nastanek še ni pojasnjen (lahko nastajajo z erozijo z lednico ali z erozijo suspenzije tila).



Mesoskopske oblike



MESOSKOPSKE OBLIKE: izbokline“streamline“

Najbolj pogoste so pozitivne izbokline matične kamnine (streamline) in imajo veliko imen (kamniti drumlini, whaleback, streamline hills). So izbokline, ki jih je lednik zgladil na vseh straneh

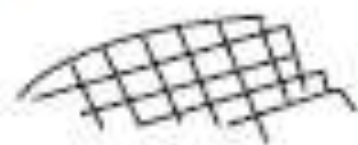


„stoss in lee“ oblike

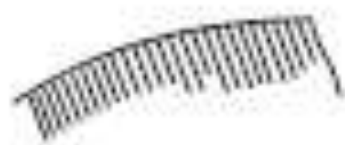
So oblike na katere poleg abrazije deluje tudi „skubljenje“. Ponavadi imajo gladko in manj strmo spolirano prednjo stran in relativno ostro definirano zatišno stran. Najbolj pogosta oblika je „roche moutonne“



A



Jointing



Foliation
dipping down ice



Layering
dipping up ice

B



Massive rock



Foliation
dipping up ice



Layering
dipping down ice

C



Layering
dipping down ice



Layering dipping
gently up ice



Layering dipping
steeply up ice

Direction of ice flow



ŽLEBOVI IN BAZENI

Žlebovi nastajajo zaradi glacialne abrazije ali pa zaradi erozije z ledenico,. Podobni so brazdam, le da so večjih dimezij (od 10 do 100m dolge, do metra globoke in nekaj m široke).

Kamniti bazeni (od nekaj m do nekaj 100m v premeru) so individualne depresije vrezane v matično podlago. In nastajajo v kombinaciji tektonsko pretrke kamnine in ledeniškega skubljenja



KANALI ZARADI LEDENICE

Kanali, ki jih izdolbe ledenica lahko nastajajo v različnih ledeniških podokoljih: subglacialno, ob ledeniku, pred ledenikom, na ledniku, zaradi hipnih iztokov izpod lednika ipd..

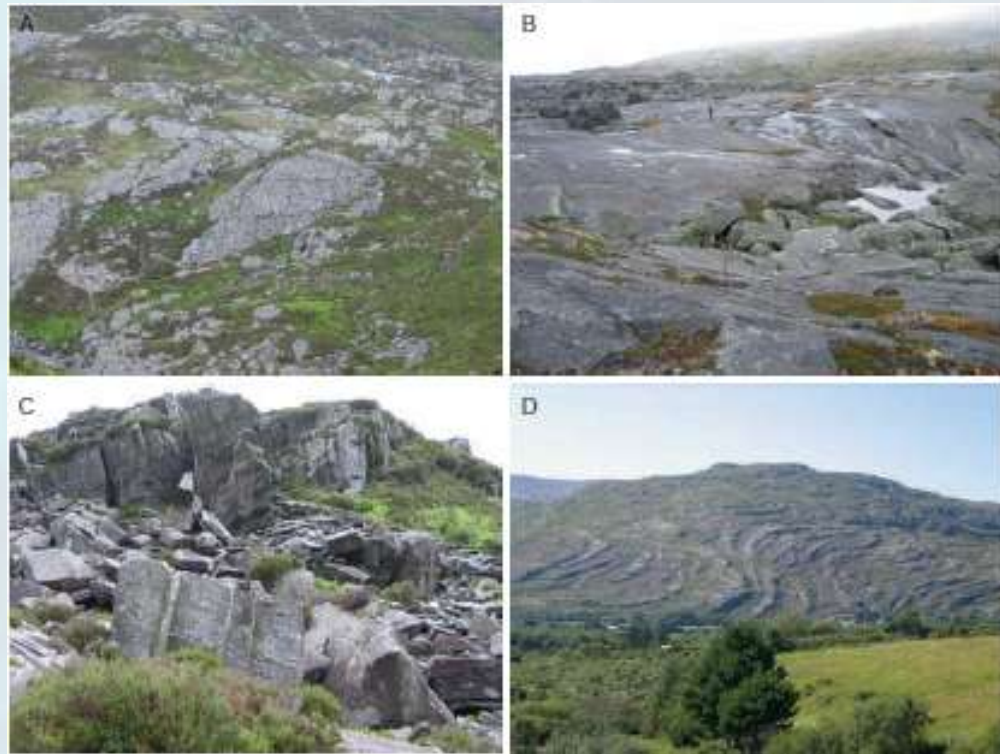




MAKROSKOPSE OBLIKE

Med makroskopske oblike štejemo oblike, ki so večje od 1 km. To so štejemo večja območja erozijskega glajenja (areal scour), jarki in fjordi, cirkeji in U doline

Območja ledeniškega glajenja so večja območja na katerih najdemo skoraj vse prej naštete manjše oblike.



JARKI IN FJORDI

Jarki in fjordi (z morsko vodo zaliti jarki) so globoke linarne oblike vrezane v podlago. Predstavljajo območja ledeniške erozije, kjer je led ujed med „topografijo“. Nastanejo tako zaradi erozije kot dolbljenja.

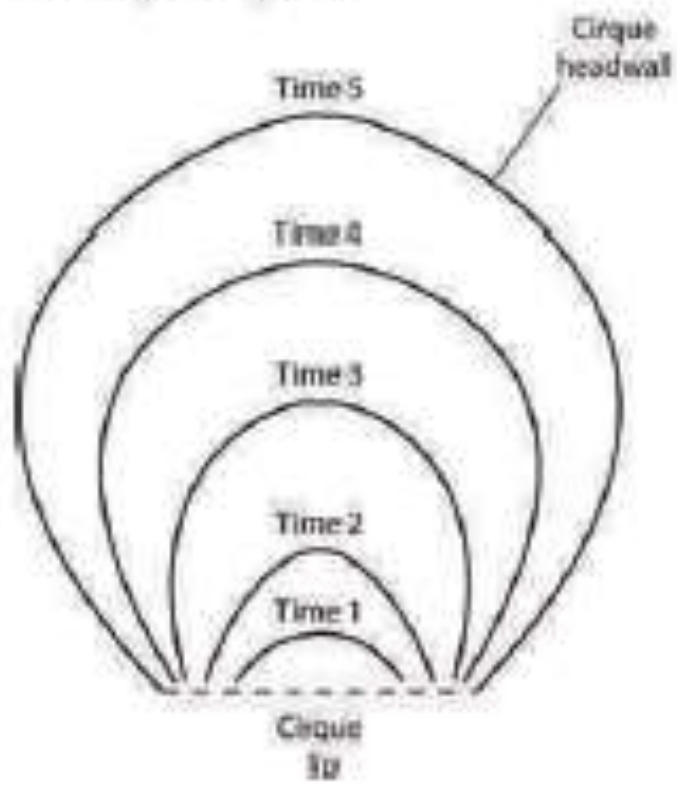


CIRKEJI („CIRQUES“)

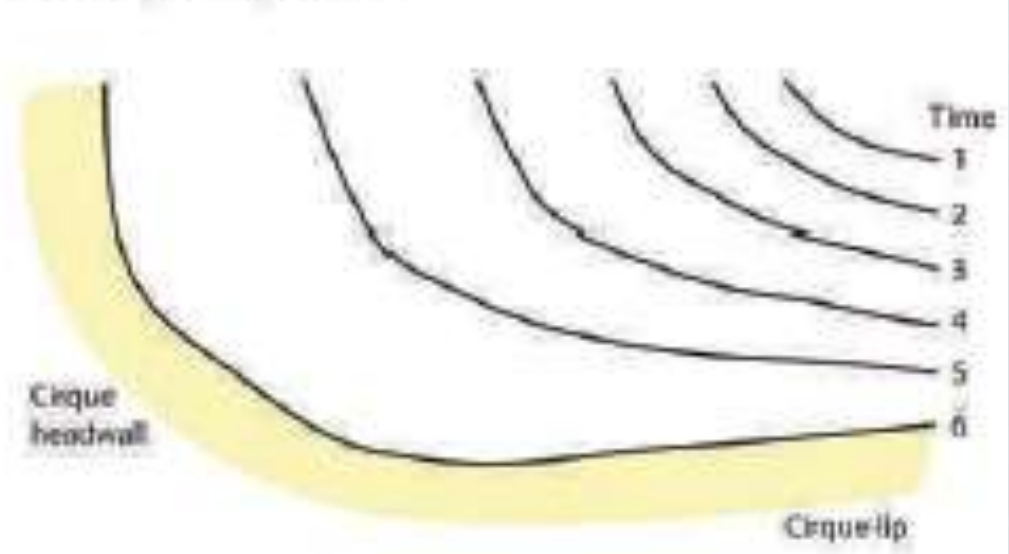
So velike skledaste doline v visokogorju, ki so na zgornji strani polkrožno omejene s strmimi klifi.



A: Cirque in plan



B: Cirque in profile

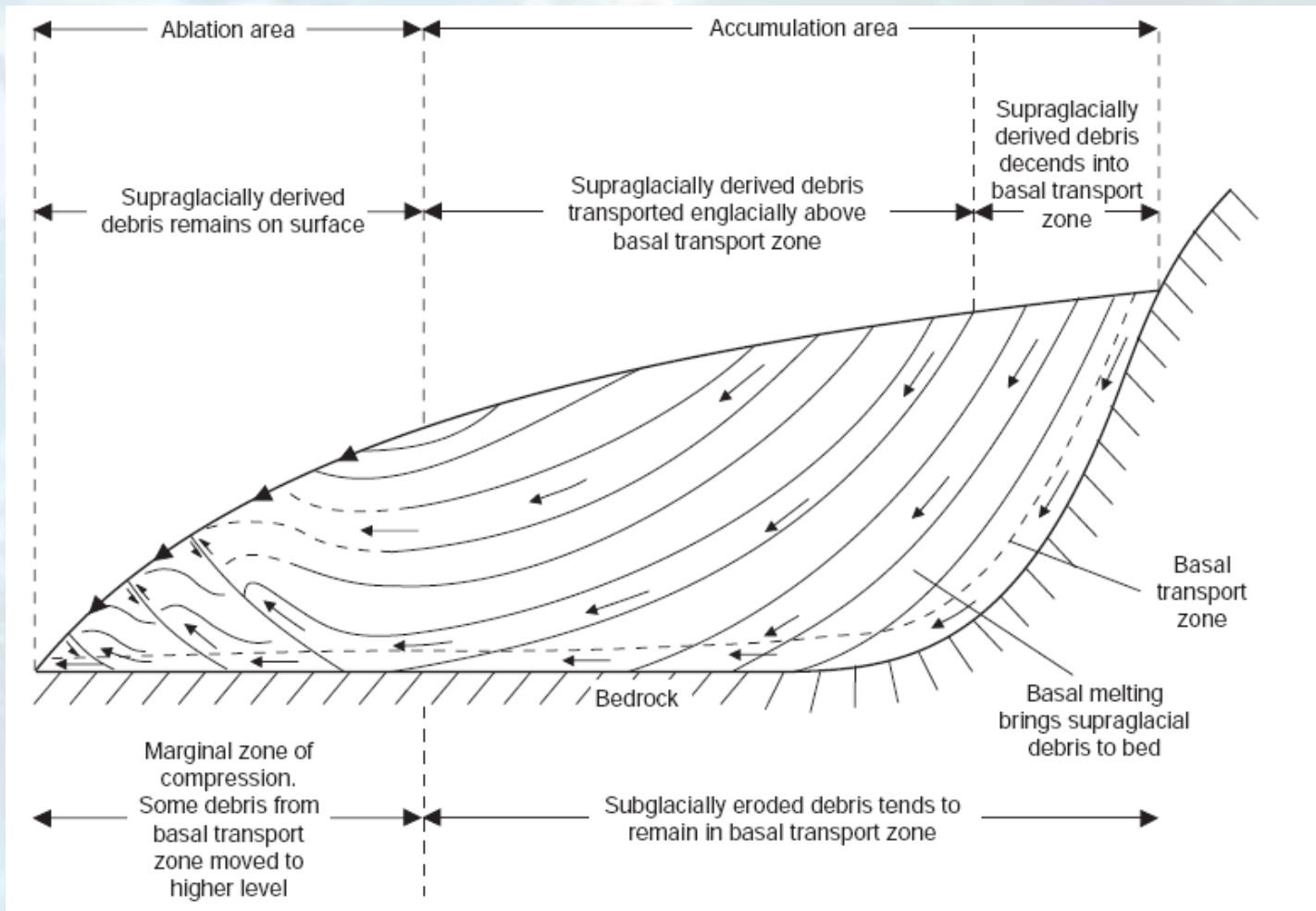


Vključevanje drobirja v led in njegov transport

Drobir v ledenik prihaja na dva načina: lahko iz vrha (supraglacialno) ali pa iz podlage (subglacialno). Supraglacialno prihaja drobir na led s plazovi (tako snežnimi kot zemljinskimi) iz predelov nad ledenikom ter tudi z vetrom (vulkanski pepel, prah, sol ipd. Subglacialno pa se drobir trga iz podlage oziroma skozi razpoke pade iz vrhnjih delov ledenika.

Drobir se v ledeniku transportira na dva načina. Visok nivo transporta (kjer sediment nikoli ne pride do podlage in se prenaša znotraj ledenika: **pasivni drobir**) Nizek nivo transporta pa pomeni transportiranje drobirja blizu baze ledenika (**aktivni drobir**). Drobir, ki pripotuje na dno ledenika, tu tudi ostane, oziroma se odloži subglacialno ali pa pripotuje do jezika ledenika.





Visok nivo transporta

V akumulacijskem delu ledenika se na površini nabira drobir, ki ga sneg kmalu prekrije. Drobir tako znotraj ledu tvori značilne pasove omejene s primarno stratifikacijo ledu (letni prirastek). Ta drobir se potem transportira englacialno, dokler spet ne pride na površje ledenika v ablacijski coni.

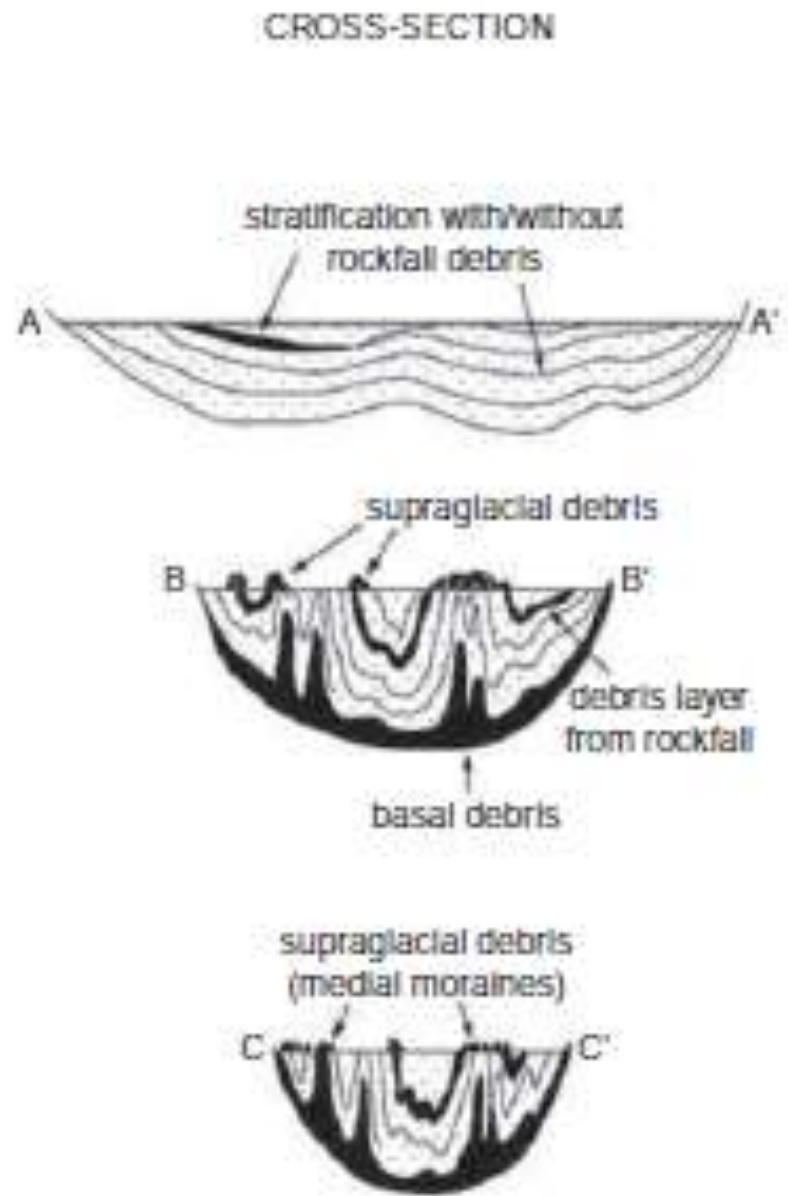
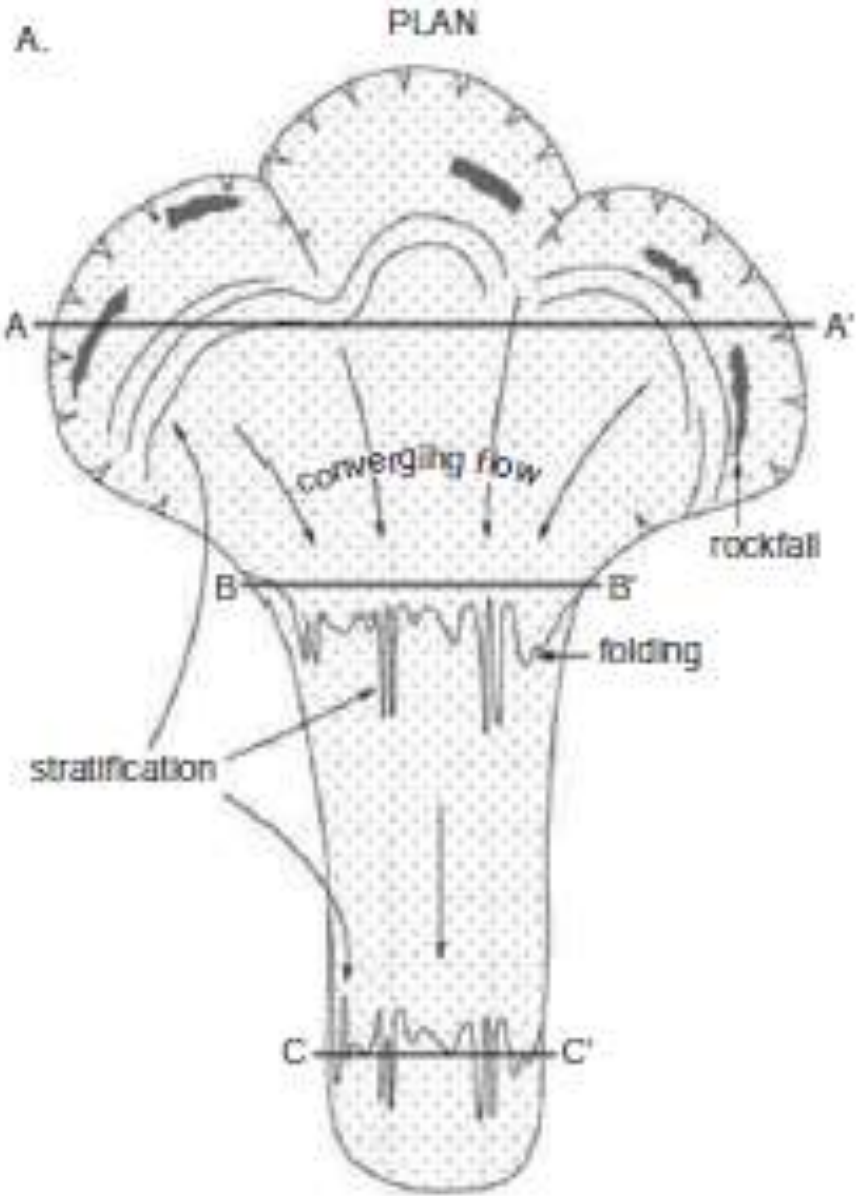
Drobir, ki pade na ledenik v njegovi ablacijski coni, pa ne bo nikoli prekrit s snegom in le v redkih primerih najde pot v notranjost lednika (recimo pade v ledeniško razpoko).

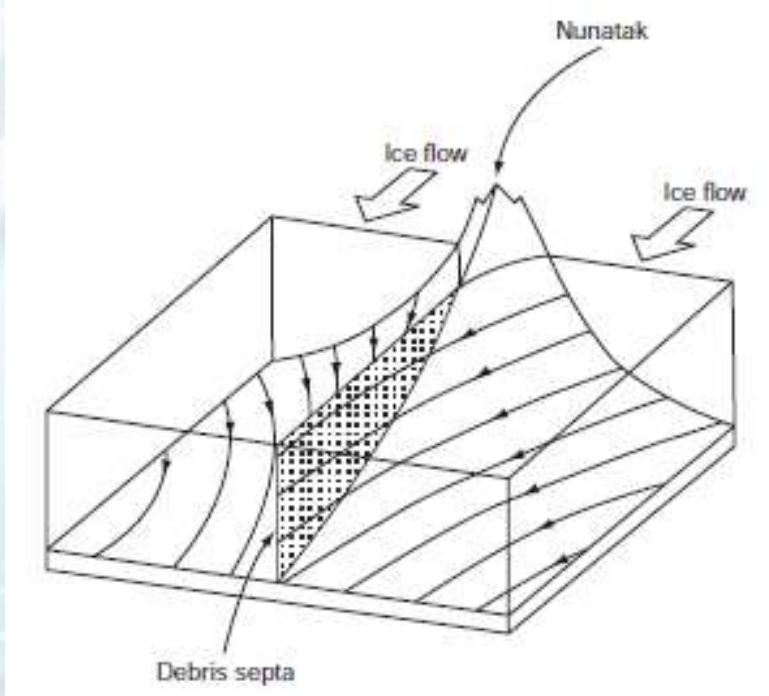
Nižje v ledeniku ta površinski drobir tvori vmesne morene („medial morrains“) ali pa tvori nepravilne plasti preko ledeniške površine.

Vmesne morene lahko nastanejo z združevanjem dveh lednikov ali pa so ablacijske morene (točkasti izvori materiala ali pa gubanje znotraj ledenika).











Drobir, ki se transportira v visokem nivoju ledenika, pogosto imenujemo pasiven drobir, saj tokom transporta ostaja večinoma nespremenjen. Ohranja svoje primarne teksture: je ostrorob, grobozrnat in vsebuje le malo drobnozrnate komponente.

Tak sediment je zelo podoben sedimentom melišč in kaže na izvor materiala v obliki padanja skal.

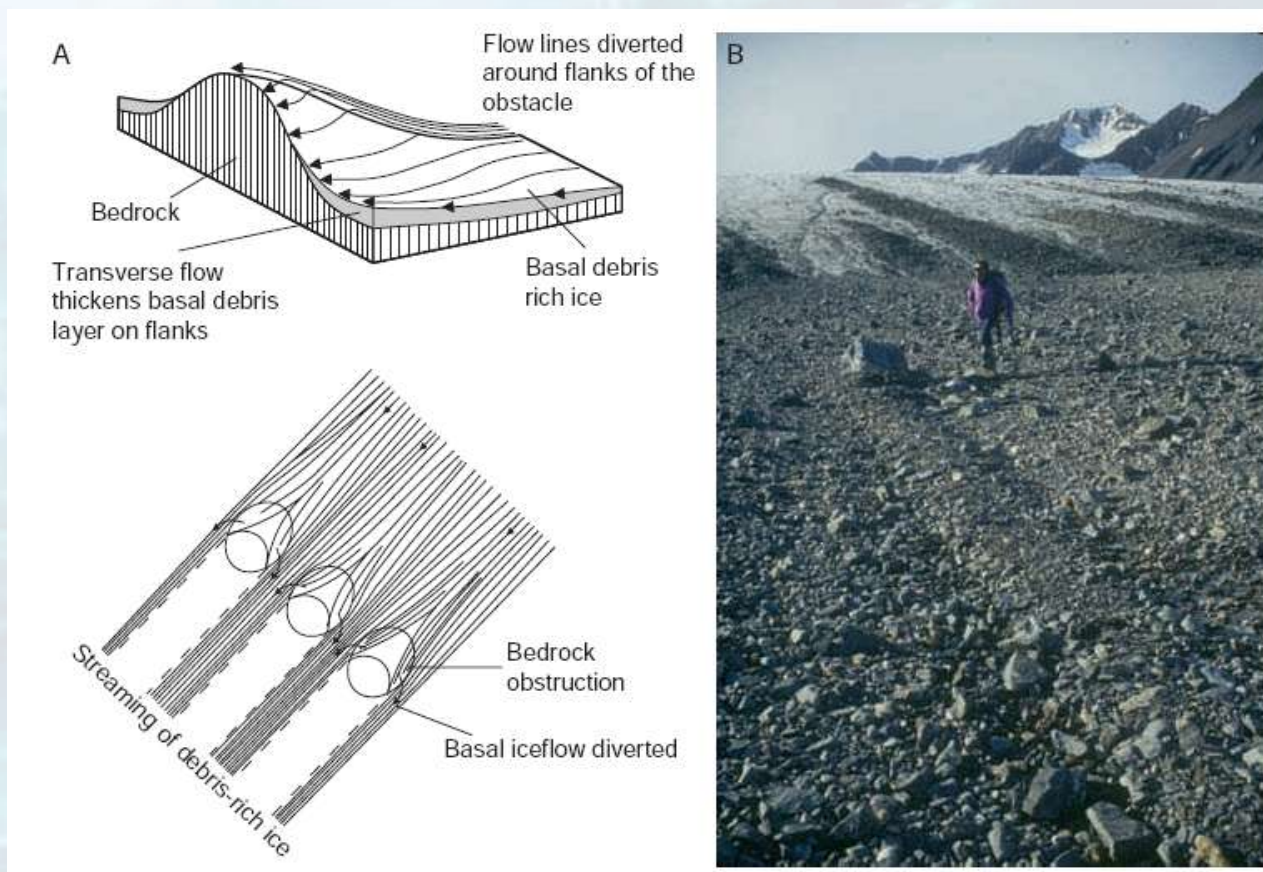


Nizek nivo transporta: bazalni transport

Nizek nivo pomeni transport drobirja blizu baze ledenika. Drobir lahko dobimo neposredno iz podlage ali pa pride iz površine ledenika. Ta drobir ostane na bazi ledenika dokler se ne odloži ali pa pride na plano v jeziku ledenika. Na površino ledenika lahko pride tudi tam, kjer se zaradi kompresije v ledeniku dogaja narivanje.

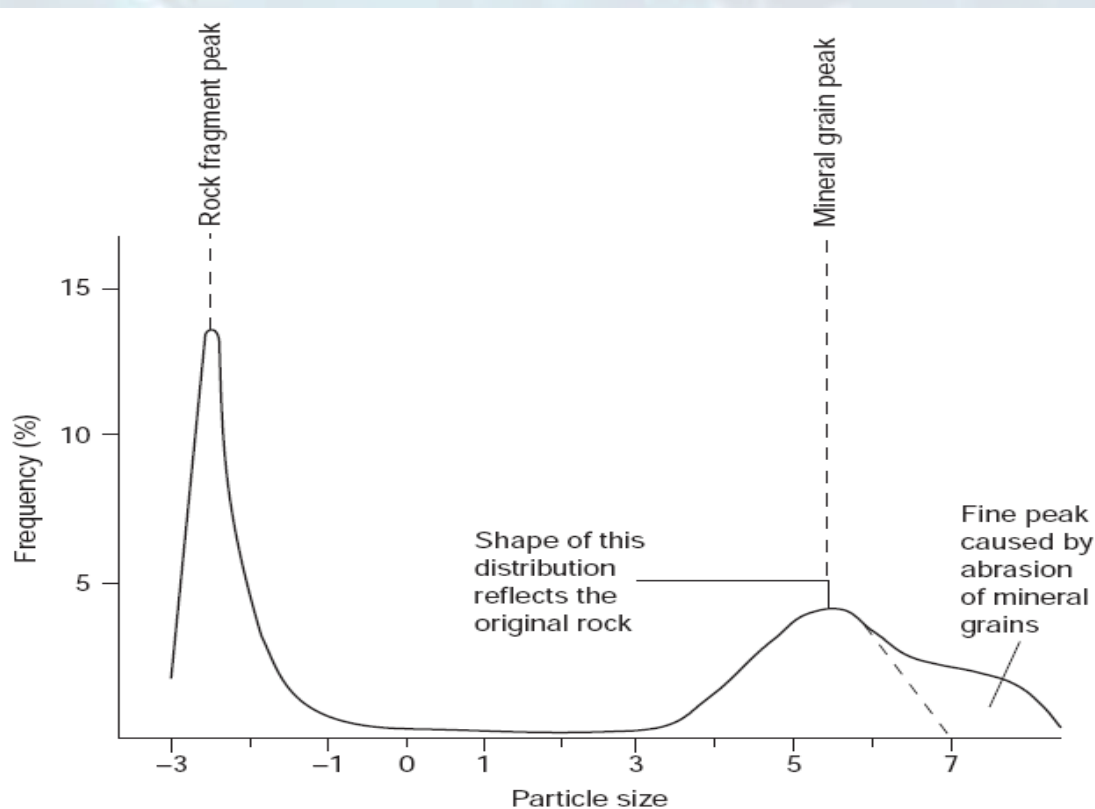


Ko je drobir enkrat ujet v ledenik se vertikalno in lateralno skoncentrira v določena območja. Vertikalno se koncentrira zaradi gubanja in narivanja bazalnih delov ledu. Lateralno pa se drobir nabira v okolici 'ovir' , ki so v matični podlagi ledenika . Tu se zaradi spremembe hitrosti led z drobirjem nabira v stranskih delih ovire.



Drobir, ki se transportira v nizkem nivoju, pogosto imenujemo aktiven drobir, saj se med transportom močno spreminja. Posamezni delci v talnem transportu se bodo drobili in brusili in so običajno zaobljeni in imajo bimodalno ali multimodalno porazdelitev. Ponavadi je material sestavljen iz treh različnih populacij zrn: A) velika zrna (litični odlomki), B) mineralna zrna, ki nastajajo z drobljenjem litičnih zrn ter C) submineralna zrna, ki nastajajo z abrazijo individualnih mineralnih zrn.

V primerih kjer ne pride dodajanja drobirja, se z dolžino transporta delež posamezne populacije spreminja (na račun drobljenja velikih zrn). V naravi to opazujemo le redkeje, saj se drobir v bazi ledenika neprestano dodaja.



Poleg velikosti, pa se s transportom menja tudi zaobljenost zrn. Zrna so obrušena in imajo 'pobrane' ostre robove. Vendar pa se obljenje ne dogaja do popolnoma zaobljenih zrn, saj se zrna tokom transporta spet drobijo. Tako je končna zaobljenost odvisna od obeh procesov, ter od odpornosti klastov na drobljenje. Bolj so klasti trdni, bolj zaobljeni postajajo.



Prenos drobirja znotraj ledenika

Prenos drobirja znotraj ledu se v večini lednikov zgodi blizu konca ledenika. Tu se led z materialom dviga zaradi kompresijskega toka.

Če ob tem nastajajo še narivi, se material lahko premakne na površje ledenika. Narivi nastajajo na politermalnih ledenikih, valovnih lednikih in ko lednik teče čez veliko prepreko.







LEDENIŠKA SEDIMENTACIJA NA KOPNEM

Ledeniki, ki se končajo na kopnem odlagajo sediment na dva načina. Neposredno iz ledu ali posredno, preko delovanja ledenice.

Neposredni sedimenti so vezani na neposredno bližino ledenika, medtem ko so posredni lahko odloženi tudi na večjih razdaljah stran od ledenika.

Neposredni sedimenti so ponavadi nesortirani, medtem ko so posredni običajno dobro sortirani in zreli.



NEPOSREDNI LEDENIŠKI SEDIMENTI

Drobir, ki se sedimentira neposredno iz ledenike poznamo pod imenom **TIL (TILL)**.

TILL: pretežno nesortiran in nestratificiran sediment. Običajno je nekonsolidiran in se odloži neposredno iz ali pod ledenikom, brez resnega retransportiranja z ledenico. Sestavlja ga heterogena mešanica grobih in drobnih delcev.

DIAMIKTON: nesortiran, nekonsolidiran sediment, ki vsebuje zelo različno velike klaste (brez geneze)



NEPOSREDNI LEDENIŠKI SEDIMENTI

Subglacialni tili

V samem ledeniku odlagamo ledeniški material s 4 osnovnimi procesi

- ▶ Nakopičenje (lodgement): nastaja tam, kjer je trenje med delcem v ledu in podlago presega silo vleka delca v ledu in klast se preneha premikati
- ▶ Taljenje (meltout): neposredno odlaganje drobirja zaradi taljenja
- ▶ Sublimacija: izparevanje ledu in odlaganje drobirja
- ▶ Subglacialne deformacije: asimilacija ledeniškega drobirja v plast, ki se deformira pod ledenikom.

Včasih so tako imenovali tudi tile (recimo 'lodgement till'), vendar v zadnjih 10 letih ugotavljajo, da so vsi tili poligenetski in na mikroskopskem nivoju med njimi ni nobenih pravih razlik, ki bi opravičile različna poimenovanja,



NEPOSREDNI LEDENIŠKI SEDIMENTI

Lahko pa tile združimo v dve veliki družini: subglacialne in supraglacialne tile.

SUBGLACIALNI TILI:

Nastajajo pod ledenikom z naborom različnih procesov: neposredno odlaganje na bazi ledenika, taljenje na bazi ledenika in odlaganje, odlaganje v votlinah, deformacija in asimilacija sedimenta, preko katerega teče ledenik.

SUPRAGLACIALNI TILI

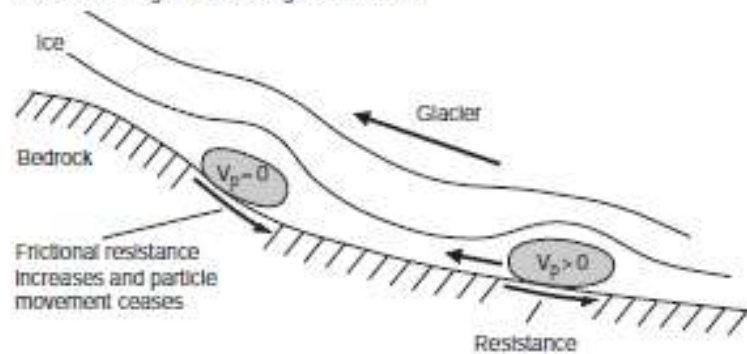
Taljenje na površini ledenika zaradi sijanja sonca, povzroči nastanek površinskih supraglacialnih tilov. To je lahko material, ki potuje v visokih nivojih transporta ledenika, prav tako pa tudi material iz baze, ki se dvigne na površje v jeziku ledenika.



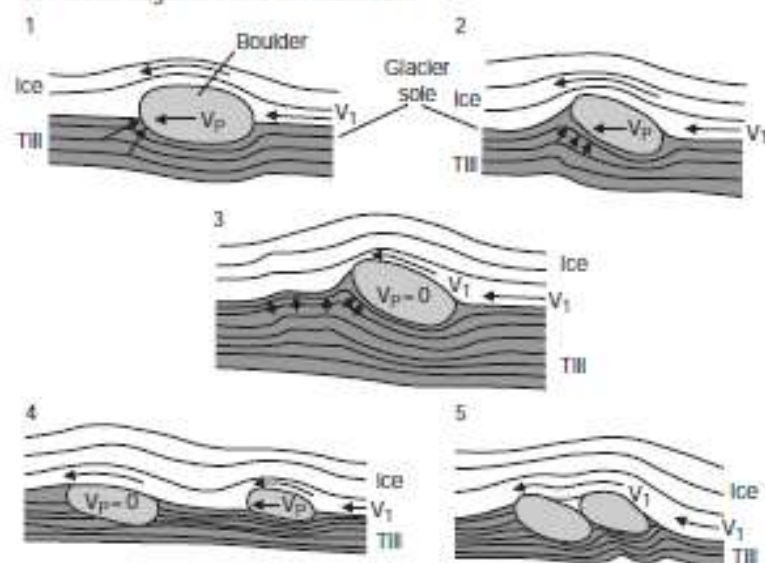
Neposredno odlaganje:

Drobec ne potuje hkrati z ledom, pač pa lahko potuje tudi počasneje. Če naleti na prepreko ali kaj drugega, ki povzroči, da je sila vleka ledu premajhna, led le teče okoli drobca ta pa ostaja pri miru.

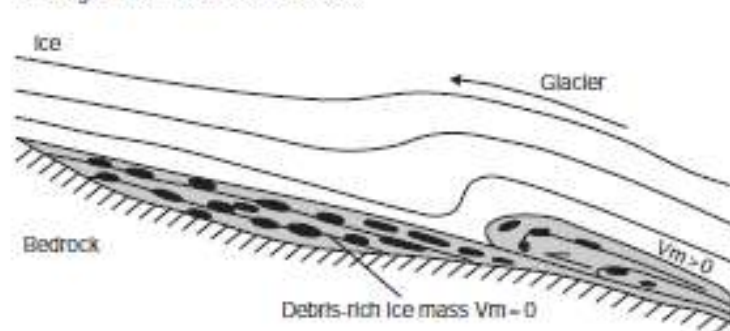
A: Particle lodgement on a rigid substratum

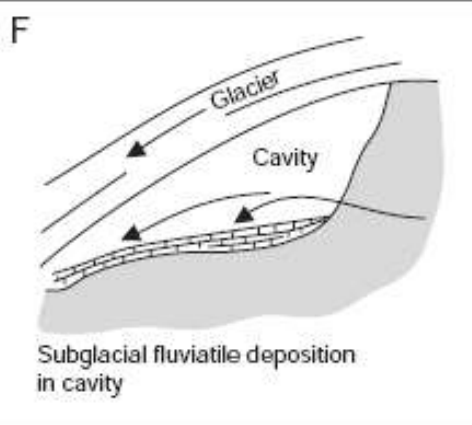
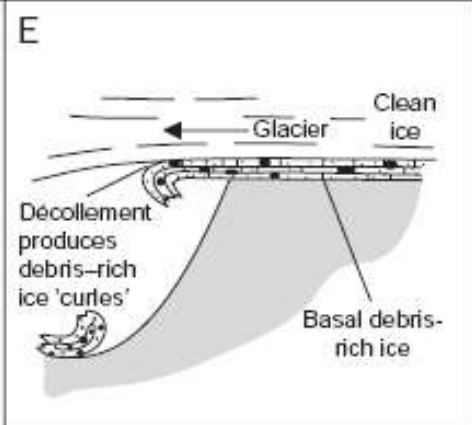
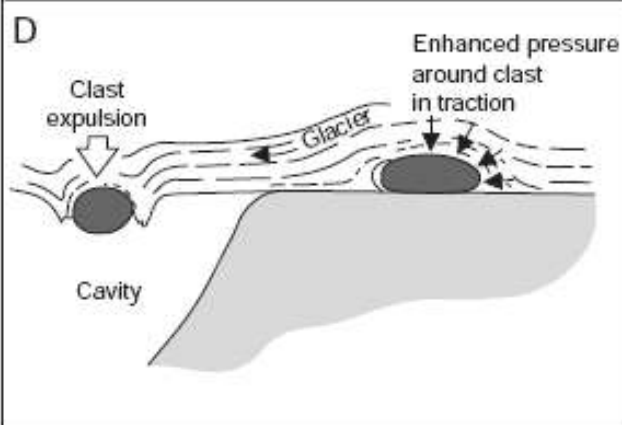
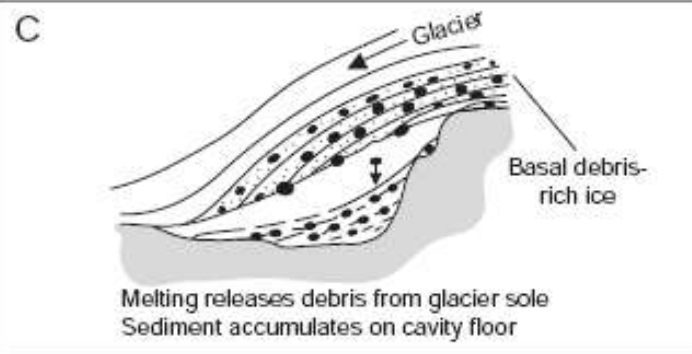
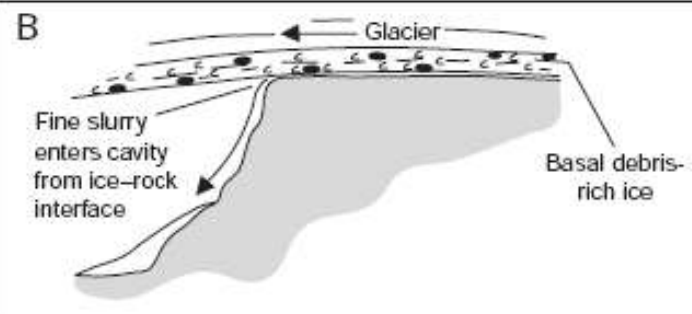
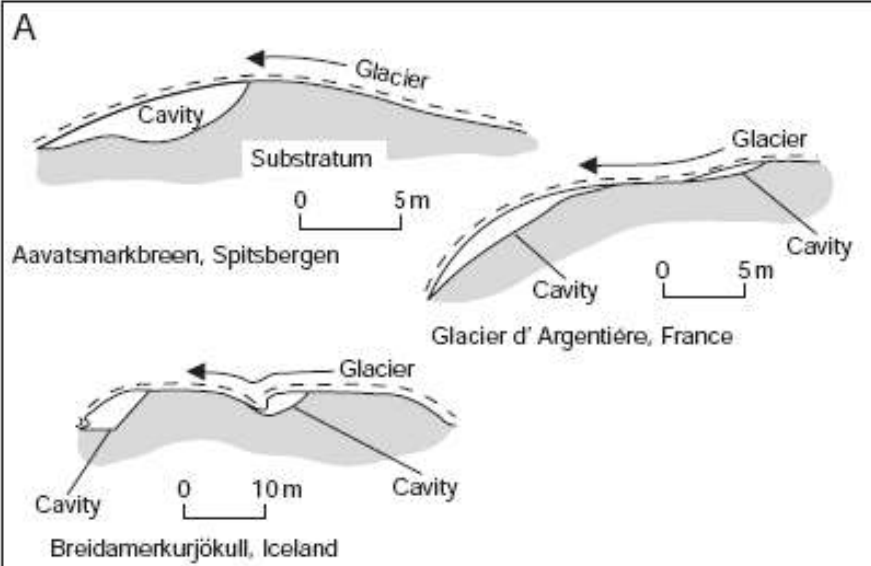


B: Particle lodgement on a soft substratum



C: Lodgement of debris-rich ice mass





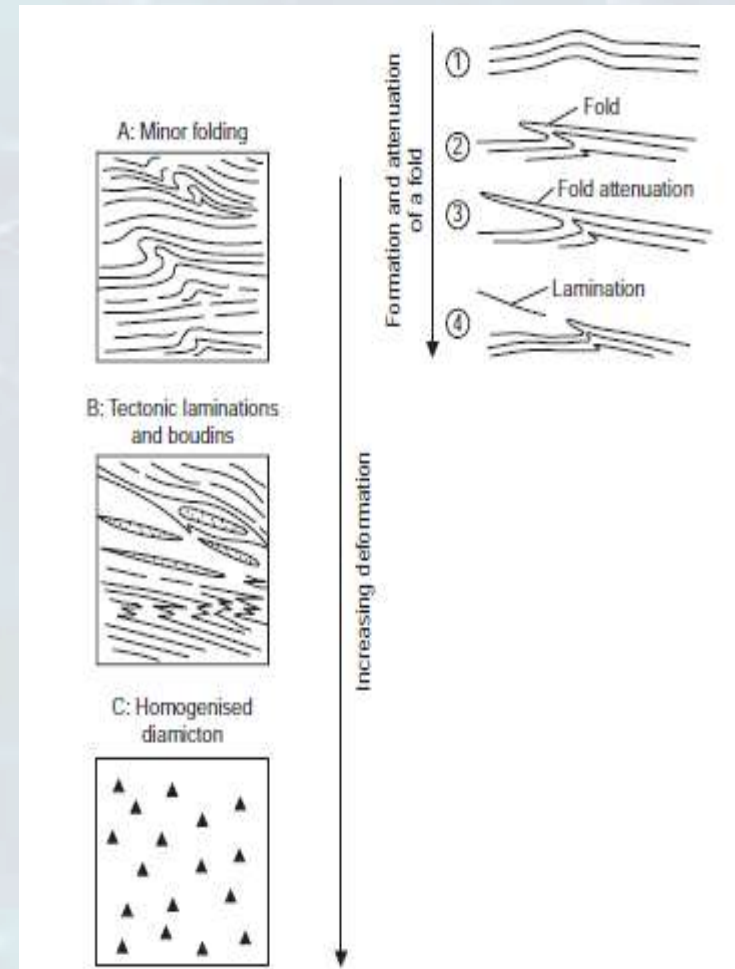
DEFORMACIJA SEDIMENTA

Sedimenti preko katere teče ledenik so lahko dovolj mehki, da se zaradi sile trenja, ki jo izvaja lednik, deformirajo.

Sedimenti so lahko mehki-predglacialni sedimenti, lahko pa so tudi „sinsedimentni“ glacialni sedimenti.

Deformacije zaradi ledenika, ki jih imenujemo **glaciotektonske deformacije** lahko vodijo v nastanek homogeniziranih tilov (iz originalno zelo heterogenega sedimenta)

Ko sila trenja preseže kohezijo materiala se le ta lahko deformira z lomnimi ali duktilnimi deformacijami (kar je običajno odvisno od pritiska vode).



NEPOSREDNI LEDENIŠKI SEDIMENTI

Supraglacialni tili



NEPOSREDNI LEDENIŠKI SEDIMENTI

Topljenje površine ledu lahko „osvobodi“ sediment na površini ledenika in tako tvori supraglacialni till.

Le ta lahko ostaja na površju ali v območju visokega nivoja transporta ali pa pripotuje do dna ledenike in postane subglacialni til.

Drobir na površini najprej poveča hitrost taljenja (je bolj temen od leda), kasneje ko se nakopiči pa izolira ledenik.

Običajno so to z vodo prepojeni tili, ki so kot taki nestabilni in tudi sami tečejo.



Tili in bazalni termalni režim ledenika

Ledeniki z različnim termalnim režimom odlagajo sediment na drugačne načine.

Poznamo tri osnovne termalnih režimov in z njimi povezane različne faciese: **topli ledeniki, hladni ledeniki** in **mešani ledeniki**.

V vsakem izmed teh ledenikov obstajajo drugačna okolja sedimentacije in posledično tudi drugačni faciesi.



Sedimentacija toplih ledenikov

Kjer se topli ledeniki premikajo čez trdno podlago, se bo največ sedimenta transportiralo v bazalnih delih ledenika. Odlaganje in nakopičenje tilov se dogaja preko večine kontakta med ledom in podlago

Faciesi so različni za tiste tile, kjer se drobir odloži neposredno iz ledu od tistih, ki se sedimentirajo v votlinah.

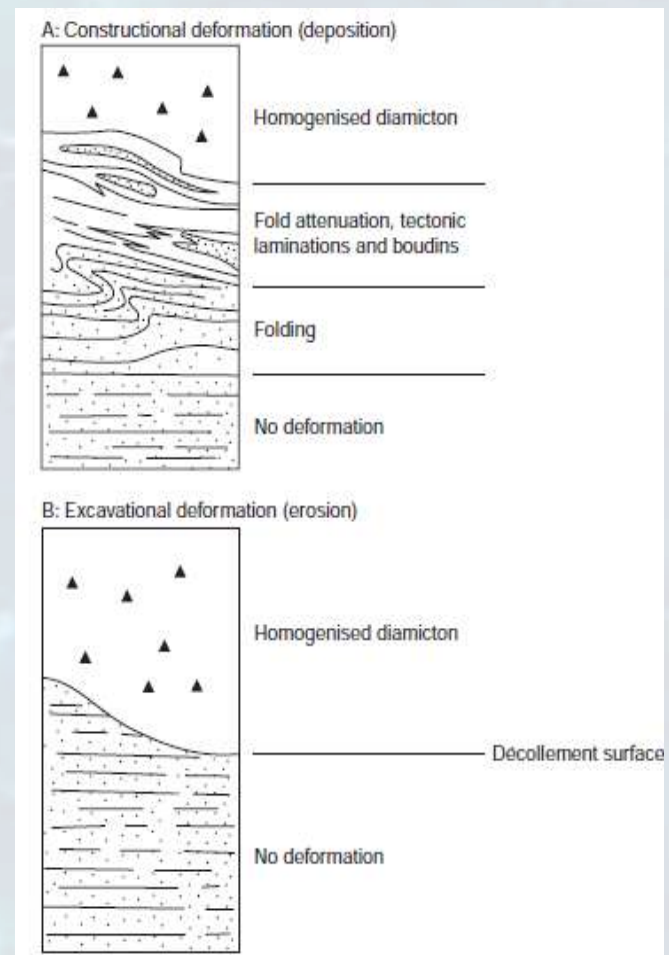
Odlaganje na določenih mestih prekinjajo subglacialne reke, ki predelujejo sediment. Te so običajno le hudourniškega značaja.



V delih kjer se ledenik premika preko mehke in deformabilne podlage, se dogajajo subglacialne deformacije in asimilacija sedimenta v plast, ki se deformira.

Debelina te deformabilne plasti je odvisna od lastnosti sedimenta in količine napetosti zaradi trenja.

Sediment se transportira znotraj te plasti iz ekstenzijskega toka proti kompresijskemu. Pod ekstenzijskim tokom deformacije obsegajo odstranjevanje materiala in so omejene z ostrimi erozijskimi mejami. V kompresijskem toku pa se deformabilna plast debeli zaradi pritoka materiala iz vrhnih delov ledenika.



Code	Facies	Description
Dmm	Matrix supported, massive	Structureless mix of mud, sand and pebbles
Dmm(r)	Dmm with evidence of re sedimentation	Initially appears structureless but careful cleaning reveals subtle textural variability and fine structure (e.g., stringers of silt or clay with small flow noses). Stratification less than 10% of the unit thickness
Dmm(c)	Dmm with evidence of current reworking	Initially appears structureless but careful cleaning reveals subtle textural variability and fine structure produced by water flow (e.g., isolated ripples). Stratification less than 10% of the unit thickness
Dmm(s)	Matrix-supported, massive, sheared	Initially appears structureless but careful cleaning reveals shear planes, foliation and orientated clasts. Brecciated clasts may be present
Dms	Matrix supported, stratified diamict	Obvious textural differentiation or structure within the diamict. Stratification more than 10% of the unit
Dms(r)	Dms with evidence of re sedimentation	Flow noses frequently present; diamict may contain rafts of deformed silt/clay laminae and abundant silt/clay stringers. May show slight grading. Often contain high clast contents, which often form clusters. Clast fabric random or parallel to bedding. Erosion along the base of the unit may be present
Dms(c)	Dms with evidence of current reworking	Diamict often coarse, due to removal of fines. May be interbedded with sand, silt and gravel beds showing evidence of flowing water (e.g., ripples and cross-bedding). Abundant stringers within the diamict. Units may have channelled base
Dmg	Matrix-supported, graded	Diamict exhibits variable vertical grading in either matrix or clast content
Dmg(r)	Dmg with evidence of re sedimentation	Clast imbrication common

Interpretation

Upper till layers may show evidence of weathering and sediment reworking by solifluction.

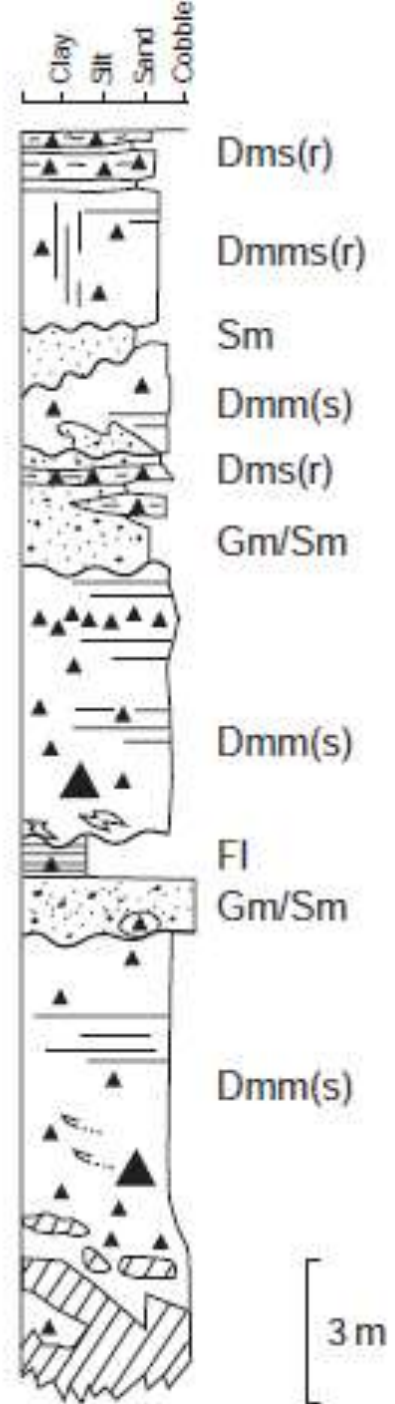
Discontinuous units of glaciofluvial sediment, may contain lenses of till deposited by the collapse of channel walls.

Concentrations of boulders / clasts may occur locally forming boulder pavements.

Discontinuous units of glaciofluvial sediment deposited in subglacial channels. Upper contact may be eroded by overriding ice.

Shear laminations caused by the shearing out of soft clasts. Brecciated clasts may also be present. Foliations and shear planes occur throughout.

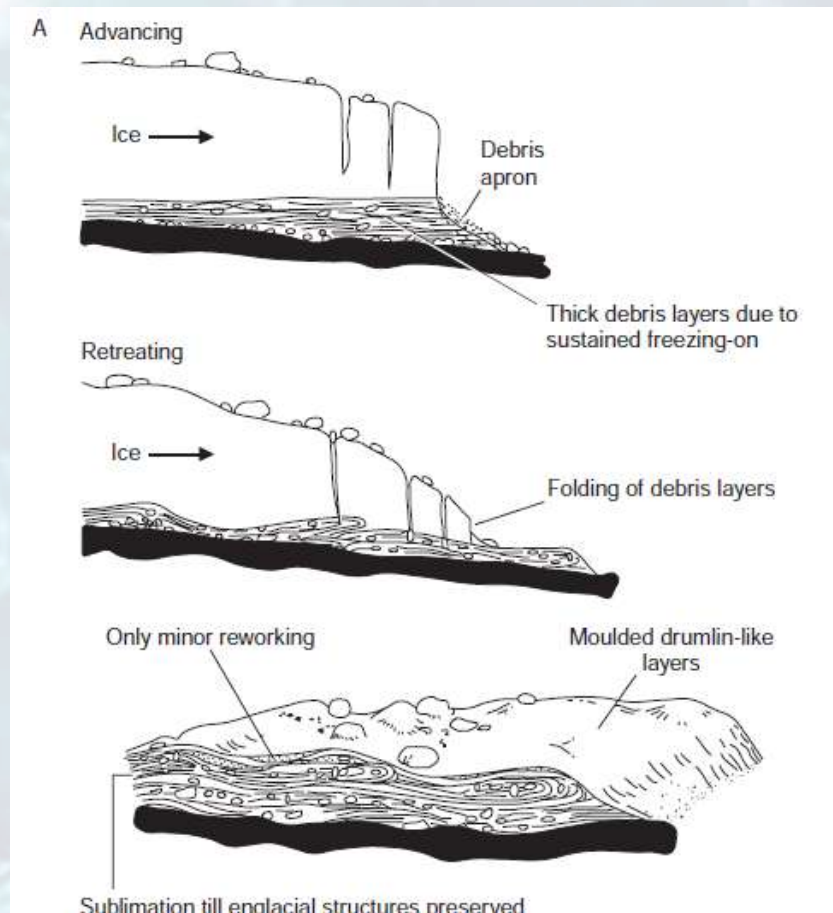
Deformation of the rockhead. Inclusion of blocks and rafts of bedrock. Injection of till into bedrock joints.



Sedimentacija hladnih ledenikov

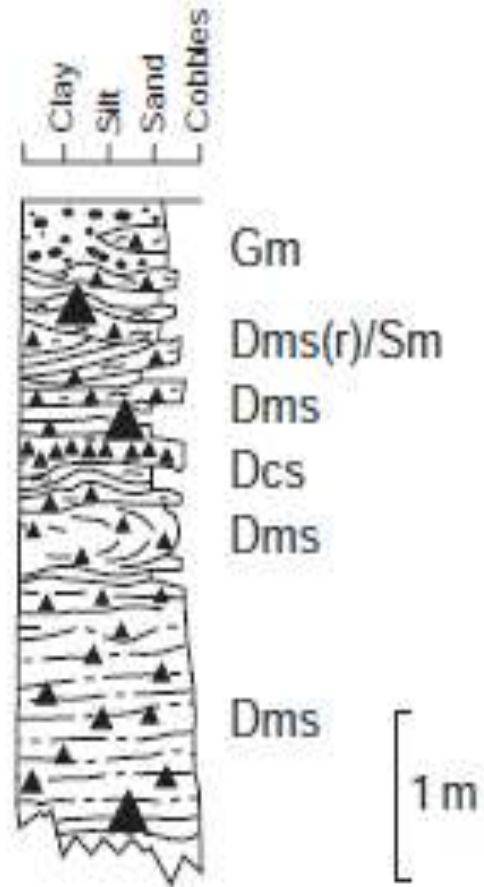
Hladni ledeniki običajno nimajo dobro definirane plasti tla na bazi, ker niso erozijski. Bazalni drobir lahko dobimo na dva načina: če ledenik povozi svoj lasten material iz jezika ledenika, ali pa ga dobimo iz bolj toplih predelov ledenika. Drobir je zmrznjen v plasteh in močno zguban.

Tokom umikanja ledenika razpade zmrznjen till in englacialni drobir se spusti do baze ledenika. Led v porah se bo stopil (ali sublimiral) in nastal bo til, ki bo še imel nekaj podedovanih struktur.



B

Interpretation
May contain some evidence of till flow, sliding/slumping or free fall. Occasional signs of sediment reworking by meltwater.
Fold structures may be picked out by the stratified till. Clast orientation reflects structure.
Stratified till, may be picked out by alternating patterns of clast size or density.

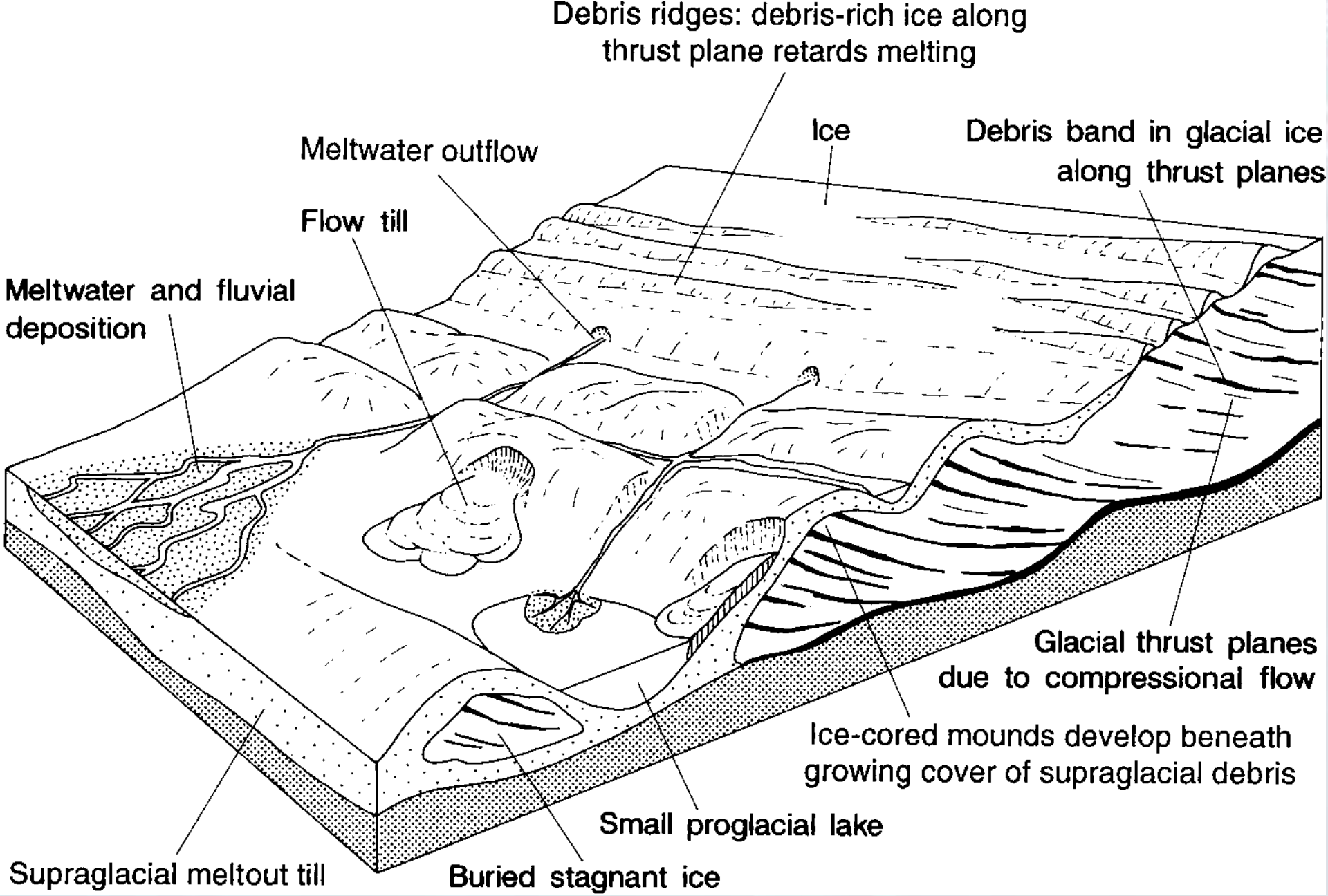


Ledeniki mešanega tipa

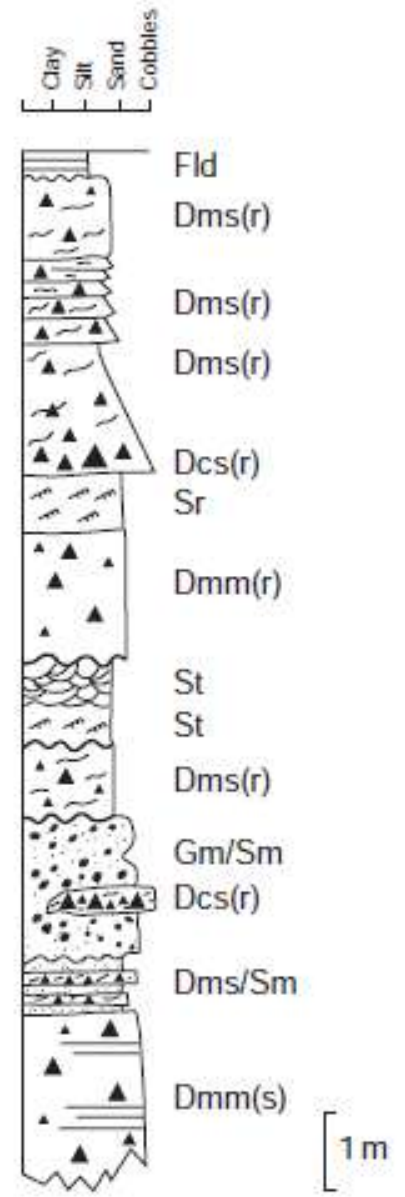
Veliko ledenikov pa vsebuje debelo bazalno plast drobirja in tudi englacialne cone z veliko drobirja. Nastaneta zaradi večkratnega zmrzovanja in primrzovanja ledenice, ki se izteka iz toplih delov ledenika v hladne dele, prav tako veliko materiala znotraj ledenika dobimo zaradi narivanja na mejah hladno toplo.

Za ta okolja so značilni zelo heterogeni tili (saj jih imamo na površini, v notranjosti in na bazi ledenika) v povezavi s fluvialnimi strukturami.

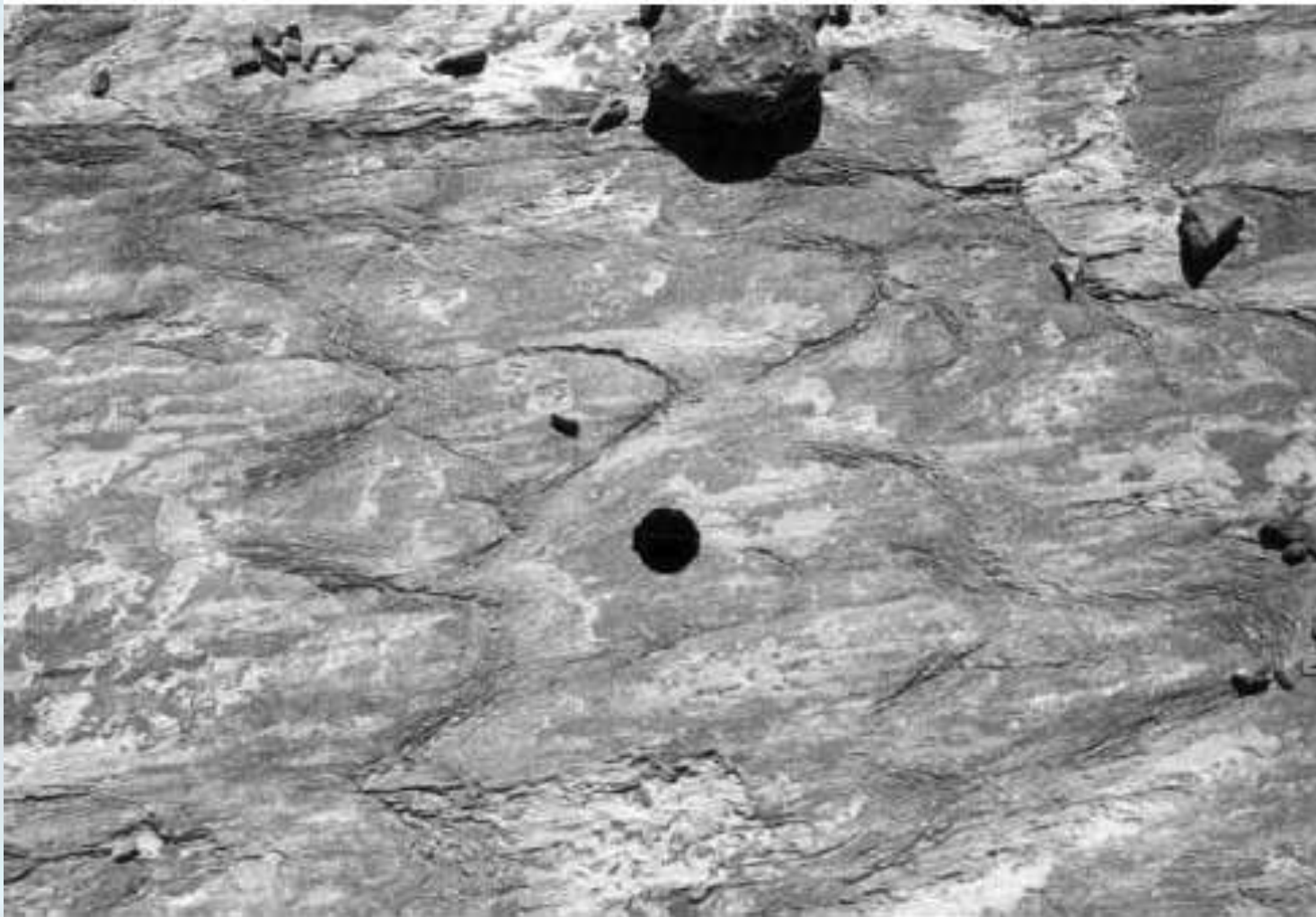




Interpretation
Glaciofluvial outwash.
Flow till units.
Interbedded outwash (glaciofluvial sands) may show fining upward sequences associated with filling and abandonment of meltwater channels.
Flow tills. Erosional base to unit often with a concentration of clasts. Individual flow unit 'packages' maybe identified.
Glaciofluvial outwash.
Flow tills.
Contorted and partially reworked lenses of flow till in glaciofluvial sediments.
Crudely stratified meltout till, may show evidence of subglacial flow.
Lodgement till.



Fluvialna sedimentacija ledenika



Fluvialna sedimentacija

Ledenica transportira in odnaša sediment ter ga odlaga na, v, pred ali stran od ledenika

Sedimentacija na ali znotraj ledenika se zgodi v površinskih kanalih in tunelih (čeprav so le ti lepo zglajeni) predvsem zaradi razlik v pretoku in spremembi gradienta.

Sila trenja je seveda večja v kanalih, ki so na kontaktu z matično podlago.

Taki sedimenti so ponavadi dobro stratificirani peski in prodi, ki kažejo navkrižne laminacije, dune in gradacijo.

Ledenica pa lahko povzroča tudi precipitacijo raztopljenih snovi v votlinah,



Fluvialna sedimentacija

Procesi fluvialne sedimentacije izven neposrednih mej ledenika pa so bolj poznani, saj je sedimentacija čisto običajno fluvialna. Razlike pa kljub vsemu obstajajo:

Ker je voda zelo hladna, je tudi bolj viskozna. To pomeni, da lahko transportira večje količine sedimenta. Pretoki so izrazito sezonski in se lahko razlikujejo tudi za dva razreda magnitude. (recimo količina sedimenta, ki se odloži v petih minutah v juniju, je enaka celomesečni sedimentaciji v januarju).

Sediment se transportira kot talni sediment in v suspenziji.

Suspenzija: v zimskih mesecih le nekaj miligramov sedimenta na liter vode, v poletnih pa kar nekaj gramov na liter. Količina suspenidranega sedimenta doseže vrh zgodaj poletje, ko se ledenik "sčisti)

Talni transport: se ga meri zelo težko in ocene so da količina talnega sedimenta varira od 10 do 60% glede na tisto v suspenziji.



Fluvialna sedimentacija

Fluvialna sedimentacija poteka v treh različnih območjih:

Proksimalno območje: izredno velika količina sedimenta, ki se giba ne samo fluvialno pač pa tudi z različnimi gravitacijskimi tokovi. Razvijajo se masivne teksture. Pogosto se sedimentacija zgodi preko ledu, ki se kasneje stopi in povzroči sesedanje sedimenta.



Fluvialna sedimentacija

Medialno (srednje) območje: stran od ledenika, se običajno razvije prepletajoč rečni sistem.



Fluvialna sedimentacija

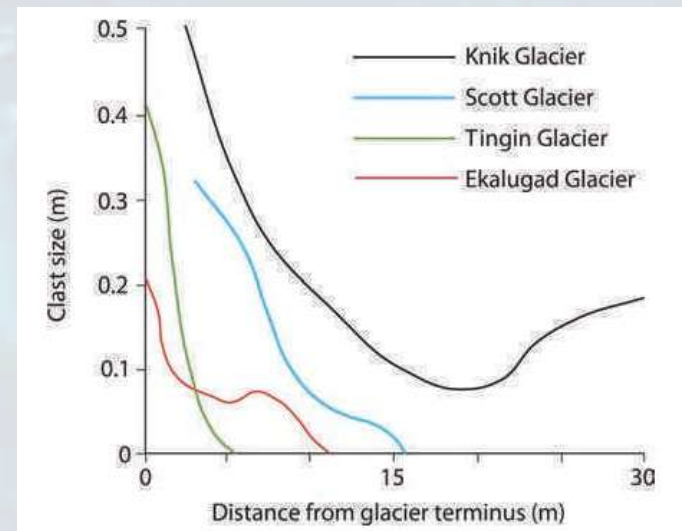
Medialno območje:

v prepletajočem rečnem sistemu nastajajo nekaj m do nekaj 100m veliki kanali in sipine. Prepletajoč sistem se razvije zaradi velike količin sedimenta, velikih naklonov in velikega pretoka

Velikost zrn hitro pada stran od lednika.

Distalno območje: tu se skokovito poveča količina drobnega materiala.

Običajno odtok poteka v enem samem kanalu, čeprav se ob vijih nivojih pretokov lahko spet pojavijo prepletajoči sistemi.



Kopenske sedimentne ledeniške oblike

Ledeniki s svojo sedimentacijo na kopnem pustijo za sabo značilne oblike. Le te nastajajo neposredno s sedimentacijo iz ledu ali z ledenico.

Običajno jih ločimo na tiste, ki se odlagajo v robnih delih ledenika ter tiste, ki se odložijo pod ledenikom (subglacialno).

Robne sedimentacijske oblike omogočajo rekonstrukcije ledeniškega napredovanja in nazadovanja, medtem ko oblike vezane na okolja pod ledenikom povejo nekaj o termalnih režimih ledenika in paleohidrologiji le tega.

	Ice-marginal	Subglacial
Glacial	Glaciotectonic moraines Dump moraines Ablation moraines	Flutes Megaflutes Drumlins Rogen/ribbed moraine Megascale glacial lineations Geometrical ridge networks (crevasse-squeeze ridges)
Glaciofluvial	Outwash fans Outwash plains Kame terraces Kames Kame and kettle topography	Eskers Braided eskers

Kopenske sedimentne ledeniške oblike

Obstajajo štiri glavne skupine ledeniške pokrajine:

- Robne morene, ki nastajajo z ledeniškim ledom
- Subglacialne pokrajine, ki nastajajo z ledom ali ledenico pod ledenikom
- Robne pokrajine, ki nastajajo s glaciofluvialnimi procesi
- Subglacialne pokrajine, ki nastajajo z glaciofluvialnimi procesi.



Robne morene (ice marginal morrains)

Geomorfološke oblike znane pod imenom morene, se tvorijo na robovih ledenika in so neposredno odvisne od delovanja le tega.

Nastajajo s štirimi procesi, ki pa se med seboj ne izključujejo

- ▶ Glaciotektonika
- ▶ Odlaganje drobirja s padanjem kamenja in drobirskimi tokovi
- ▶ Taljenje površine ledenika in odlaganje
- ▶ Subglacialni transport

V literaturi obstaja veliko klasifikacij moren: od popolnoma negenetskih: (kot so recimo lateralne, terminalne morene ipd..) do genetskih: narivne morene, ablacijske ipd..

Poenostavljeno razdelimo morene v tri skupine

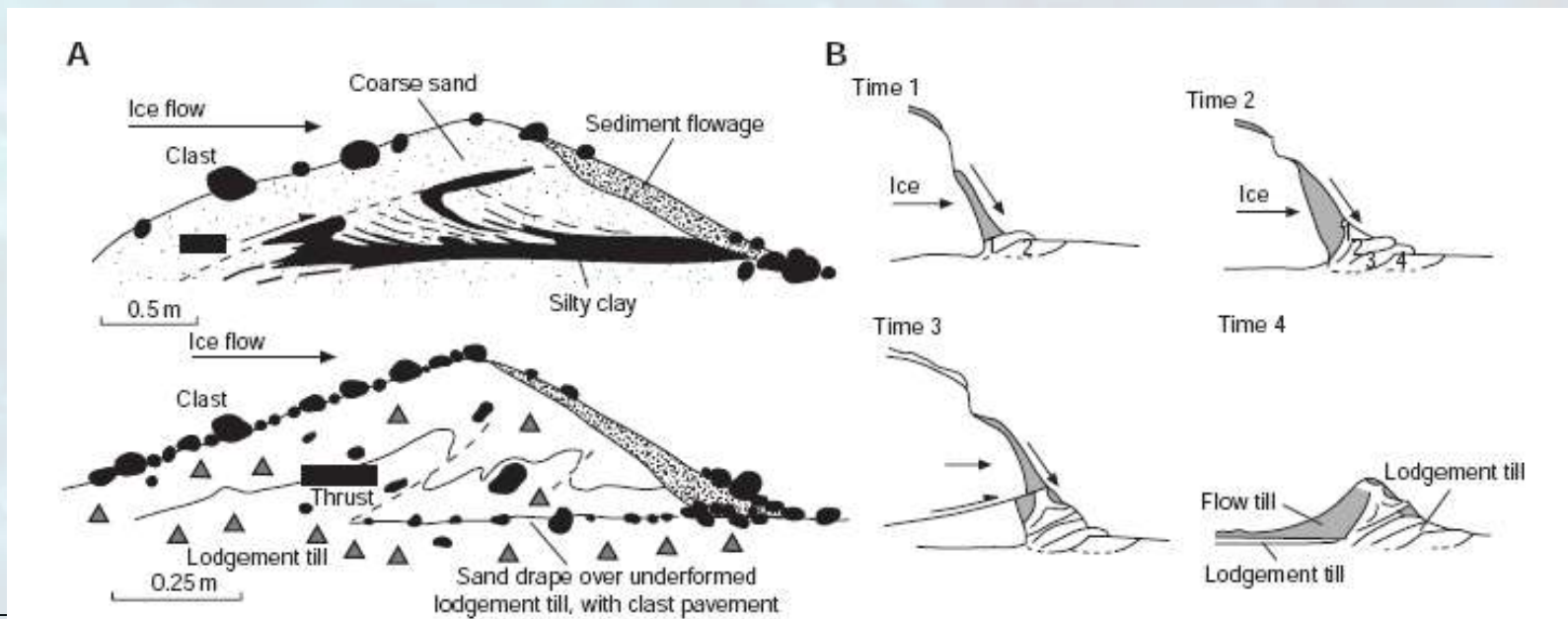
glaciotektonske, odložene (dump) morene in ablacijske morene.



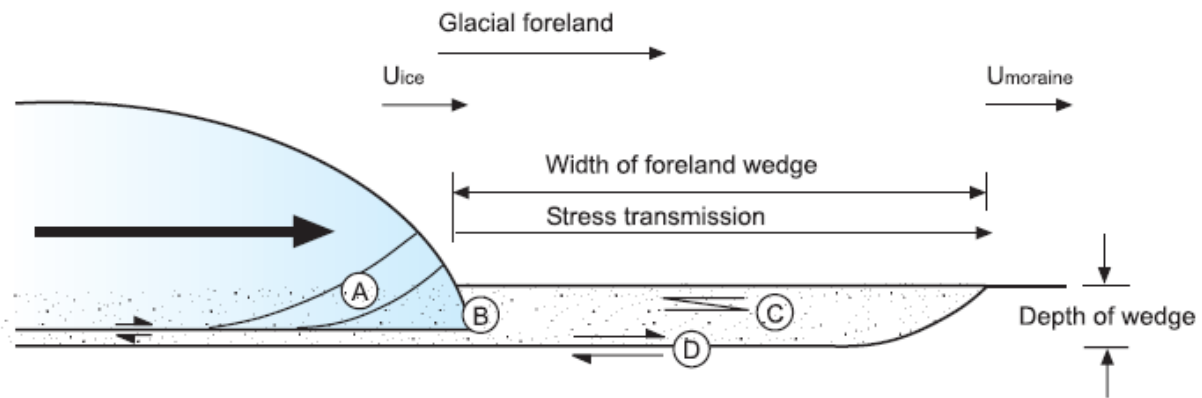
GLACIOTEKTONSKE MORENE

Nastajajo kot produkt narivanja-porivanja ledu, sedimenta in matične podlage s katerim nastanejo grebeni pred ali pod ledom. So lahko prečne ali pravokotne na smer toka ledu.

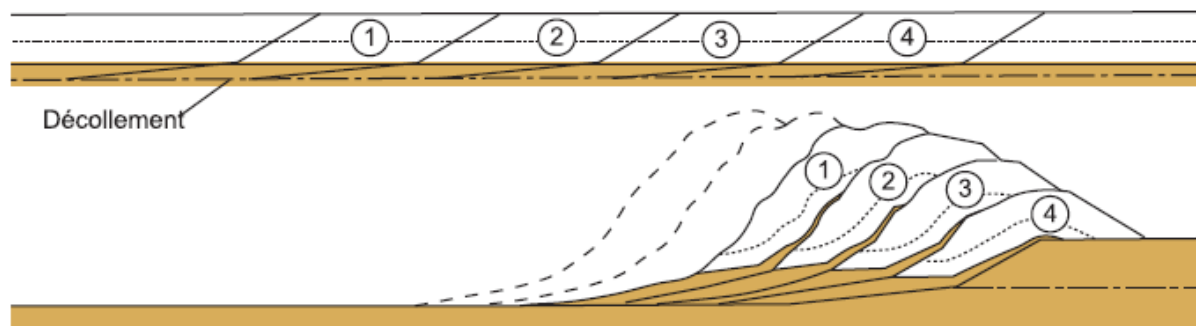
Poznamo enostavne in velike le do nekaj m ter do tistih, ki se raztezajo nekaj km v proglacialno pokrajino. Med tema dvema skrajnostima obstaja morfološki kontinuum od majhnih diskretnih morenic, ki nastajajo s sezonskimi delovanjem lednika do tistih večjih kompozitnih, ki nastajajo z večjimi tokovi ledenika.



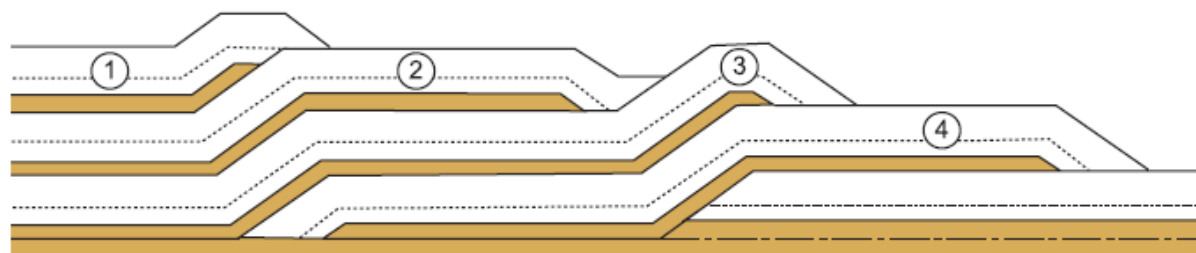


A

- (A) Deformability of the ice margin
- (B) Nature and efficiency of the ice-sediment coupling
- (C) Strength and deformability of the foreland wedge
- (D) Frictional characteristics of the décollement surface

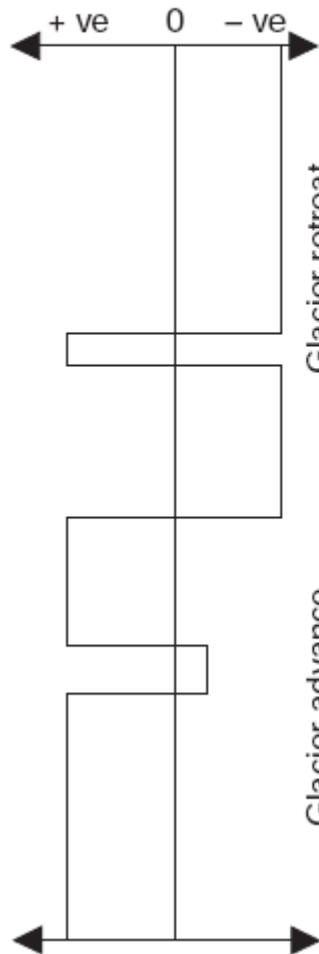
B

Push moraine: imbricate thrust slabs

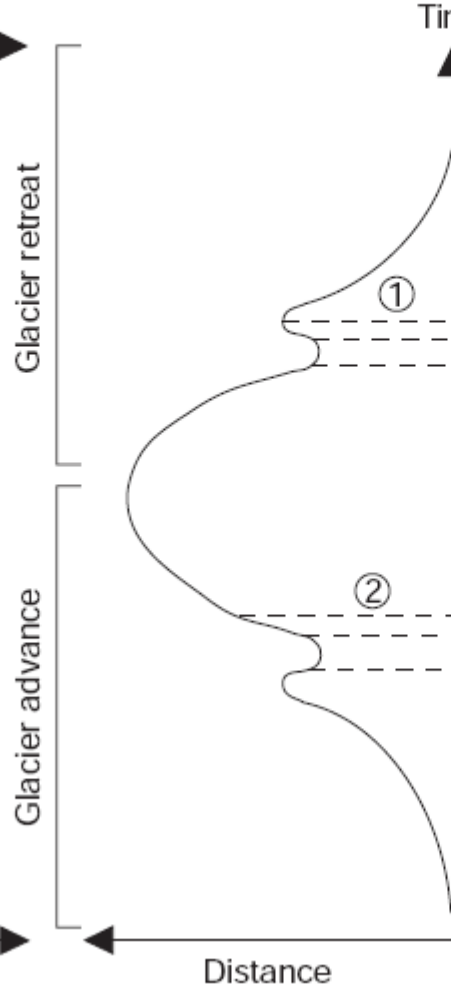


Push moraine: sub-horizontal nappes

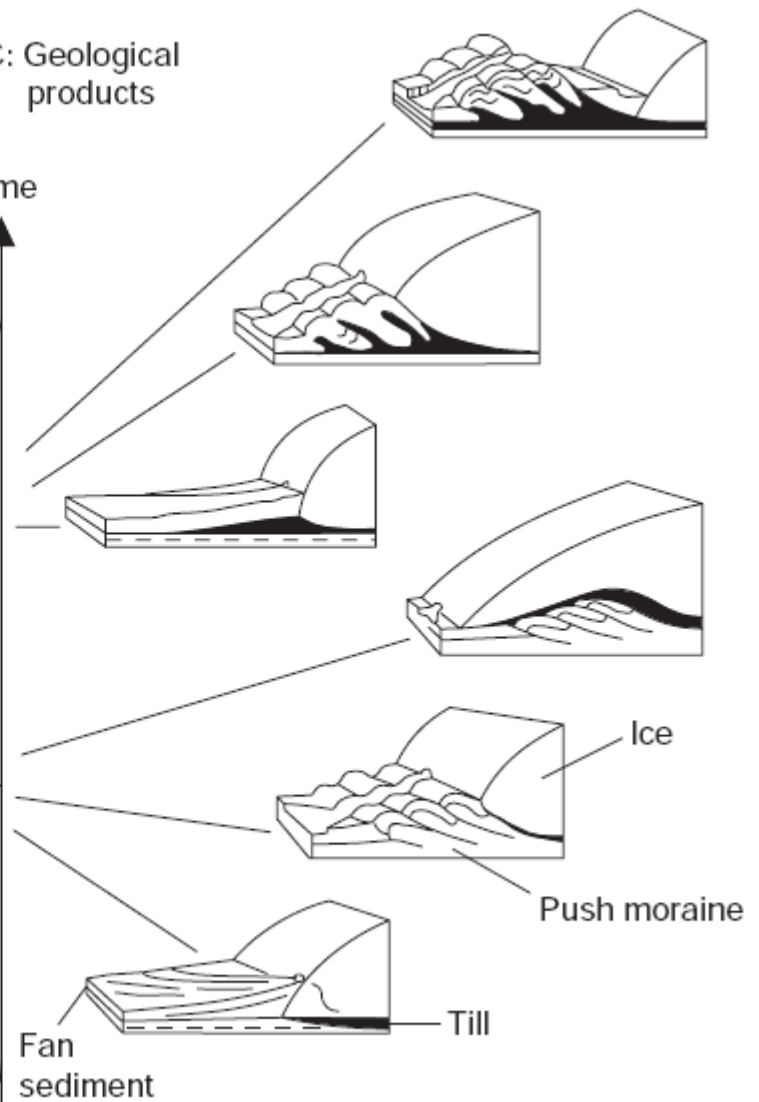
A: Mass balance changes



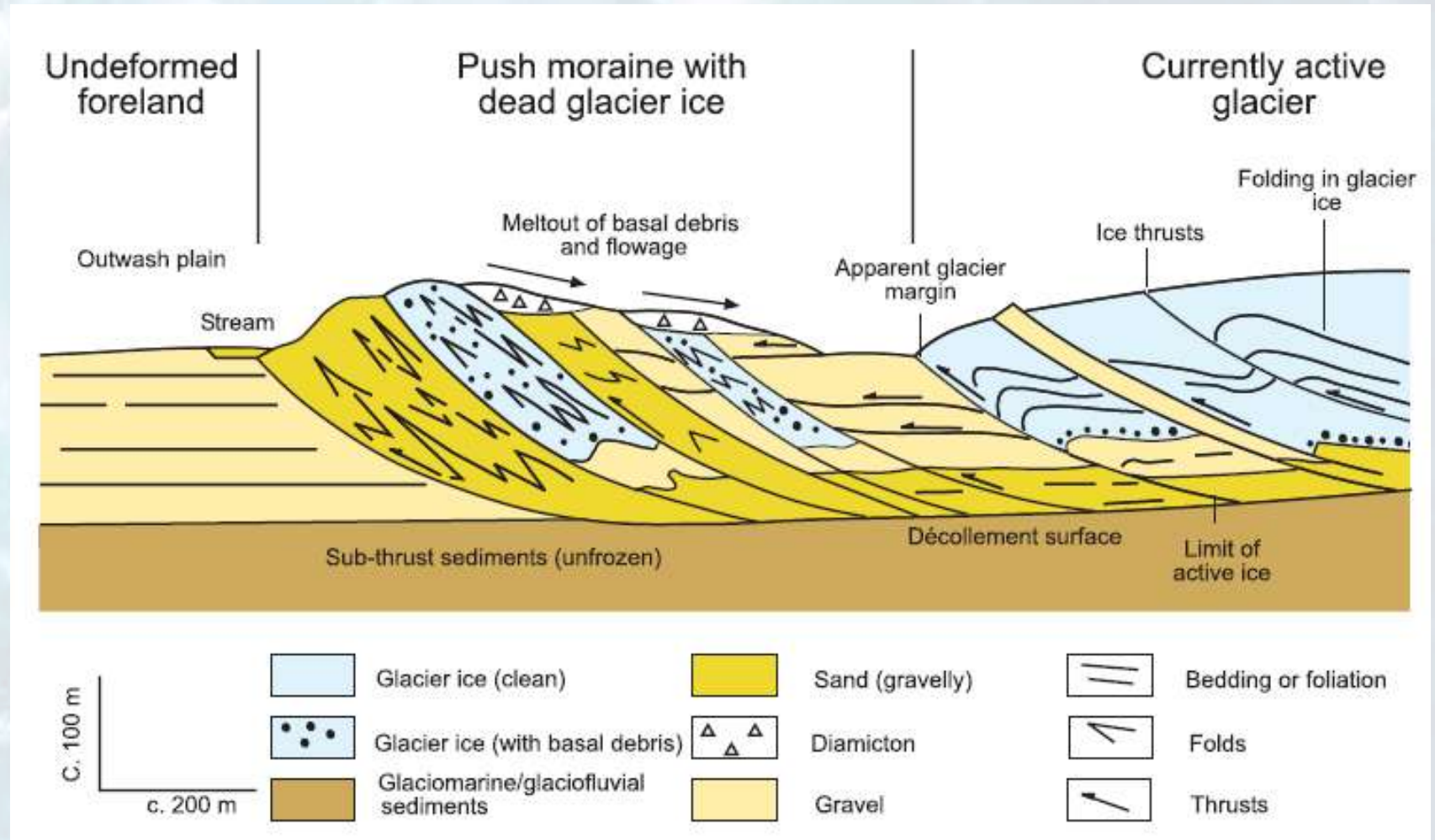
B: Glacier fluctuation



C: Geological products



GLACIOTEKTONSKE MORENE



ODLOŽENE (DUMP) MORENE

Odložene morene nastajajo tam, kjer se drobir transportira proti robovom ledenika in tam odloži ter tvori grebene. Za to potrebujemo stacionaren rob ledenika. Velikost morene je odvisna od hitrosti ledenika (večja kot je hitrost, več drobirja bo prišlo do roba), količine drobirja v ledu (več kot ga je, večja je morena) ter hitrosti umika ledeniškega roba (če se ledenik hitro umakne, bo drobir odložen na večji površini, če pa je dalj časa pri miru, pa bodo nastale morene).

Pomembno je tudi, da je rob ledu strm in se drobir iz njega lahko odstranja.

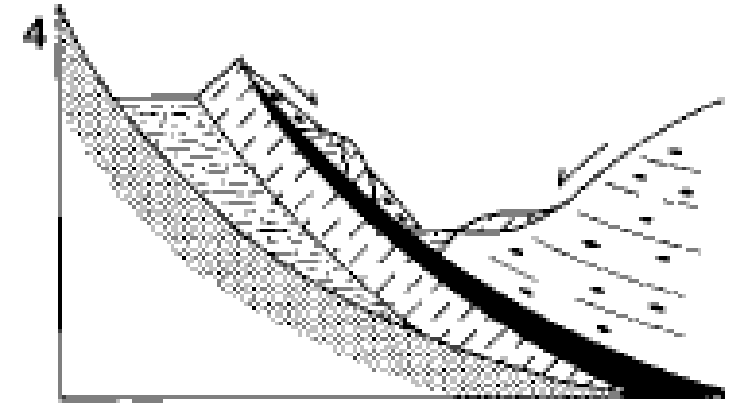
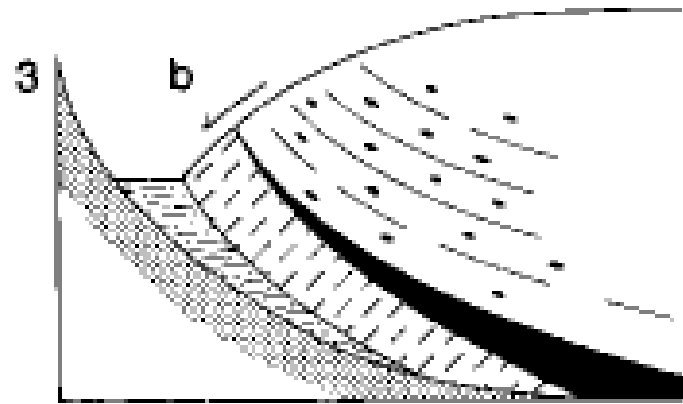
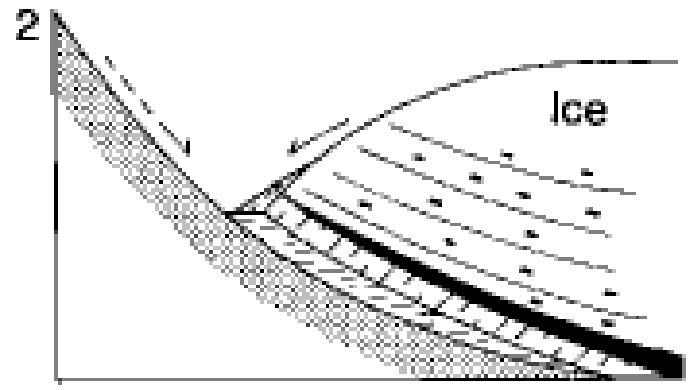
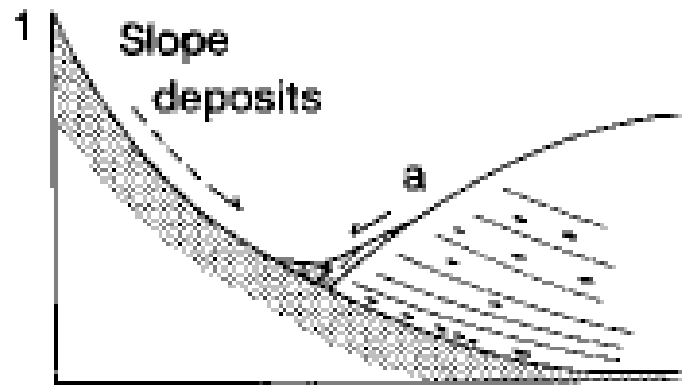
Ti pogoji so pogosto izpolnjeni na straneh lednika in nastajajo lateralne morene



ODLOŽENE (DUMP) MORENE



A Formation of a conventional lateral moraine





ABLACIJSKE MORENE

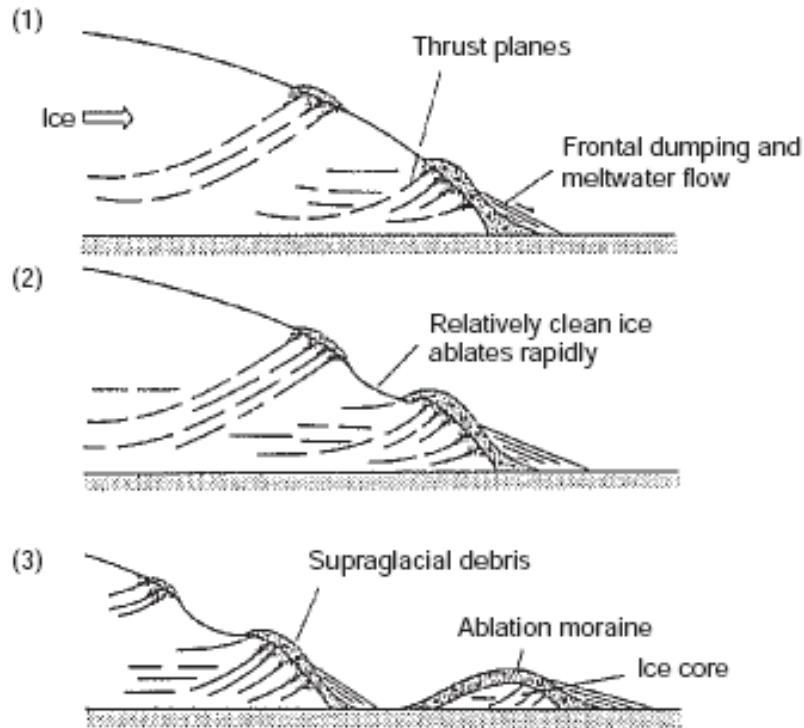
Drobir na površini ledenika se lahko koncentrira v robnih delih le tega. Ta proces lahko nastane s premikanjem drobirja, ki je na površini ledenika, ali pa s transportom materiala iz spodnjih delov ledenika na njegovo površje (narivanja ali toka ledu navzgor)

Material na površini ledenika najprej pospeši taljenje (ker je temnejši od ledu), ko pa se odebeli pa led izolira.

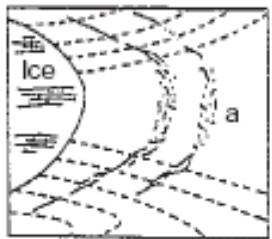
Če je drobirja dovolj veliko, se lahko rob lednika izolira od preostalega ledenika in nastanejo ablacijske morene.



A Formation of a single ablation moraine

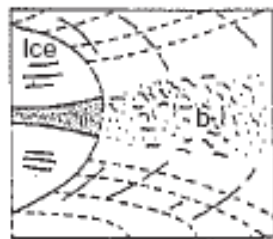


C (1) Pulsed supply of supraglacial debris



a Ablation moraine

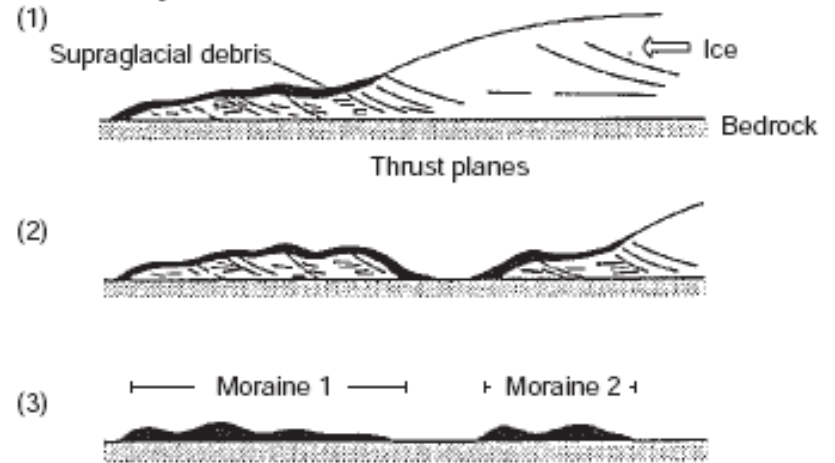
(2) Continuous supply of thick supraglacial debris



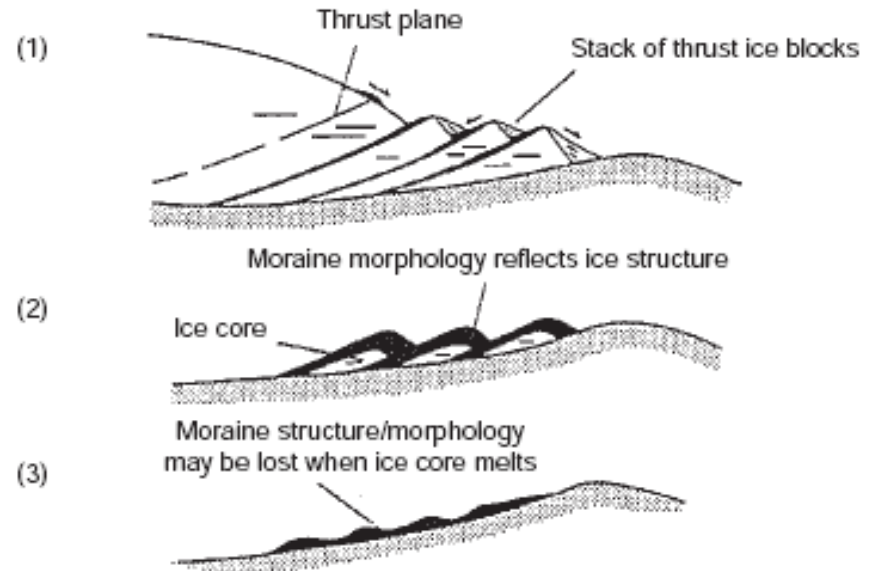
b Continuous sheet of hummocky moraine

- Hummocks
- Moraines
- Contours

B Formation of a broad ablation moraine composed of hummocky moraine



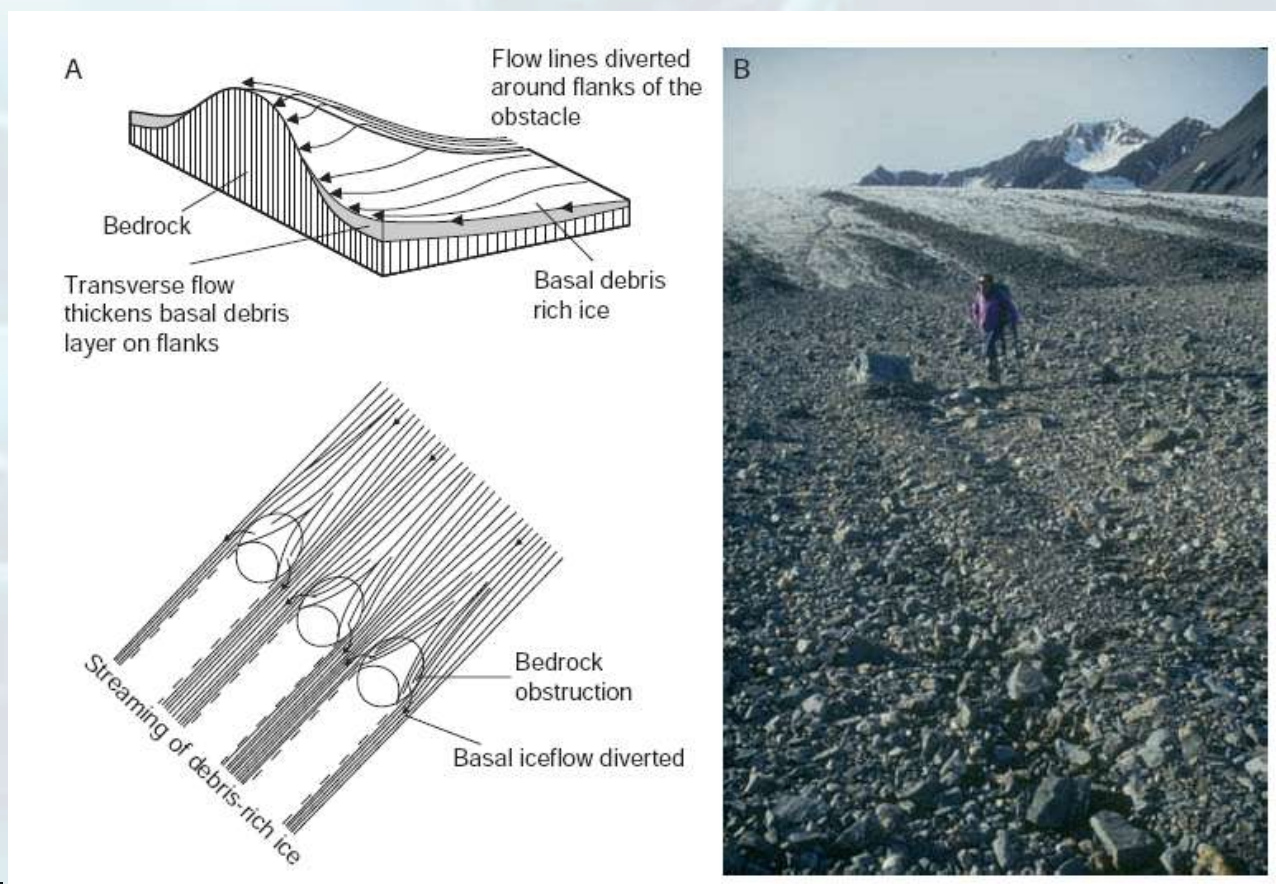
D Formation of an ablation moraine by thrusting





Subglacialne morfološke oblike

Grebeni (flutes): so nizki (do 3m) ozki (do 3m) enakomerno oddaljeni do 100m dolgi grebeni, ki jih sestavlja ledeniški material.



Subglacialne morfološke oblike

DRUMLINI





Subglacialne morfološke oblike

DRUMLINI

- ▶ So ovalni in elipsasti zglajeni hribčki, ki jih sestavlja glacialen sediment. So med 5 in 50m visoki ter dolgi do 3km.
- ▶ Sestavljajo jih odloženi tili, matična kamnina, deformirani tili s peski in prodi.
- ▶ Pogosto se pojavljajo skupaj v drumlinskih poljih in nastajajo ob majhnih napredovanjih ledenika.
- ▶ Njihov nastanek še ni povsem pojasnjen in obstaja več hipotez; lahko predstavljajo kontinuum 'crag and tail' oblik, lahko nastajajo zaradi heterogenosti sedimentov in s tem povezane erozije in odlaganja..ipd..



Subglacialne morfološke oblike

REBRASTE (ROGENOVE) MORENE

- ▶ So zelo pestro oblikovane, ponavadi pa gre za grebene, ki so orientirani prečno na tok ledu in sestavljene iz ledeniškega materiala

