

Geološke raziskave soške doline med Bovcem in Kobaridom

Dušan Kuščer

Inštitut za geologijo, Ljubljana, Aškerčeva 20

Karel Grad, Anton Nosan in Bojan Ogorelec

Geološki zavod, Ljubljana, Parmova 33

Članek podaja važnejše rezultate geoloških raziskav za projektirano HE Trnovo na Soči. Območje sestoji v glavnem iz zgornjetriadnega apnenca in dolomita. Ponekod leži na triadnih plasteh jurski apnenec, ki mu sledi na jugu najprej zgornjekredni apneni fliš, nato pa laporasti peščeni fliš. Na severu imamo namesto apnenega fliša rdeči laporasti apnenec, na katerem leži tudi tu povečini laporasti fliš.

Kvartarni dolinski zasip je debel do 320 m. Njegov spodnji del sestoji iz prepustnega proda, srednji iz neprepustnega jezerskega melja in gline, zgornji pa iz prepustnega holocenskega proda in grušča. Številne meritve gladine podtalnice in prepustnosti v vrtnah ter ocena izgub vode iz akumulacijskega bazena skozi zakraseli apnenec proti spodnjemu prepustnemu delu kvartarnega zasipa so pokazale, da je hidravlična prevodnost sistemov apnenec-prod približno obratno sorazmerna s širino kraških kanalov.

Uvod

Geološke raziskave za energetske izrabo zgornje Soče ob velikem kolenu med Bovcem in Kobaridom so se pričele že pred drugo svetovno vojno. Prvo pregrado so projektirali pri Kršovcu ob vstopu Soče v bovški kotel. Dovodni rov naj bi potekal skozi greben Polovnika do strojnice pri Trnovem. Leta 1951 je raziskave nadaljeval Geološki zavod Ljubljana s površinskim geološkim rekonosciranjem soške doline od izvira do Mosta na Soči, nato pa leta 1953 z vrtanjem med Bovcem in Srpenico. Za energetske izrabo zgornje Soče je bil najzanimivejši projekt HE Trnovo z veliko akumulacijo pod Bovcem. Po projektu naj bi zgradili 80 m visoko pregrado okrog 1 km nad velikim kolenom Soče pri Žagi. Aluvialno dno soške doline se nad Žago močno razširi in bi se za pregrado zbralo 330 milijonov m³ vode. Vtok v dovodni rov je bil projektiran okrog 1 km nad pregrado, dovodni rov bi prečkal greben Polovnika in potekal po geološko kompliciranem ozemlju do strojnice pri Trnovem ali pri Kobaridu.

Projekt je bil zaradi varstva narave v zgornjem Posočju opuščen. Rezultati raziskav pa so geološko zanimivi, zato jih je vredno objaviti. Dopolnili smo jih z dodatnimi raziskavami, ki jih je omogočil Sklad Borisa Kidriča, za kar se mu

na tem mestu najlepše zahvaljujemo. Prav tako se zahvaljujemo Soškim elektrarnam, ki so prispevale za tisk geološke karte.

Projekt HE Trnovo na Soči je izdelal po naročilu Elektrogospodarske skupnosti Slovenije Elektroprojekt Ljubljana. Zastopnik Elektrogospodarske skupnosti ing. Rado Boltežar in glavni projektant ing. Savo Janežič sta se od začetka zavedala, da bodo geološke razmere močno vplivale na projekt. Sodelovala sta pri programiranju geoloških raziskav in spremljala njihovo izvedbo. Za uspešno sodelovanje se jima najlepše zahvaljujemo.

Poleg avtorjev so pri geoloških raziskavah sodelovali še M. Breznik, S. Buser, J. Drnovšek, L. Žlebnik in J. Ivanković.

Za to publikacijo sta stratigrafijo in tektoniko predkvartarne podlage obdelala K. Grad in B. Ogorelec. Zadnji je podrobneje sedimentološko raziskal zgornjekredne plasti. Kvartar in hidrogeologijo sta obdelala D. Kuščer in T. Nosan, izgube vode iz akumulacijskega bazena je ocenil D. Kuščer.

Osnovne geološke raziskave zgornjega Posočja

Porečje Soče sta geološko opisala med prvimi F. Hauer (1857, 1868) in D. Stur (1858). Med najpomembnejša moremo šteti raziskovanja F. Kossmata (1908—1920) in A. Winklerja (1920, 1923, 1926, 1931).

Nadalje omenjamo italijansko geološko karto Tolmin (R. Fabiani, 1937) v merilu 1 : 100 000, ki ima novejšje podatke posebno v razčlenitvi jure in krede.

R. Selli (1953) je opisal mezozojske fosile iz zgornjega Posočja zunaj kartiranega območja. Določil je več novih vrst zgornjetriadnih, liasnih in zgornjejurskih makrofosilov. Leta 1963 je R. Selli obravnaval zahodne Julijske Alpe in Karnijske Alpe. Podal je tudi pregledno tektonsko sliko soške doline med Bovcem in Kobaridom.

B. Ogorelec (1970) je sedimentološko raziskoval zgornjekredne sedimente zgornjega Posočja.

Kvartarno geologijo soške doline sta podrobneje obravnavala A. Winkler (1926, 1931) in S. Ilešič (1951).

M. Cousin (1970) je raziskoval na mejnem območju med Jugoslavijo in Italijo. Ozemlje med Tržaškim zalivom in Julijskimi Alpami je razdelil na več con.

A. Šercelj (1970) je določil starost interstadialne ali interglacialne jezerske krede zahodno od Bovca, ki jo je našel J. Kunaver. Po analizi ^{14}C je les v njej starejši od 51 000 let.

Geološke raziskave za projekt HE Trnovo

Z raziskovalnim vrtanjem v prvi fazi v letih 1953 do 1957 so bili zbrani osnovni geološki podatki v profilih Srpenica, Boka in Suhi potok. Vrtine pri Srpenici in v profilih Boka in Suhi potok so pokazale, da je kvartarni zasip tega dela doline zelo debel (okrog 300 m). Razmere so za gradnjo v profilu Srpenice zaradi velike množine prepustnih peščenih sedimentov manj ugodne kot v ostalih dveh profilih, kjer je debelina vododržnih jezerskih sedimentov večja.

Topografsko je ugodnejši profil tik pod izlivom Boke, kjer visoka terasa na desnem bregu spodnjega toka Boke močno zoži profil soške doline (profil Boka), vendar je ta geološko neugoden. Plast vododržne jezerske krede tu ni sklenjena, ampak jo na desni strani doline nadomeščata prepusten pesek in prod.

V času od 1960 do 1963 je bilo območje podrobnejše geološko kartirano. S. Buser je kartiral območje med Trnovim in Ladro. Kredne sedimente tega območja je mikropaleontološko preiskala L. Šribarjeva. Podrobnejšo geološko karto širšega območja projektirane HE Trnovo v merilu 1:10 000 je izdelal K. Grad, geološko karto akumulacijskega bazena in območja obeh raziskanih pregradnih profilov v merilu 1:5000 pa A. Nosan. Te karte je uporabil K. Grad kot podlago pri izdelavi pregledne geološke karte vsega območja (tab. 1).

V naslednji fazi raziskovalnega vrtanja v letih 1961 do 1963 je bil podrobneje raziskan nekoliko širši profil Suhi potok (sl. 1), kjer je plast vododržnih jezerskih sedimentov sklenjena od levega do desnega boka doline. Obenem smo raziskali območje med obema profiloma, da bi ugotovili obseg vododržne površinske obloge, ki bi jo bilo treba zgraditi na desni strani v primeru, da bi gradili pregrado v profilu Boka.

V zadnji fazi raziskav v letih 1963 do 1965 sta bila z rovoma v profilu Suhi potok raziskana še skalnata boka tik nad projektirano zaježitvijo v dolžini 180 m na desnem in 250 m na levem boku. V rovih so bili zvrtni piezometri, ki so kazali gladino podtalnice v apnencu.



Sl. 1. Bovški kotel. Z belo črto je nakazan profil »Suhi potok«

Fig. 1. Bovec Basin. The profile "Suhi Potok" is indicated by the white line

Za vododržnost pregradnega profila in spodnjega dela akumulacijskega bazena je odločilen obseg jezerske krede in način njenega priključka na skalno podlago. Zato je bil kvartarni zasip na območju akumulacijskega bazena raziskan s 7 vrtinami in z geofizikalnimi meritvami na razdalji okrog 3 km od pregrade.

Zaradi velikega ovinka Soče med projektirano pregrado in strojnico pri Kobaridu se dolžina dovodnega rova skrajša, če pomaknemo vtok vstran od pregrade v akumulacijski bazen. Po prvotnem načrtu naj bi bil vtočni objekt na sorazmerno položnem delu vznožja Polovnika okrog 2,3 km od pregrade. Vrtine v letu 1964 so pokazale, da je tu pobočje na debelo pokrito z grobim gruščem in plazinami. V takem materialu ne bi mogli zagotoviti ustrezne stabilnosti terena za tako občutljivo zgradbo kot je vtočni objekt. Zato je bila raziskana še druga lokacija za vtočni objekt okrog 2,8 km od pregrade. Raziskave z rovom in 3 vrtinami v letih 1964 in 1965 so pokazale, da je tu fliš močno tektonsko zdrobljen in zato tudi tu ne bi bilo možno zgraditi vtočnega objekta na dovolj zanesljivem terenu. Končno je bil vtočni objekt pomaknjen bliže k pregradi, kjer se apnenec Polovnika spusti do dna doline.

Mehanske lastnosti fliša so bile raziskane v dveh rovih; v prvem na severni strani Polovnika, kjer je bil predviden vtočni objekt v flišu, v drugem pa med Drežnico in Magozdom, kjer bi moral dovodni rov prečkati fliš na južni strani Polovnika.

Za strojnico in derivacijo je bilo raziskanih več variant. Prvotno so predvidevali kot naslednjo stopnjo pod Bovcem pregrado pri Kobaridu, tako da bi bila strojnica bovške stopnje na levem bregu akumulacijskega bazena Kobarid okrog 1 km vzhodno od Trnovega. Nadaljnje projektiranje je pokazalo, da bi bilo ugodneje izrabit padec Soče od Bovca do Kobarida v eni stopnji. Preiskani sta bili dve varianti za strojnico. Po prvi bi bila strojnica v kaverni v bližini Trnovega z odvodnim rovom do Kobarida. Po rezultatih vrtin in geofizikalnih meritev segajo v najkrajši varianti prepustne kvartarne naplavine pod koto odvodnega rova. Zato pridejo v poštev le daljši odvodni rovi po levi strani Soče. Po drugi varianti bi postavili strojnico v bližini Kobarida pod Ladrski Kuk, bodisi na površju, bodisi v kaverni pod spodnjim delom pobočja.

Za zajetje vode Učje so bile v pregradnem profilu napravljene 3 raziskovalne vrtine. Vodo iz Učje bi speljali po dovodnem rovu v akumulacijski bazen.

Stratigrafija predkvartarne podlage

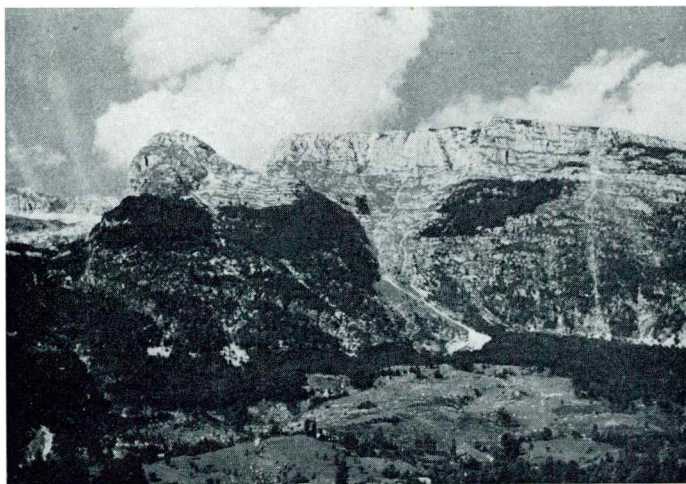
Na kartiranem ozemlju nastopajo zgornjetriadni, jurski in kredni sedimenti. Med temi smo podrobneje raziskali kredne sedimente, predvsem kredni fliš.

Triada

Najstarejši razkriti skladi so zgornjetriadni. Javljajo se sivi debelo skladoviti apnenec, sivi plastoviti in pasoviti dolomit in v manjši meri neplastoviti dolomit. Apnenec ustreza po svojem razvoju dachsteinskemu apnencu Severnih apneniških Alp. Med fosilnimi ostanki so velike školjke *Megalodon* sp. zelo številne na grebenu Polovnika (sl. 2). Na severni in na zahodni strani Polovnika je apnenec drobno coliten. Apnenec prehaja navzdol v pasoviti dolomit, kar je



Sl. 2. Dachsteinski apnenec z megalodontidami, Polovnik.
Fig. 2. Dachstein Limestone with Megalodontidae. Mt. Polovnik



Sl. 3. Nariv dachsteinskega apnenca Rombona na fliš severno
od Bovca

Fig. 3. Dachstein Limestone of Mt. Rombon thrust over
Cretaceous Flysch north of Bovec

vidno predvsem v jedru polovniške antiklinale severno od Srpenice in pri slapu Boka severno od Žage. Po fosilnih ostankih in po primerjavi z drugimi območji sklepamo, da obsega apnenec zgornji del noriške in retsko stopnjo. Po raziskavah K. Grada in L. Šribarjeve (1968) vsebuje ta apnenec v jugovzhodnem delu Julijskih Alp ponekod tudi spodnjeliasne foraminifere vrste *Involutina liassica* (Jones).

Na območju pri Venzoni v zahodnih Julijskih Alpah sta M. Cousin in M. Neumannova (1965) našla isto foraminifero v neritičnem apnencu.

Kanin, Rombon, Svinjak in Polovnik sestojijo iz dachsteinskega apnenca, ki je v višjih delih razkrit na vseh straneh bovškega kotla in pri Kobaridu (sl. 3 in 4). Razen apnenca najdemo na obravnavanem območju plastoviti, skladoviti in delno pasoviti zgornjetriadni dolomit. Fosilnih ostankov sicer nismo našli, toda po položaju in razvoju pripada noriški in delno retski stopnji.

R. Selli (1963) je raziskoval širše območje v Italiji in našel, da se glavni dolomit in dachsteinski apnenec lateralno nadomeščata. Glavni dolomit je razkrit le v jugozahodnem delu naše karte južno od črte Žaga—Srpenica in v manjši meri v jedru polovniške antiklinale ter pri slapu Boka (sl. 5). Proti Kobaridu in Tolminu prevladuje neplastoviti, ponekod kristalasti dolomit.

V okolici Tolmina najdemo plastoviti dolomit in apnenec z rožencem, ki po F. Kossmatu (1920) predstavljata baški facies zgornje triade. S. Buser pa je pri kartiranju območja med Kobaridom in Tolminom za projekt HE Gabrje menil, da sta dolomit in apnenec z vložki roženca spodnjajurske starosti. Na geološki karti smo zato dolomit in apnenec z rožencem v okolici Kobarida uvrstili v spodnjo juro.

Razvoj dachsteinskega apnenca je mogoče nadrobneje opazovati v obeh raziskovalnih rovih v profilu Suhi potok. Že J. Ivanković (1964) je pri kartiranju rogov ločil poleg kompaktnega apnenca še vložke brečastega apnenca in glino. Menil je, da je glina vezana na tektonske cone. Pri ponovnem ogledu rogov smo našli, da je dachsteinski apnenec razvit podobno kot »loferski« facies Severnih apneniških Alp (A. Fischer, 1964), v katerem se ciklično menjavajo trije členi A, B in C. Člen A predstavlja brečo ali konglomerat z rdečim ali zelenim glinastim vezivom. Člen B je iz laminiranega, delno stromatolitnega dolomita (loferita). Člen C je iz kalcilutita in kalkarenita ter vsebuje pogosto lupine megalodontov. Tako je razvit dachsteinski apnenec v obeh rovih. Na površju pa smo zanesljivo ločili le člen C in redkeje B. Brečo je na površju težko opaziti zaradi preperevanja in pogostnih tektonskih premikov. Sliki 6 in 7 prikazujeta brečo in loferit z območja Suhega potoka in Boke.

Po značilnem razvoju dachsteinskega apnenca moremo sklepati, da je nastajal v zelo plitvi vodi. Člen A je značilen za supralitoralno cono, tj. območje, ki je samo občasno poplavljen. Laminirani stromatolitni člen B je značilen za območje plime in oseke, to je litoralno cono. Glavnina apnenca, ki pripada členu C, pa se je usedala pod cono plimovanja, vendar še vedno v plitvi vodi. Tudi glavni dolomit je nastajal v plitvem morju, in sicer po H. Zanklu (1971) povečini v litoralni coni.

Naštete značilnosti in enakomeren razvoj na obsežnih površinah ter velika debelina apnenca in dolomita kažejo, da je dno morja moralo biti skoraj ravno in se je počasi pogrezalo, kakor je napredovalo usedanje.

Podrobnejši študij paleogeografskega razvoja zgornjetriadnih sedimentov otežuje njihova zamotana tektonika.



Sl. 4. Drežniška planota z grapo Kozjek v ospredju, nariv dachsteinskega apnenca Krna v ozadju

Fig. 4. Drežnica Plateau and Kozjek Gorge in the foreground. In the background Krn Mountain, consisting of Dachstein Limestone thrust over Cretaceous Flysch



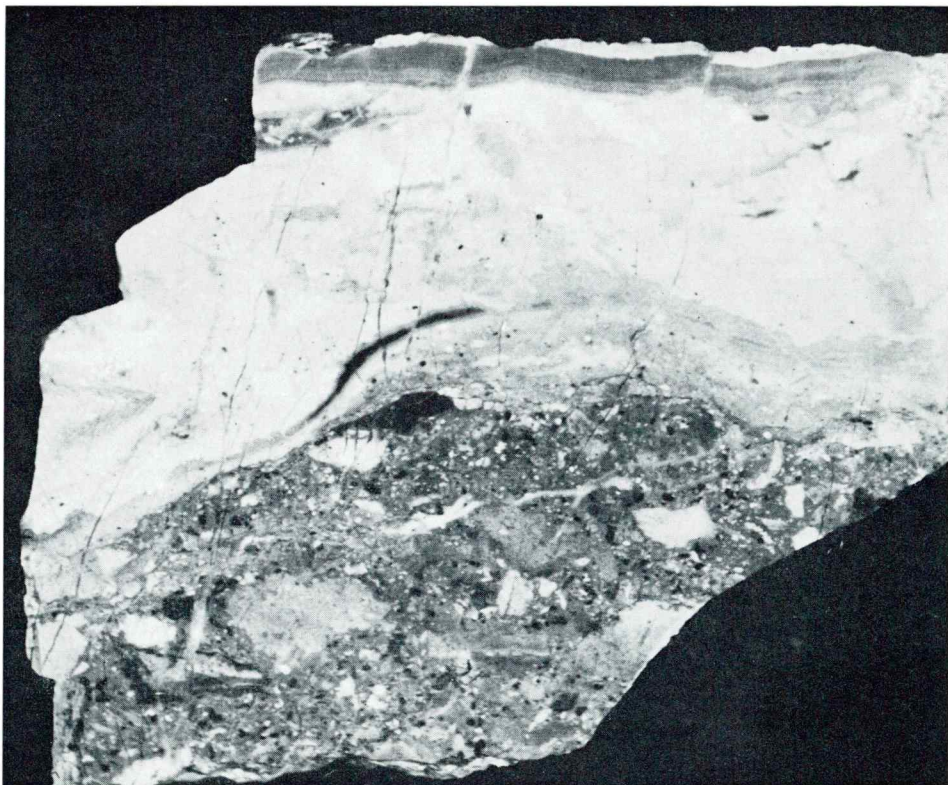
Sl. 5. Slap Boka v zgornjetriadnem apnencu in dolomitu

Fig. 5. Boka Waterfall in Upper Triassic Limestone and Dolomite

Jura

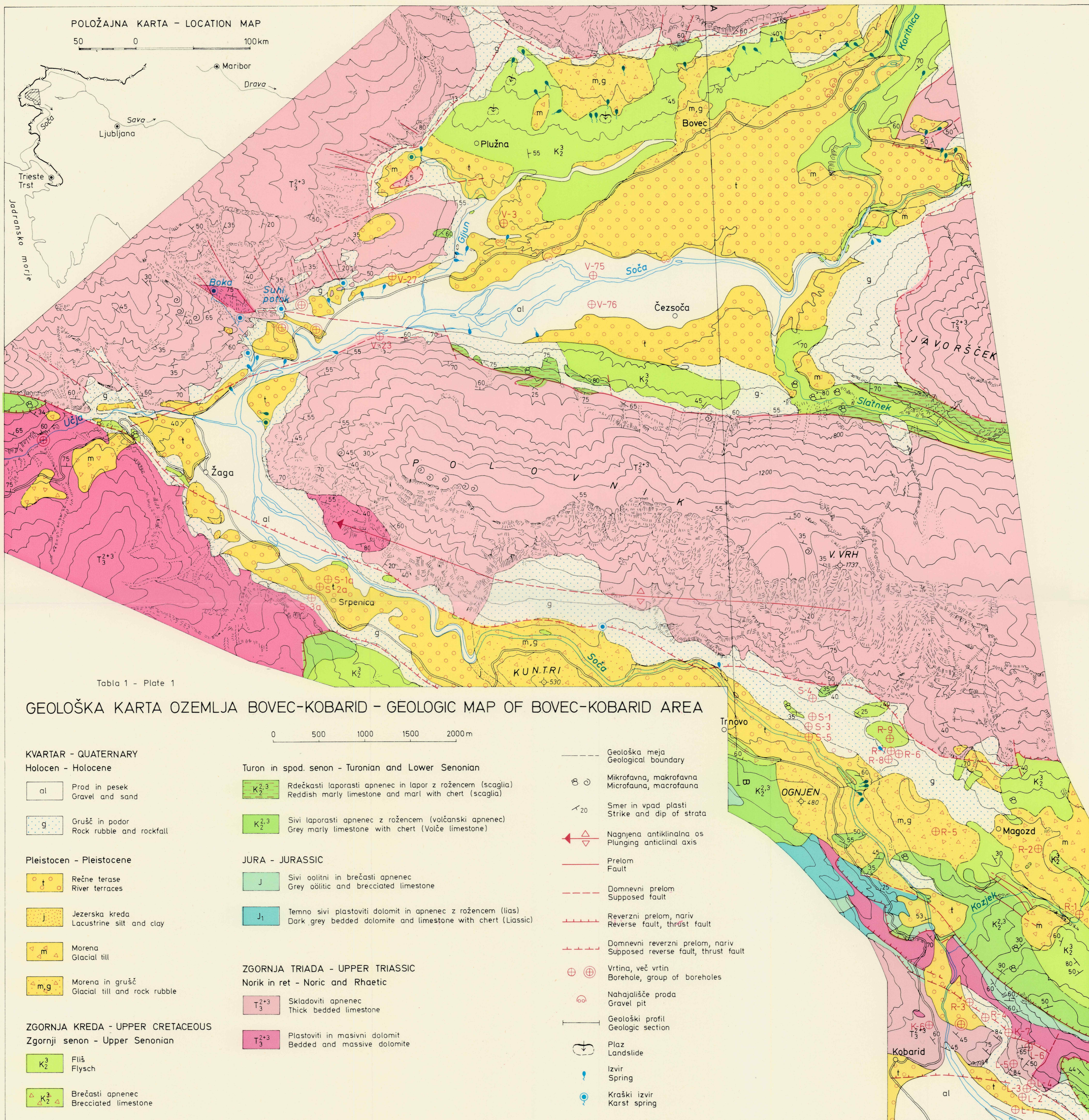
Jurski sedimenti so razkriti na znatno manjšem prostoru. Zaradi neznčilnega razvoja, pomanjkanja fosilov in zamotane tektonike jih je težko določiti. Na podlagi raziskav za projekt HE Gabrje prištevajo S. Buser spodnji juri tudi temno sivi ploščasti dolomit in apnenec z rožencem pri Kobaridu. Nad tem sledi sivi skladoviti apnenec, ki je delno ooliten. Njegova starost ni natančneje določena. Iz bližnje okolice omenja R. Selli (1953) v dolini Bavšice NE od Bovca brahiopode srednjega liasa *Spiriferina aesontina* Selli in *Rhynchonella alberti* Oppel. Srednjeliasne fosile naštevajo tudi z območja severozahodno od Kanina v rdečem brečastem apnencu.

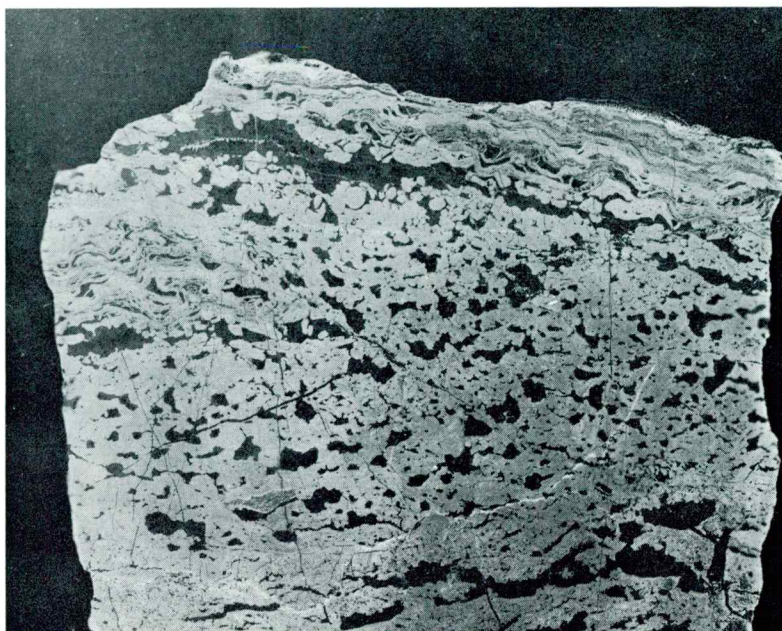
V dolini Koritnice sestoji talnina »scaglie« iz sivega skladovitega apnenca z lapornimi polami in ponekod limonitnimi gomolji. Apnenec je mikriten in intrabiospariten. L. Šribarjeva (B. Ogorelec, 1970) je določila v mikritnem apnencu vrsto *Globigera helveto-jurassica* Haeusler, ki je značilna



Sl. 6. Dachsteinski apnenec, breča z zelenim glinastim vezivom. Člen A loferskega ciklotema. Rov Suhi potok. Polirana površina. Naravna velikost

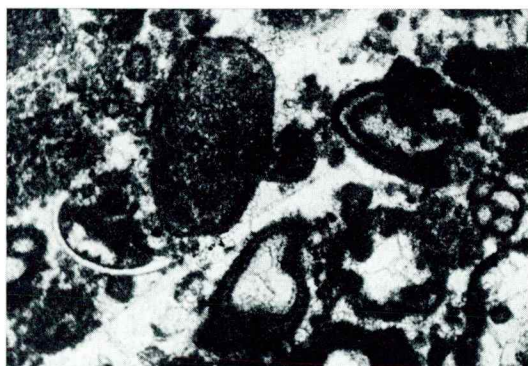
Fig. 6. Dachstein Limestone, breccia with a green clayey matrix. Member A of Lofer cyclothem. Gallery Suhi Potok. Polished surface. Natural size





Sl. 7. Dachsteinski apnenec. Člen B loferskega ciklotema s stromatolitnim pasom. Dolomitizirani apnenec (belo), kalcit (črno). Nahajališče Boka. Acetatna folija, negativ. Naravna velikost

Fig. 7. Dachstein Limestone, Member B of Lofer cyclothem with stromatolite. Sparry calcite (dark), dolomitic limestone (white). Occurrence: Boka. Peel, negative print. Natural size



Sl. 8. Intrasparitni apnenec z doggersko mikrofavno. Dolina Koritnice. 35 × povečano

Fig. 8. Intrasparitic limestone with Doggerian microfauna, Koritnica Valley. 35 × enlarged

za dogger. V istih plasteh nastopajo tudi številne Verneuilinidae in Textulariidae (sl. 8, 9).

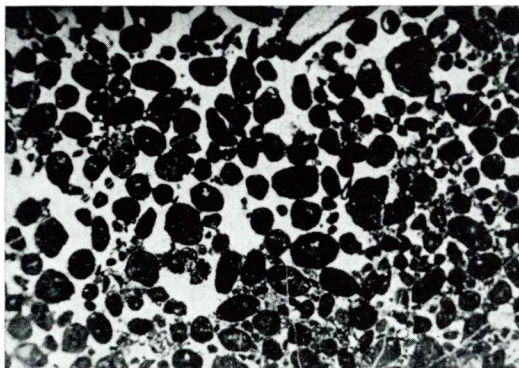
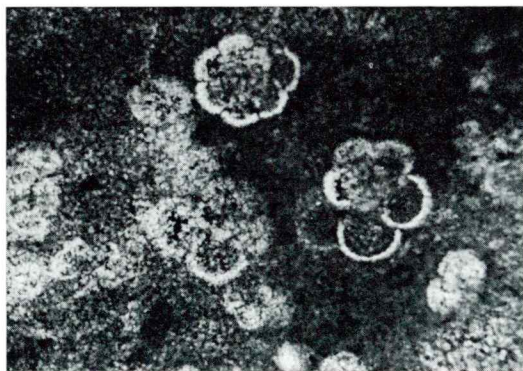
Na severnem pobočju Polovnika nastopa tudi skladoviti oolitni apnenec in laporasti apnenec (sl. 10) z limonitnimi gomolji, velikimi do 5 cm. Verjetno pripada juri. Od mikrofosilov so določene le Verneuilinidae in Textulariidae, značilnih fosilov za juro nismo dobili. Na verjetno jursko starost teh plasti sklepamo po litološki podobnosti s plastmi v dolini Koritnice. Na priloženi geološki karti (tab. 1) so te plasti označene kot dachsteinski apnenec, ker zaenkrat nimamo zanesljivih dokazov o njihovi jurski starosti in bi težko potegnili mejo med temi plastmi in pravim dachsteinskim apnenecem. Tudi rožnati apnenec, razkrit v manjšem obsegu severno od Bovca, je verjetno spodnjejurski.

Kreda

V krednih sedimentih so facialne razlike izrazitejše kot v starejših usedlinah, kar pripisujemo močnejšim tektonskim deformacijam morskega dna, na katerem so se usedali. Na raziskanem območju delimo kredne sedimente na dve

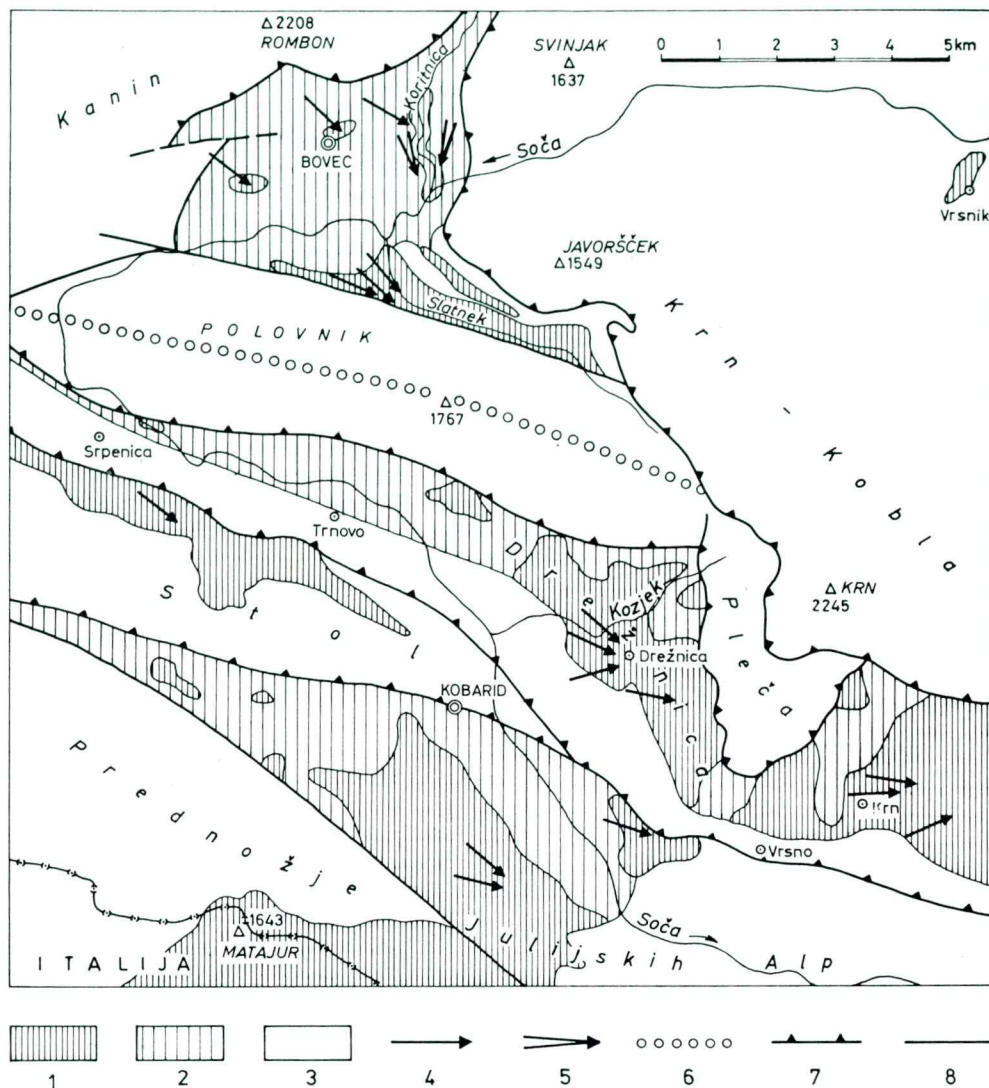
Sl. 9. Mikritni apnenec s foraminifero *Globigerina helveto-jurassica* Haeusler. Dogger. Dolina Koritnice. 100 × povečano

Fig. 9. Micritic limestone with *Globigerina helveto-jurassica* Haeusler. Dogger. Koritnica Valley. 100 × enlarged



Sl. 10. Oolitni apnenec s sparitnim vezivom, jura? Severno pobočje Polovnika. 5 × povečano

Fig. 10. Oolitic limestone with sparite cement, Jurassic? Northern slope of Mt. Polovnik. 5 × enlarged



Sl. 11. Razprostranjenost fliša in tektonske enote na območju med Bovcem in Kobaridom

Fig. 11. Map showing flysch areas and structural units between Bovec and Kobarid
 1 Flišne golice, 2 Fliš, prekrit z rečnimi naplavinami in morenami, 3 Zgornjetriadni, jurski in spodnjeosenonski sedimenti, 4 Smer toka med sedimentacijo fliša, 5 Smer toka med sedimentacijo »divjega fliša«, 6 Meja severnega in južnega faciesa krede, 7 Nariv, 8 Prelom

1 Flysch outcrops, 2 Flysch, covered by alluvium and till, 3 Upper Triassic, Jurassic and Lower Senonian sediments, 4 Current direction during flysch sedimentation, 5 Current direction during "Wild Flysch" sedimentation, 6 Limit of the north and south facies of the Cretaceous, 7 Thrust fault, 8 Fault

facialni območji, na okolico Drežnice in bovški kotel (sl. 11). V prvem se pričenjajo kredni skladi s tankoplastovitim apnencem z roženci (volčanski apnenec), v drugem pa z rdečim mikritnim apnencem (»scaglia«). Na obeh območjih sledi na apnencih lapornato peščeni fliš. Z njim se konča sedimentacija morskih plasti v zgornjem Psočju.

Bovški kotel. Spodnji del krednih sedimentov tvori mikritni apnenec, ki ga v literaturi pogosto označujejo kot »scaglio«. Apnenec je tankoplastovit, navadno v polah, debelih nekaj cm do 10 cm. Debelejše pole so le na prehodu v fliš. Navadno je vijoličasto rdeč, redko je svetlo sivkast ali zelenkasto siv. Po sestavi je apnenec zelo fino zrnat in laporast z različnim odstotkom glinaste snovi. Med posameznimi polami so nekaj mm debele plasti gline enake barve kot apnenec. Kontakti med posameznimi polami so navadno rahlo valoviti (sl. 12).

Mikritni apnenec je bogat z mikrofosili, posebno z globotruncanami, ki kažejo na turonsko ali spodnjesebonsko starost. V profilu Slatnek je med globotruncanami določila L. Šribarjeva vrste *Globotruncana elevata* (Brotzen), *G. calcarata* Cushman (sl. 13), *G. tricarinata* (Quereau), in *G. linneiana* (d'Orbigny). Poleg globotruncan je mnogo drugih pelagičnih oblik. Pogoste so roženčeve leče, ki dosežejo velikost pesti in so neenakomerno razporejene. Pri tektonskih premikanjih je »scaglia« razpokala in drobne razpoke je zapolnil sparit.

Pravo debelino »scaglie« je težko določiti. V dolini Koritnice sta kontakta s krovino in talnino prekrita. Debelino cenimo na okrog 150 m. V grapi Slatnek je debelina manjša, kontakt s talnino je tektonski.

Talnina »scaglie« je v dolini Koritnice svetlo sivi skladoviti apnenec srednjejurske starosti.

V bovškem kotlu leži nad »scaglio« fliš. Dobri profili so le v njegovem spodnjem in zgornjem delu. Popolnega sedimentološkega zaporedja nismo mogli ugotoviti, ker manjkajo izdanki v osrednjem delu bovškega kotla, ki je pogreznjen in na debelo prekrit s kvartarnimi naplavinami. V grapi Slatneka smo detaljno posneli spodnji del flišnih plasti v skupni debelini čez 500 m (sl. 14). Fliš leži konkordantno na »scaglii«. V bazi normalnega peščenega fliša so nekaj milimetrov debele pole peščenega glinovca in laporja. Glinovec je precej pust in se iverasto kroji. Tankoplastovitega glinovca je okrog 60 m. Zelo je opazna sprememba barve. Ob kontaktu je glinovec temno vijoličasto siv kot »scaglia« in bolj laporast (vsebuje 32 % CaCO_3), višje pa postaja čedalje bolj glinast in temno siv. Temu je vzrok redukcijsko okolje in sedimentacija meljnokovitovih gelov, ki se kopičijo v mikroskopsko velike grozde markazita.

Tanke razpoke v glinovcu, ki so navadno vzporedne plastem, zapolnjuje kalcit. Prva peščena pola v flišu nastopa dva metra nad kontaktom s »scaglio« in je debela 2 cm. Peščenjak je zelo drobnozrnat in je po sestavi poldroba. Enakomerno velika in izometrična zrna so srednje zaobljena. Med seboj se delno dotikajo. Sestava peščenjaka je naslednja: kremen 30 %, litoidni fragmenti 30 % (roženec, apnenec, skrilavec), kalcit do 20 %, klorit 1 do 2 %. Ostalo pripada glinenemu vezivu (sl. 15). Ta tip peščenjaka je značilen za vse peščene plasti bovškega fliša. Enak peščenjak je tudi ob Gljunu (sl. 16) in v dolini Koritnice. Spreminjata se le velikost zrn in količina karbonatov. Peščene pole v višjih delih fliša so debelejše.

Prve debelejšje pole peščenjaka se v Slatneku pojavijo po 60 m laporastega in glinastega skrilavca. Pole so debele do 20 cm in močno izstopajo iz mehkejšega skrilavca. Peščenjak ima enako sestavo in karakteristiko kot prej opisani. Sedimentološko pripada intervalom T_{d-e} (po A. H. B o u m i , 1962).

V eni od plasti smo na dveh krajih zasledili helminthoide, ki jih štejejo med najbolj razširjene sledi bentonskih organizmov v flišu. Po A. Seilacherju (1959), je ta hieroglif karakterističen za bolj distalno in globljo morsko sedi-

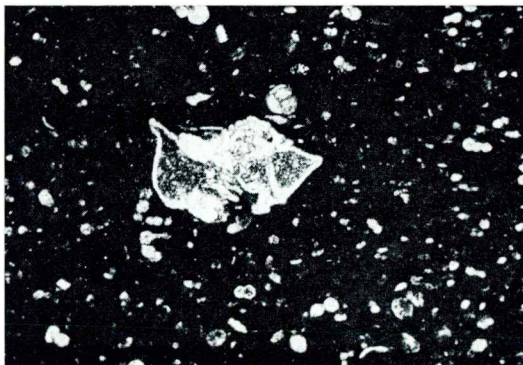


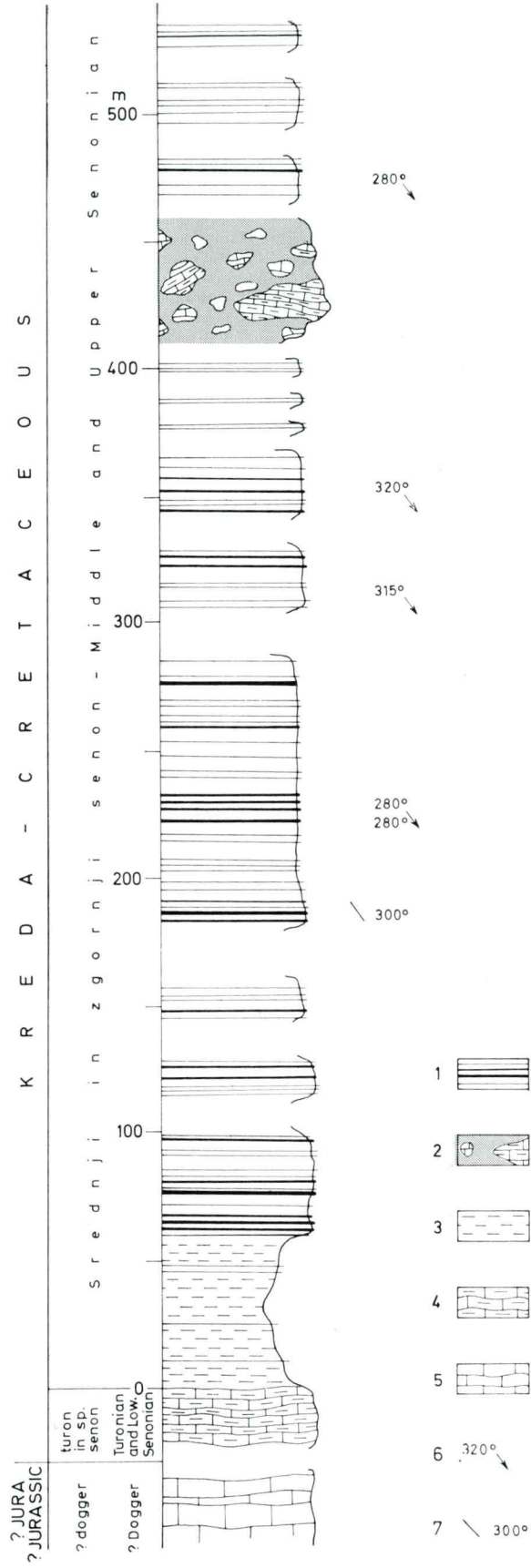
Sl. 12. Rdeči mikritni laporasti apnenec (»scaglia») Grapa Slatnek

Fig. 12. Red micritic marly limestone (»Scaglia»). Slatnek Gorge

Sl. 13. *Globotruncana calcarata* Cushman v mikritnem apnencu (»scaglia»), kampanij. Grapa Slatnek. 35 × povečano

Fig. 13. *Globotruncana calcarata* Cushman in micritic limestone (»Scaglia»), Campanian. Slatnek Gorge. 35 × enlarged



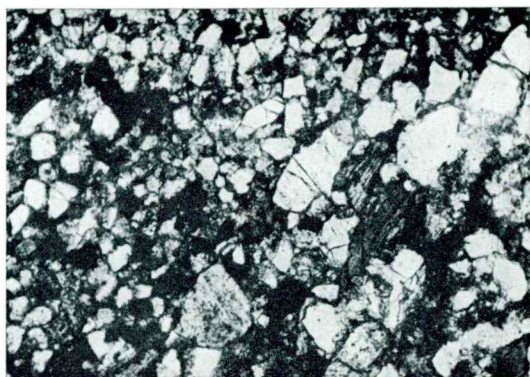


Sl. 14. Profil fliša v Bovški kotlini, soteska Slatnek

Fig. 14. Flysch section of the Bovec Basin, Slatnek Gorge

1 Fliš s karakteristikami distalnega razvoja, 2 Olistostroma, 3 Peščeni glinovci in lapor, s tankimi peščenami polami, 4 Tankoploščasti rdeči apnenec in laporasti apnenec z roženčevimi lečami (»scaglia«), 5 Debeloskladoviti sivi apnenec, 6 Smer tokovnic, 7 Smer brazd

1 Flysch with characteristics of distal deposits, 2 Olistostrome, 3 Sandy argillite and marl, with thin sandstone beds, 4 Thin-bedded red limestone and marly limestone with chert lenses (»Scaglia«), 5 Thick-bedded grey limestone, 6 Direction of flute casts, 7 Direction of groove casts



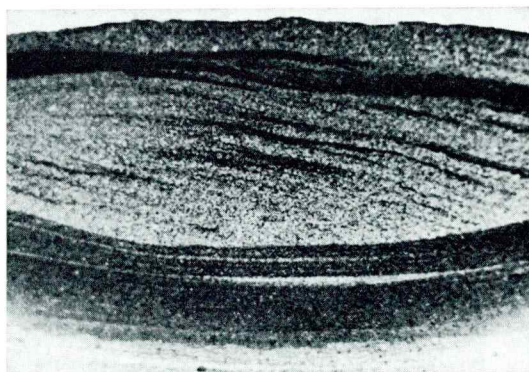
Sl. 15. Flišni peščenjak s postopno zrnastostjo. Soteska Slatnek. 35 × povečano

Fig. 15. Flysch sandstone displaying graded bedding. Slatnek Gorge. 35 × enlarged



Sl. 16. Tankoplastoviti fliš ob Gljunu

Fig. 16. Thin bedded flysch at the Gljun Brook



Sl. 17. Interval valovite laminacije v flišni turbiditni sekvenci. Soteska Slatnek. 3 × povečano

Fig. 17. Interval of current ripple lamination in flysch turbidite sequence. Slatnek Gorge. 3 × enlarged

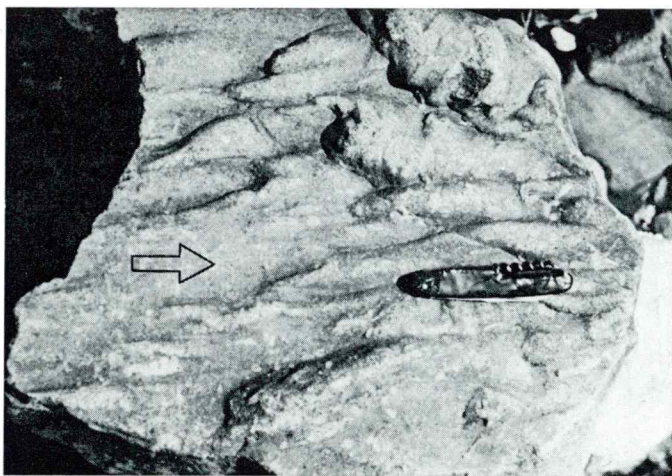
mentacijo. Po prvih peščenih plasteh kaže fliš bolj monoton peščen razvoj. V plasteh prevladujejo zgornji intervali turbiditnega zaporedja (T_{d-e}). Pogosto je lepo viden interval valovite laminacije (sl. 17). Interval T_c je redek, medtem ko gradacijski interval T_a in spodnji laminarni interval T_b manjkata.

Fliš je včasih rahlo zguban, posamezni odseki profila pa so prekriti. Tokovnice (flute casts, sl. 18), brazde (groove casts) in druge mehanske teksture turbiditov so sicer redke, vse pa kažejo na transport materiala s severozahoda.

Zanimiva je olistostroma pri mostu čez Slatnek, debela okrog 30 m. Tu »plavajo« v glinasti in drobno peščeni osnovi redki slabo zaobljeni bloki. Prevladujejo bloki rdeče »scaglie«, blokov mezozojskih apnencev je manj. Bloki so različno veliki, od velikosti pesti do več m^3 . Olistostroma je nastala tako, da so se bloki apnenca plazili pod vodo z boka bazena (v tem primeru z juga), in se pomešali med glinasto in drobnopješeno osnovo. Olistostroma kaže na močna tektonska dogajanja med sedimentacijo fliša. V njeni krovnini sledi zopet tankoplastoviti fliš.

Profil fliša v dolini Koritnice nam kaže lastnosti fliša v severnem delu bovškega kotla, a je slabše razgaljen kot profil v grapi Slatnek. To velja predvsem za spodnji del. Zato je tudi težje določiti njegovo pravo debelino. Cenimo, da je okrog 500 metrov tankoplastovitega fliša z enakimi karakteristikami kot v Slatneku.

Že pri prejšnjih kartiranjih so posebno pozornost vzbujale debele konglomeratne plasti pri mostu čez Koritnico pred vasjo Kal. Označili so jih za »divji fliš« (A. Winkler, 1920), ker naj bi imel iste značilnosti kot podoben fliš v Švici. Značilnosti fliša v dolini Koritnice se spreminjajo od globokomorskih v spodnjem delu (glinovec in tankoplastoviti fliš) do plitvomorskih, ki ga predstavlja »divji fliš«, tj. odražajo razvoj iz distalnega k proksimalnemu flišnemu

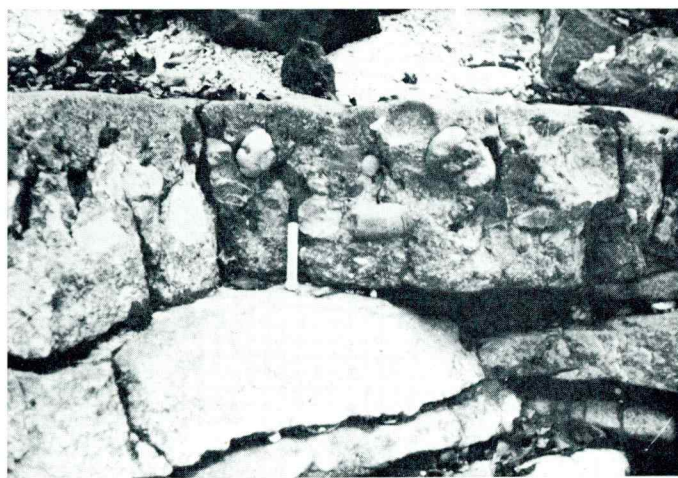


Sl. 18. Plast fliša s tokovnicami. Gljun. Puščica kaže smer transporta

Fig. 18. Flute casts in flysch sandstone. Gljun Valley. Arrow indicates current direction



Sl. 19. »Divji fliš« pri mostu čez Koritnico
Fig. 19. "Wild Flysch" at the bridge on the Koritnica River



Sl. 20. Konglomeratna plast »divjega fliša« pri mostu čez
Koritnico
Fig. 20. Conglomerate bed in the "Wild Flysch" at the bridge
on the Koritnica River

faciesu. Prehod je postopen. Peščene plasti postajajo više čedalje debelejšje, bolj grobozrnate, pojavljata se tudi gradacijski in laminarni interval T_{a-b} . Prve tanjše plasti drobnega konglomerata nastopijo 400 m severno od mostu. Prodniki dosežejo tu velikost oreha. Pri mostu čez Koritnico (sl. 19 in 20) so posamezne plasti debele nekaj cm do enega metra. Prodniki so različno veliki, navadno 2 do 10 cm, največ pa 20 cm v premeru. V dveh plasteh smo šteli prodnike. Njihovo petrografsko sestavo podajamo v tabeli 1. Vidimo, da je tretjina prodnikov iz drobnozrnatega flišnega peščenjaka. To so veliki in največji prodniki. Drugo tretjino tvori svetlejši mezozojski apnenec. Dokaj močno je zastopana tudi »scaglia«, roženec pa je pogosten med drobnimi prodniki. Kamenine, ki sestavljajo prodnike, najdemo ob robu flišnega bazena, oziroma v talnini fliša. To tudi govori za sorazmerno kratek in bolj lokalni transport materiala; tokovnice v »divjem flišu« pa kažejo na transport s severa. Obremenitvene vzbokline (load casts) in pomanjkanje glinene komponente kažejo na hitro sedimentacijo v obliki fluksoturbiditov. To je kombinacija podvodnega plazenja s turbiditom, kjer se drže prodniki in peščena zrna dokaj skupaj, glina pa zaostaja in se v suspenziji odnaša v distalni del bazena. Pogoji za tako sedimentacijo je strmo dno. Vlogo glinastega veziva prevzameta tu grob in drobnejši pesek, laporja in gline pa je zelo malo. Z »divjim flišem« se je končala sedimentacija na bovškem območju.

Tabela 1
Petrografska sestava prodnikov v »divjem flišu« Koritnice

	Mezozojski apnenec (večinoma jurski)	»Scaglia«	»Scaglia« z rožencem	Roženec	Fliš (drobnozrnata poldroba)	Magmatska kamenina (porfirit)	Ostalo (nedoločljiv apnenec in dolomit)	Skupaj
Število preiskanih prodnikov iz 1. plasti	37	9	5	3	28	2	6	90
Število preiskanih prodnikov iz 2. plasti	27	12	4	4	25	—	8	80
Skupaj	64	21	9	7	53	2	14	170
v %	37		22		32	1	8	100

Flišne goliče nad Bovcem in pri Gljuni kažejo normalen razvoj fliša, kakršnega dobimo v talnini »divjega« fliša. Petrografska sestava peščenjaka in glinovca je ekvivalentna vzorcem iz doline Koritnice in grape Slatnek. Tokovnice kažejo tudi tu transport s severozahoda. Zaradi bližine naravnega kontakta pod Rombonom je fliš v grapah nad Bovcem zguban in delno razpokan. Sam narivni rob je prekrit z moreno.

Čeprav je mikrofavna v pelagičnih glinenih intervalih v bovškem flišu številna, so foraminifere slabo ohranjene. Povečini so prekristaljene in se jim da določiti le rod. Globotrunkane kažejo na zgornjesenonsko starost fliša. Poleg njih so še foraminifere rodov *Lenticulina*, *Cibicides*, *Bathysiphon* in spikule spongij.

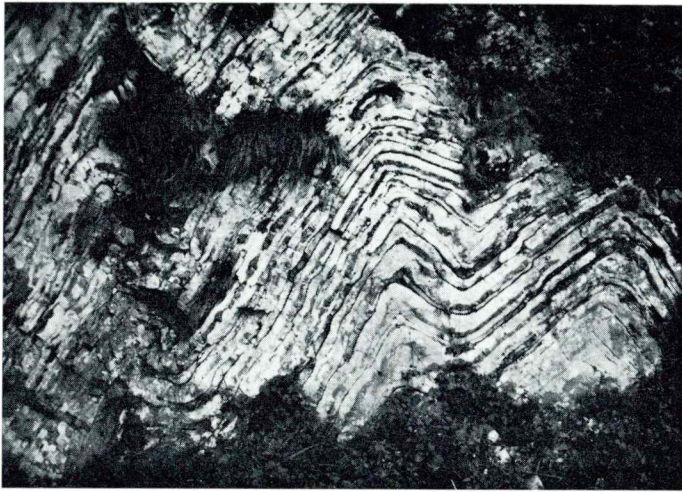
Fliš in »scaglia« pri Vrsniku, vzhodno od bovškega kotla, sta le vzhodni ostanek nekdanj enotne bovške flišne kadunje. »Scaglia« je tu zelo zgubana in razpokana ter v tektonskem stiku z dachsteinskim apnenecem. Na sestavo fliša moremo sklepati le po kosih flišnega peščenjaka med preperino. Ti so enaki kot na Bovškem. Peščenjak je drobnozrnata poldroba. Tudi analiza težkih mineralov kaže podobno mineralno sestavo kot v Slatneku in Koritnici. Svetli apnenec ob kontaktu s »scaglio«, ki je na kartah označen kot dachsteinski, je mikroskopsko podoben apnencu s severne strani Polovnika. To je drobnozrnati oolitni apnenec s sparitnim cementom brez fosilov.

Okolica Drežnice. Stratigrafski ekvivalent »scaglie« predstavlja na območju Drežnice volčanski apnenec. Ime je uvedel Stur (1858) po kraju Volče pri Tolminu (sl. 21). F. Kossmat (1914) ga opisuje kot ploščasti laporasti apnenec z lečami roženca in ga uvršča v spodnjo kreda. Z O. Marinellijem ga imata za ekvivalent »biancone« Južne Tirolske in Beneške. Med geološkim kartiranjem za projekt HE Trnovo je K. Grad opazil, da kaže volčanski apnenec pogosto gradacijsko zrnavost in ritmično zgradbo. Podrobno smo preiskali mikroprofil v debelini 4 m v zgornjem delu tega apnenca ob cesti med Kobaridom in Drežnico z namenom, da bi ugotovili njegove sedimentološke karakteristike in nastanek (sl. 22, 23).

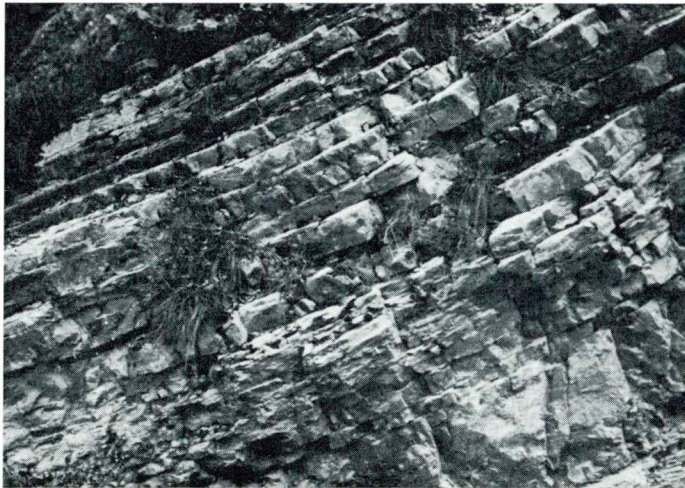
Volčanski apnenec, kakršen je pri Drežnici, imamo lahko za fliš v apnenem razvoju. Razumljivo je, da so zaradi apnenega materiala posamezne flišne značilnosti slabše izražene ali sploh manjkajo (npr. tokovnice, hieroglifi), pogosto so pa lepo vidni interval postopne zrnavosti, interval valovite laminacije in pelitni interval (sl. 24). Posamezne pole volčanskega apnenca so debele največ 40 cm, navadno pa 5 do 10 cm. Loči jih zelo tanka, največ nekaj mm debela laporna plast.

Spodnji interval je gradacijski in sestoji iz drobnih slabo zaobljenih kosov mikritnega apnenca z mikrofavno (sl. 25). Vezivo je mikritno in sparitno. Srednji interval ni posebno pogosten. Kaže tokovno, pogosto tudi valovito laminacijo, ki je opazna le v debelejšem preparatu. Oba intervala sta značilna za sedimentacijo iz turbiditnih tokov, ki so prenašali apneni material z bokov bazena, kjer se je že konsolidirani apnenec erodiral. V zgornjem intervalu (sl. 26) je zelo drobnozrnati mikritni apnenec, ki vsebuje bogato pelagično foraminiferno mikrofavno (globotrunkane, globigerine, redkeje gümbeline in miliolide). Med globotrunkanami sta najbolj pogostni *Globotruncana linneiana* d'Orbigny in *Globotruncana coronata* Bolli (determinirala L. Šribarjeva), ki kažeta na spodnje senonsko starost volčanskega apnenca. Ta apnenec je nastajal z direktno sedimentacijo v pelagičnem območju. Medtem ko je prehod med posameznimi intervali postopen, je meja dveh sekvenc zelo ostra. Apnenec je siv do zelenkasto siv, le redko ima podoben rdečkast odtенок kot »scaglia«.

Roženec nastopa v tanjših lečah in gomoljih. Nahaja se v vsakem intervalu, najpogostnejši pa je na prehodu gradacijskega intervala v laminarnega (sl. 27). Pri Drežnici je volčanski apnenec narinjen na jurske in triadne apnenice. Ker manjkajo bazalne plasti, je težko ugotoviti njegovo pravo debelino.

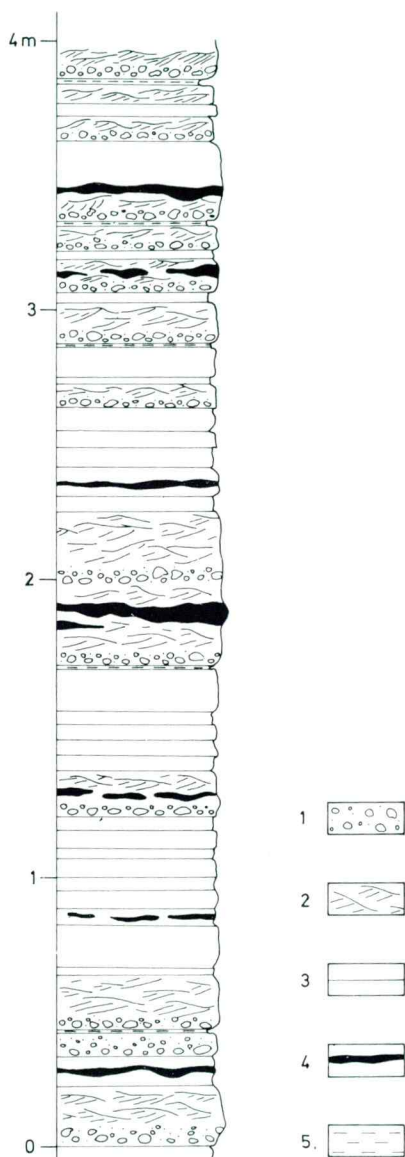


Sl. 21. Naguban volčanski apnenec ob cesti proti Tolminu
Fig. 21. Folded Volče Limestone, road to Tolmin



Sl. 22. Volčanski apnenec ob cesti proti Drežnici
Fig. 22. Volče Limestone, road to Drežnica

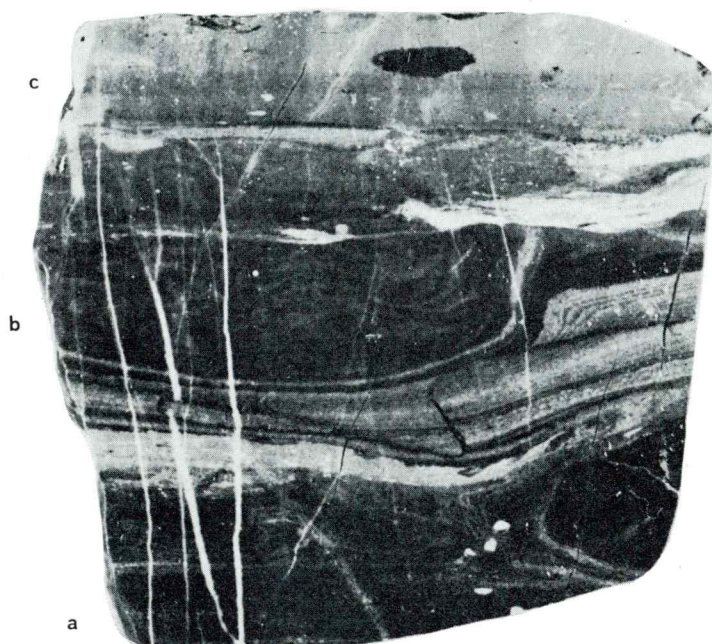
Fliš v okolici Drežnice se razlikuje od bovškega. Predvsem so zanj značilne tudi po več deset metrov debele plasti breče med normalnim peščenim flišem ter apneni peščenjak, kakršnega v bovškem flišu ne najdemo. Fliš drežniškega območja je najbolj razgaljen v grapi Kozjek ter v grapah okrog Drežnice in Raven. V Kozjeku je bil posnet profil, ki ga kaže sl. 28. Okrog Vrsnega, vasi Krn, pri Srpenici in drugod so le posamezne flišne golice. Južno od tega območja je pri Livku ob cesti razgaljen čez 100 metrov dolg profil, toda spodnji



Sl. 23. Detajlni profil volčanskega apnenca pri Drežnici

Fig. 23. Detailed section of Volče Limestone at Drežnica

1 Interval postopne zrnivosti, 2 Interval valovite laminacije, 3 Pelitni interval s foraminiferami, 4 Leče roženca, 5 Laporasti skrilavec.
1 Graded interval, 2 Interval of current ripple lamination, 3 Pelitic interval with foraminifers, 4 Chert lenses, 5 Marly shale.

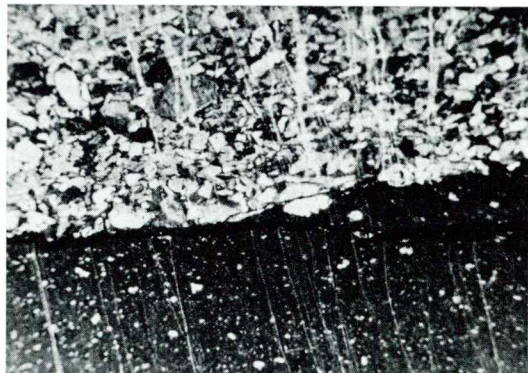


Sl. 24. Volčanski apnenec, cesta proti Drežnici
a) interval postopne zrnivosti, b) interval valovite laminacije,
c) pelitni interval. Naravna velikost

Fig. 24. Volče Limestone, on the road to Drežnica
a) graded interval, b) interval of convolute lamination, c) pelitic
interval. Natural size

Sl. 25. Kontakt med intervalom postopne zrnivosti in pelagičnim intervalom volčanskega apnenca. Cesta proti Drežnici. 35 × povečano

Fig. 25. Volče Limestone, contact between graded and pelagic intervals. Road to Drežnica. 35 × enlarged

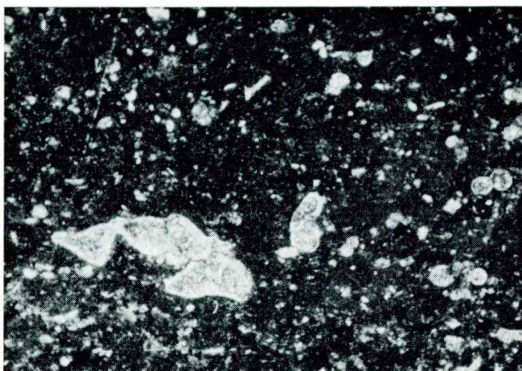


del fliša tu ni viden. Profil v Kozjeku tudi ni najbolj primeren za ugotavljanje stratigrafskega profila, ker se zaradi luskaste zgradbe posamezne plasti večkrat ponavljajo.

V grapi Kozjek sledi na volčanskem apnencu konkordantno fliš. V bazi fliša je skladoviti zelo drobnozrnati apneni peščenjak, debel 15 m. Posamezne pole so debele do 50 cm in kažejo tanko laminacijo. Peščenjak sestoji iz srednje zaobljenih zrn sivega, delno prekristaljenega apnenca. Vezivo je glineno, delno mikritno. Poleg zrn apnenca vsebuje peščenjak še kremenova zrna (okrog 10 %) in gele sedimentnega sulfida. Apneni peščenjak prehaja nato v sivi glinovec, debel nekaj metrov in nato sledi pravi tankoplastoviti fliš. Ta je temno siv in

Sl. 26. Zgornji interval volčanskega apnenca. Mikritni apnenec s pelagično mikrofavno. Cesta proti Drežnici. 35 × povečano

Fig. 26. Upper interval of Volče Limestone. Micritic limestone with pelagic microfauna. Road to Drežnica. 35 × enlarged



Sl. 27. Roženčeve leče v volčanskem apnencu. Grapa pri Magozdu

Fig. 27. Chert lenses in Volče Limestone. Ravine at Magozd

ima 20 do 30 % peščenih pol, debelih po nekaj cm, z intervali T_{c-e} . Ostalo pripada glinovcu, ki vsebuje okrog 5 % karbonata. Peščene pole imajo enako sestavo in karakteristike kot na Bovškem in nedvomno kažejo na isti izvor. V tem flišu so do 1 m debele pole grobozrnatega apnenega peščenjaka in drobne breče z jasno plastovitostjo. Zelo slabo zaobljena podolgovata zrna se med seboj dotikajo. Glinenemu vezivu pripada le nekaj odstotkov. Med zrni prevladuje volčanski apnenec, ostanek pripada sparitu, kremen pa je le v sledovih. Tak peščenjak in breča sta bolj pogostna v spodnjem delu fliša. V profilu pri Livku je apnena breča še lepše razvita. Zrna dosežejo tu velikost enega centimetra. Zrna apnenca sestojijo iz lupin školjk ter iz peletnega, organskega, mikritnega in sparitnega apnenca. Fosili so pogostni (miliolide, deli rudistov, mahovnjaki, tekstularije) in kažejo na jursko in kredno starost apnenih zrn.

Opisani grobozrnati peščenjak in brečo najdemo le v okolici Drežnice in pri Kobaridu. Dejstvo, da ne dobimo enakih kamenin na Bovškem, nam tudi kaže na delitev sedimentacijskega bazena v severni (bovški) in južni (drežniški) del s podvodnim pragom v smeri Polovnika. Za razliko od normalnega, bolj kremenovega peščenjaka (poldrobe), ki se je transportiral od severozahoda, sta bila apneni peščenjak in breča odložena v bazen z boka, slabo zaobljena zrna pa kažejo na sorazmerno kratek transport. Edina možna smer transporta te breče in peščenjaka je z juga, ker volčanskega apnenca severno od Polovnika ni.

Že F. K o s s m a t je bil pozoren na plasti in večje komplekse breče med tankoplastovitim flišem na Kobariškem, lepo vidne v grapah nad Drežnico, v okolici Raven, pri vasi Krn, ob cesti na Livek in drugod. Poleg breče je ponekod tudi konglomerat z obilnim glineno-lapornim vezivom. Te plasti breč in konglomerata soolistostrome, nastale očitno s podvodnim plazenjem. Takšne olistostrome dosežejo na Kobariškem in pri Drežnici debelino največ 60 m, navadno pa so debele do 10 m. Bloki in prodniki olistostrom sestojijo skoraj izključno iz apnencev, ki jih najdemo v okolici. Prevladuje volčanski apnenec, pogostni so tudi razni mezozojski apnenci (isti kot v grobozrnatih peščenjakihi). Bloki dosežejo velikost 1 m, navadno pa so manjši (velikost pesti).

V nekaterih olistostromah je zanimivo vezivo, ki spominja na »scaglio« bovškega kotla. Navadno je to vijoličasto rdeč, redko temno siv gost glinasti lapor (vsebuje 23 % $CaCO_3$), ki je precej trd in se iverasto kroji. Vmes so tudi foraminifere, predvsem globotrunkane. V grapi nad Drežnico je med tankoplastovitim »peščenim« flišem čez 10 m debel kompleks take »scaglii« podobne kamenine. V njej ni nobenih prodnikov ali blokov in kamenina ne pripada olistostromam. Leče roženca njeno podobnost s »scaglio« še povečujejo.

Pravo debelino fliša je v okolici Drežnice težko oceniti, zdi pa se, da je manjša kot v bovškem kotlu. Tudi del drežniške planote je sinklinala, katere južno krilo je v normalnem položaju, severno krilo pa je strmo in prevrnjeno pod naravnim robom Polovnika. Os sinklinale poteka vzporedno s Polovnikom. Najmlajši del flišne formacije je zguban in povečini prekrit. Ni debelejši od 200 m. Foraminifere kažejo na zgornjesenonsko starost tega dela fliša.

Sl. 28. Fliš drežniškega pasu

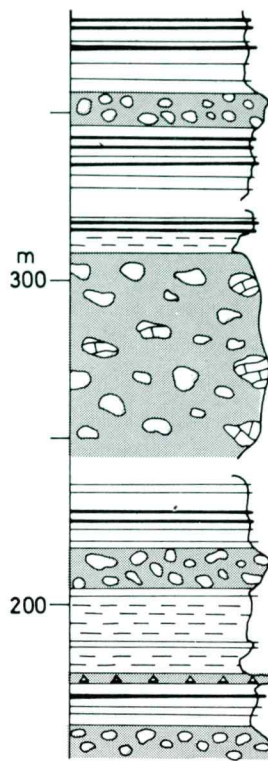
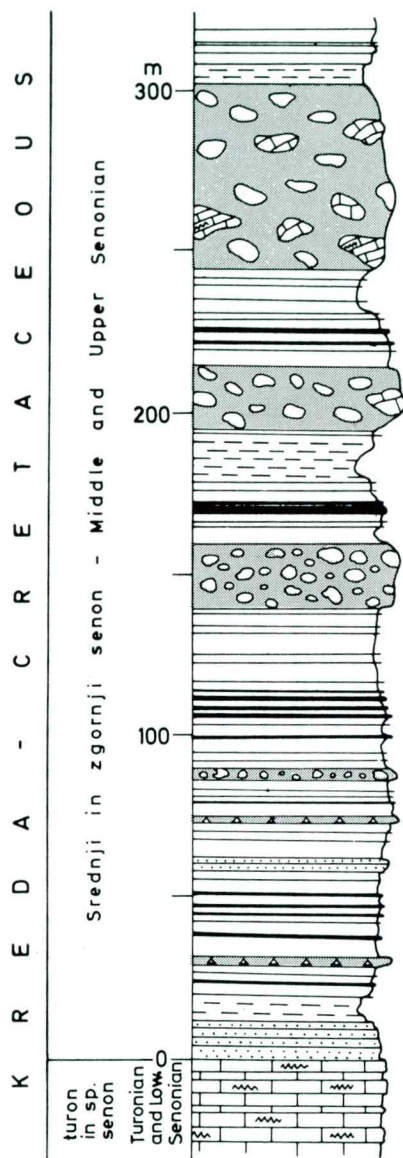
Fig. 28. Flysch of the Drežnica Zone

1 Olistostroma, 2 Fliš s karakteristikami distalnega razvoja, 3 Debelejše plasti apnene breče, 4 Plastoviti glinovec, 5 Drobnozrnati apnenčev peščenjak in breča, 6 Volčanski apnenec.

1 Olistostrome, 2 Flysch displaying characteristics of distal deposits, 3 Thick beds of calcareous breccia, 4 Bedded argillite, 5 Fine grained calcareous sandstone and breccia, 6 Volče Limestone.

Soteska Kozjek
Kozjek Gorge

Drežnica
Drežnica Village



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6

Po naših opazovanjih je debelina »peščenega« fliša v grapi Kozjek od baze do horizontov pri Ravnah okrog 350 m, tako da je skupna debelina okrog 500 m. Pri Drežnici vpada fliš blago proti severu, ponekod pa leži skoraj vodoravno. Pri narivanju Polovnika s severa je prišlo tudi do manjših narivov v samem flišu. To opazimo v grapi Kozjek med Drežnico in Jezercami, kjer je ista, kakih 10 m debela plast breče dvakrat luskasto narinjena na glinasto flišne pole.

Pod Krnom je fliš v peščenem razvoju debeljši kot pri Drežnici in ni v inverznem položaju. Vpada položno pod narivni rob dachsteinskega apnenca.

Po izpiranju mikrofavne smo iz glinastih vzorcev fliša ločili z bromoformom težke minerale desetih vzorcev, ki smo jih nabrali na vseh večjih flišnih območjih. Sestava težkih mineralov je dokaj monotona, skoraj vsi izpirki vsebujejo enake minerale. To kaže na enoten izvor sedimenta.

Med prozornimi minerali močno prevladujeta granat in cirkon. Poleg tega najdemo še klorit, turmalin, apatit, levkoxen, rutil in sfen. Štetje zrn in določanje procentualne sestave ni možno, ker so izpirki siromašni s težkimi minerali in so vzorci bili za statistično obdelavo premajhni.

Minerali kažejo na dolg transport. Zrna granatov so še dokaj sveža, turmalin in cirkon imata še ohranjeno kristalno obliko, vendar precej zaobljene robove. Zrna rutila so močno zaobljena, nekaj cirkonovih zrn pa je popolnoma zaobljenih.

Neprozorni minerali v izpirkih prevladujejo. Med njimi je najpogostnejši sedimentni sulfid (markazit), ki zapolnjuje tudi foraminifere. Poleg sedimentnega sulfida so pogostnejši še limonit, magnetit in ilmenit.

V lahki frakciji (0,06 do 0,1 mm) je najpogostnejši kremen. V nekaj izpirkih ga je do 90 %. Karbonatov (v glavnem apnenec in čisti kalcit) je nekaj odstotkov do 30 %. Femične minerale nahajamo le v sledovih in jih je nekaj odstotkov. Enako je tudi s sljudami, kjer muskovit prevladuje nad biotitom.

Postavlja se vprašanje izvora težkih mineralov. Transportirali so se skupaj s peščenimi zrni s severozahoda. Zato je njihovo matično kamenino treba iskati v metamorfnih in magmatskih kameninah Centralnih Alp.

Sklepi o sedimentaciji v kredni dobi. Flišno območje Zgornjega Posočja je le manjši del krednega flišnega ozemlja na južni strani Julijskih Alp. Popolnejšo podobo sedimentoloških in tektonskih razmer v širšem obsegu bo mogoče podati šele po obdelavi celotnega predalpskega prostora. Rezultati naših raziskav so le del tega programa in so na kratko naslednji:

V senonu je na ozemlju Zgornjega Posočja obstajala morska kadunja. Podvodni greben na območju Polovnika jo je delil na dva dela. V južnem (drežniškem) se je usedal v začetku volčanski apnenec, ki kaže s svojo ritmično in gradacijsko zgradbo vse znake apnenega flišnega razvoja. Ta tankoploščasti apnenec se je sedimentiral delno s turbiditi. V severnem delu (bovškem) se je v pelagičnem okolju istočasno odlagala tankoplastovita »scaglia«. Foraminiferna favna je ista v volčanskem apnencu in v »scaglii« in dokazuje njuno istočasno sedimentacijo v turonu in spodnjem senonu. V zgornjem senonu se je pričel odlagati na obeh območjih fliš. V spodnjem delu ima karakteristiko distalne sedimentacije, više pa postaja čedalje bolj plitvomorski. Generalna smer transporta peščenjaka in glinovca je s severozahoda (sl. 11).

Razlike med bovškim in drežniškim območjem so opazne v grobozrnatih plasteh. V bovškem kotlu so to debelejšše konglomeratne olistostrome z drob-

nim peščenim vezivom. Material je prihajal s severa in kaže na krajši in hiter transport, ko je bila obala blizu. Drežniški fliš se razlikuje od bovškega po apnenem peščenjaku in breči. Pole peščenjaka dosežejo debelino enega metra, breča pa je dosti debelejša. Material za peščenjak in brečo je prihajal v bazen z juga in jugozahoda, zaradi podvodnega praga pa ni prodril v severno kadunjo.

Zgornjekredni sedimenti Zgornjega Posočja kažejo na živahna tektonska dogajanja med vso sedimentacijo. Bazen se je pričel formirati v mediteranski tektonski fazi v turonu (A. Tollman, 1966) s transgresijo »scaglie« in volčanskega apnenca na jurske sedimente. Močnejše je zastopana ressenska tektonska faza med spodnjim in zgornjim kampanom, ko se je pričel odlagati fliš. Z »divjim flišem« se sedimentacija v zgornjem Posočju konča.

Tektonika predkvartarne podlage

Zgornje Posočje leži na stiku Julijskih Alp in njihovega prednožja in ima zelo zapleteno zgradbo, ki sta jo že F. Kossmat in A. Winkler različno interpretirala. Pri tem je bilo pomembno vprašanje, ali je bovški kotel tektonsko okno v narivu Kanina in Polovnika, kot to zagovarja A. Winkler (1921), ali pa je le močno pogreznjena sinklinala, kot je mislil F. Kossmat (1913).

V okolici Bovca in Kobarida ločimo naslednje tektonske enote (sl. 11):

- a) Kanin,
- b) Krnsko-koblanska enota,
- c) Pleče,
- d) Bovški kotel,
- e) Polovnik,
- f) Drežniški pas,
- g) Kobariški Stol, } Julijska zunanja cona
- h) Prednožje Julijskih Alp.

a) Kanin je del široke plošče dachsteinskega apnenca Centralnih Julijskih Alp. Od fliša bovškega kotla ga loči narivna ploskev, ki se nadaljuje proti severovzhodu v mojstrovški prelom. Ta loči severovzhodno nadaljevanje kaninske enote od vzhodnejše ležečih enot Centralnih Julijskih Alp.

b) Krnsko-koblanska enota je največja od vseh; pripada južnemu delu Centralnih Julijskih Alp. Njena zahodna meja poteka ob mojstrovškem prelomu. Na Bovškem ji pripadata planini Golobar in Svinjak. Pri Kalu se obrne meja med to enoto in flišem bovškega kotla proti jugovzhodu in se nadaljuje v zelo pomembni krnsko-koblanski nariv. Ta tektonska enota sestoji v glavnem iz dachsteinskega apnenca.

c) Pleče predstavlja ozemlje vzhodno od Drežnice in južno od Krna. Sestoji iz močno zgubane in razpokane »scaglie« in svetlejšega lapornega krednega apnenca. Ta tektonska enota je bila izrinjena iz vzhodnega dela bovškega prostora.

d) Bovški kotel je po mnenju nekaterih geologov (F. Kossmat, 1913) globoko vgubana flišna sinklinala s smerjo vzhod—zahod, po mnenju drugih pa tektonsko okno (A. Winkler, 1924). Severozahodni rob bovškega kotla

predstavlja nariv Kanina in Rombona na fliš (sl. 3). Dachsteinski apnenec vpada tu proti jugu diskordantno na narivno ploskev. Fliš pod narivnim robom je precej zguban.

e) Polovnik kaže antiklinalno zgradbo (tab. 3, sl. 1). Os antiklinale poteka po južni strani slemenca. Proti zahodu se na drugi strani Soče antiklinala ne nadaljuje, ker jo prekinja prelom. V njenem severnem krilu vpadajo plasti pod kotom 60° proti severu ter jih od »scaglie« in bovškega fliša loči subvertikalni prelom. Južno krilo antiklinale je narinjeno na drežniški fliš.

O tektonskem položaju Polovnika sta razpravljala predvsem F. Kossmat (1913) in A. Winkler (1924). Po Winklerju naj bi tvoril Polovnik skupaj s Kaninom in krnsko-koblansko enoto prvotno sklenjen nariv, ki naj bi ležal v celoti na flišni podlagi. Za to naj bi govorili predvsem premiki ob mojstrovškem prelomu. V vsej dolžini od savske doline do Bavšice je ob tem prelomu dvignjeno jugovzhodno krilo in so zato na tej strani starejše kamenine v stiku z mlajšimi na nasprotni strani preloma. V bovškem kotlu pa je razmerje nasprotno, mlajši kredni fliš na jugovzhodni strani je v stiku s starejšim, dachsteinskim apnencem na nasprotni strani preloma. Najenostavnejšo razlago za takšen položaj je videl A. Winkler v predpostavki, da je tudi bovški fliš del podlage pod narinjeno ploščo dachsteinskega apnenca, ki je bila ob podaljšku mojstrovškega preloma dvignjena tako visoko, da je v današnjem Bovškem kotlu razgaljena. Po drugi strani pa govore opazovanja na Polovniku samem proti taki interpretaciji. Verjetnejša je razlaga, da je Polovnik samostojna paravtohtona enota, ki je bila stisnjena v ozko in visoko antiklinalo ter ob južni strani narinjena na drežniški fliš (tab. 3, sl. 1). Razlogi, ki vodijo do razlage, so naslednji:

1. Če bi bil Polovnik ločen del kaninskega nariva, bi težko razložili, zakaj ima drugačno, antiklinalno zgradbo kot območje pod Kaninom in Rombonom, kjer vpadajo skladi povsod proti jugu.

2. Na severni strani Polovnika vpada apnenec ob prelomu pod »scaglio«, ki je baza deformirane bovške flišne sinklinale. To je dokazano z vrtnami na zahodnem delu Polovnika, lepo pa se vidi tudi v srednjem in gornjem delu potoka Slatnek. Pojav, da se fliš ponekod neposredno stika z apnencem, je posledica prelomov.

3. Sedimentološke razlike med bovškim in kobariškim flišem kažejo na prag v zgornji kredi, ki je potekal prav na območju Polovnika. Ta prag si razlagamo kot zametek polovniške antiklinale. Polovnik imamo zato za avtohtono enoto, ki je bila kasneje stisnjena, na jugu pretrgana in delno narinjena na fliš.

f) Drežniški pas se razteza južno od Polovnika in ima v glavnem sinklinalno zgradbo. Os sinklinale poteka med Drežnico in Magozdom. Južno krilo je v normalnem položaju, severno pa v inverznem, kar vidimo pri Morizni in v grapah pod Polovnikom. Baza fliša je volčanski apnenec. Vzhodneje od Drežnice se sinklinala izgubi v nagubano flišno ozemlje.

Drežniška sinklinala in Kobariški Stol pripadata Julijski zunanji coni (A. Winkler, 1926).

g) Kobariški Stol tvori južni rob julijske zunanje cone. Ob kobariško-cerkljanskem prelomu je narinjen proti jugu na prednožje Julijskih Alp. Zahodni del Julijske zunanje cone je s prelomi in narivi močno razkosan.

h) Prednožje Julijskih Alp tvori območje neposredno južno od kobariško-cerkljanskega nariva. V okolici Kobarida so v tej enoti močno razširjene flišne

kamenine. Iz njih se dvigata antiklinali Matajurja in Kolovrata. Matajur je kupola z dachsteinskim apnencem v jedru ter z jurskim apnencem in zgornjekrednim flišem na obrobju. Na severni strani Matajurja poteka v dinarski smeri daljši prelom, ki pa strukture v grobem ne spremeni.

Faciesa triadnih in krednih plasti v prednožju Julijskih Alp in v Julijski zunanji coni sta si tako podobna, da se nam zdi vključevanje prednožja v eno, Julijske zunanje cone pa v drugo tektonsko enoto prvega reda, tj. v Alpe, oziroma v Dinarsko gorovje, neutemeljeno. Dejansko gre za geološko podobna območja s skoro enakim stratigrafskim zaporedjem plasti. Razlika je le v intenziteti tektonskih deformacij, ki postopno pojema od severovzhoda proti jugozahodu. Prelomi in narivi, vzdolž katerih povečini postavljajo meje med tektonskimi enotami, nimajo regionalnega pomena in se v razdalji nekaj deset kilometrov izgubijo. To seveda onemogoča dosledno razmejevanje tektonskih enot vzdolž ostro začrtanih mej.

Kvartarni dolinski zasip

Podobno kot druge alpske doline, ki so bile v pleistocenu pod ledom, je tudi soška dolina več ali manj na debelo zasuta s kvartarnimi sedimenti. Podrobneje je te sedimente raziskoval A. Winkler (1928, 1931). S. Ilešič (1951) je po obliki vzdolžnega profila soškega korita sklepal na dviganje okolice Žage. Tega pa vrtanje ni potrdilo. Na obliko vzdolžnega profila vpliva namreč še vrsta faktorjev, ki jih S. Ilešič ni upošteval.

Za projekt dolinske pregrade pod Bovcem je pomembna zlasti debelina in sestava kvartarnega zasipa, ki se vzdolž doline Soče močno menjava. Ob vstopu v bovški kotel je struga zarezana v dachsteinski apnenec in kredni fliš. Po približno 2 km se spusti flišna podlaga bovških teras pod gladino Soče. Fliš sega v podlagi kvartarnega zasipa še nekako do izliva Gljuna v Sočo, tj. okrog 2 km vzhodno od profila Suhi potok. Spodnji del bovškega kotla in sorazmerno široka dolina proti Žagi sta zarezana v dachsteinski apnenec med antiklinalo Polovnika in Kaninom. Po veliki širini kvartarnega zasipa v predvidenih pregradnih profilih je bilo že pred pričetkom vrtanja možno sklepati na znatno debelino kvartarja pod dnom Soče (tab. 2). Toda šele vrtnice so pokazale, da je tu debelina kvartarnega zasipa še mnogo večja, kot se je prvotno pričakovalo (tab. 3 sl. 2). Vrtina V-37 je dosegla dachsteinski apnenec šele v globini 280 m. Pri Srpenici pa je vrtina S-3 zadela na triadno podlago celo šele v globini 322 m. Podlaga kvartarja je tu na koti okrog 90 m, to je za 110 m globlje kot skalnata struga Soče 6 km niže pri Magozdu. Tako veliko poglobitev predkvartarnega dolinskega dna bi težko pripisali samo eroziji ledenika; verjetno je k temu prispevalo tudi tektonsko pogrezanje spodnjega dela bovškega kotla in okolice Žage. Tudi prod v najglobljih delih kvartarja, ki so niže kot skalnata struga pri Kobaridu, bi težko razložili drugače kot s pogrezanjem tega dela soške doline. Podobna mlada tektonska udorina je tudi dolina Soče med Tolminom in Kobaridom. Globina predkvartarne podlage tu še ni znana. Vrtine pri Zatoľminu, globoke do 60 m, niso prišle do podlage.

Pri obeh kotlinah gre za mladokvartarno tektoniko, saj niti v bovški niti v kobariško-tolminski kotlini ni moren na rečnih naplavinah. V bovški kotlini tudi v vrtinah ni moren, kar kaže, da so ti sedimenti postglacialni. Tudi jezerski

sedimenti pri Srpenici so postglacialni (A. Šercelj, 1970, 237). Starejše kvartarne sedimente dobimo ob robu tega postglacialnega zasipa neposredno na predkvartarni podlagi (A. Šercelj, 1970, 213). Na močno tektonsko aktivnost tega območja kažejo tudi potresi pri Tolminu.

Velike morene pa dobimo pri Magozdu ter med Trnovim in Srpenico. Kot so ugotovili že E. Brückner, A. Penck in A. Winkler, je segel soški ledenik v würmu do Mosta na Soči. Z otoplitvijo se je ledenik začel umikati. Med umikalnimi stadiji je prišlo do ponovnih sunkov, ki so zapustili morene v dolini Soče in na njenih pobočjih. Morene med Drežnico, Magozdom in Ravnami je odložil manjši stranski ledenik pod Krnom.

Zahodno od Magozda je bila soška dolina med Ognjenom (480 m) in Magozdom zasuta z morenskim in podornim materialom, debelim prek 250 m. Verjetno je nekdanje korito Soče na sektorju, kjer se pod Magozdom zajeda v flišno osnovo, potekalo nekoliko zahodnejše od tod. Po A. Winklerju in italijanski geološki karti gre tu le za podorni material, vrtanje pri Magozdu pa je pokazalo, da gre v glavnem za moreno. Za to moreno je bilo na območju Trnovega nekaj časa približno 2 km dolgo jezero, kot kažejo izdanki jezerske krede na levem pobočju Soče severno od Trnovega (A. Winkler, 1926).

Podoben zasip kot med Magozdom in Ognjenom opazujemo med Srpenico in vasjo Trnovo. Vzpetina Kuntri (530 m) in njen podaljšek na drugi strani Soče sestoji iz morenskega in podornega materiala. Za to pregrado je bilo večje jezero, ki je segalo prek Žage nekako do Čezsoče. Morene so ohranjene še na desni in levi strani Učje. Nakopičil jih je delno soški ledenik, delno pa ledenik, ki je prihajal po dolini Učje. Tu je bilo manjše zaježitveno jezero, katerega sedimente opazujemo na kraju, kjer nariv Žage prečka Učjo.

Severno in severozahodno od Bovca so številni ostanki robnih moren pomešani z gruščem. Morene so še med vasjo Koritnica in Kalom ter južneje nekoliko nad izlivom Koritnice v Sočo.

Na dnu Bovškega kotla pa imajo morene le majhen obseg. Dobimo jih predvsem v njegovem zgornjem delu, kjer leže morene pod prodom bovške terase neposredno na flišni podlagi. V spodnjem delu bovškega kotla morene niso bile zanesljivo najdene. Možno je, da je del grobozrnatih sedimentov, ki so bili navrtani v profilih Boka in Suhi potok, morena, vendar so preizkusi prepustnosti dali skoro povsod visoke vrednosti, kakršnih talne morene povečini nimajo.

V raziskanih profilih sestoji dolinski zasip iz treh delov (tab. 4 in 5):

1. zgornji prepustni del, sestavljen iz postglacialnega proda in grušča,
2. srednji, vododržni del sestavljen v glavnem iz jezerske krede,
3. spodnji prepustni del, v najglobljih delih zasute soške doline.

Spodnji prepustni del je v glavnem iz proda in grušča. To vsekakor govori za tektonsko pogrezanje območja, ker leže ti sedimenti dobrih sto metrov globlje kot skalnata struga Soče pri Magozdu. Debelina teh spodnjih prepustnih naplavin je delno zelo velika (prek 100 m). Ta del zasipa je zato zelo pomemben vodonosnik.

Srednji del zasipa je iz jezerske krede. Ta je sivkasto rumena, školjkastega loma in z jasno izraženo paralelno pasovitostjo (sl. 29), ki je posledica menjavanja svetlejših in temnejših plasti. Podobno kot pri sedimentih drugih ledeniških jezer, je to menjavanje tudi tu posledica menjave toplega in hladnega vremena. Debelozrnati svetlejši pas se je usedal poleti, drobnozrnati temnejši

pa pozimi. Svetli pasovi so vedno debelejši od temnejših. Jezerska kreda je v glavnem melj, v katerem prevladujeta apnenec in dolomit. Flišne komponente je sorazmerno malo, ker je fliš manj razširjen.

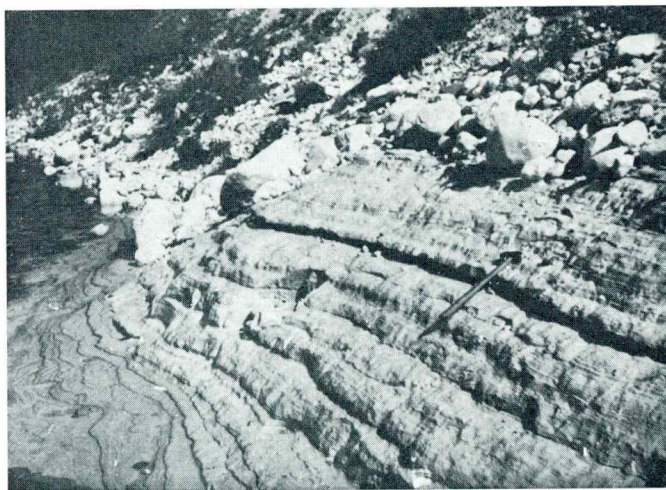
Kemična sestava vzorca krede iz Srpenice je naslednja:

vлага	0,30 ‰
SiO ₂	8,45 ‰
Fe ₂ O ₃	1,18 ‰
Al ₂ O ₃	2,63 ‰
CaCO ₃	71,15 ‰
MgCO ₃	14,29 ‰
nedoločeno	2,00 ‰

Petrografska analiza netopnega ostanka je pokazala, da sestoji iz kremena, sljude (muskovita) in limonita.

Debelina jezerske krede se zelo spreminja. V sredini soške doline v profilu Suhi potok doseže skoro 200 m (tab. 4), proti robom doline postaja tanjša, vendar se na večini preiskanih mest neposredno stika s triadno podlago. V bližini triadne podlage vsebuje jezerska kreda skoro povsod večje število drobcev triadnega apnenca. To so drobcji gruščja s pobočij, ki so padali v jezero in se pri-mešali kredi. Skoro povsod je prepustnost tega gruščnatega sedimenta zaradi velike množine krede minimalna.

Ponekod se plast jezerske krede izklini še predno doseže triadno podlago. Očividno je to posledica stranskih dotokov, ki so razgibali vodo jezera tako močno, da se drobnozrnata kreda ni mogla usedati. Na teh krajih leži med jezersko kredo in triadno podlago povsod več ali manj prepustna plast peska in gruščja. Jezerska kreda manjka pri vstopu Boke v dno soške doline (tab. 5) in



Sl. 29. Kvartarna jezerska kreda. Potok Gljun
Fig. 29. Quaternary lacustrine silt and clay. Gljun Brook

verjetno tudi pod izlivom Učje. Tudi vrtine pri Srpenici so pokazale, da je na desni strani doline med jezersko kredo in triadno podlago debela plast prepustnega peska in grušča.

Te prekinitve neposrednega stika med jezersko kredo in podlago so bile odločilne pri izbiranju profila za pregrado. Pri končni izbiri med obema možnima profiloma »Boka« in »Suhi potok« je bil ocenjen profil Suhi potok kot ugodnejši, ker bi gradnja v sicer topografsko ugodnejšem profilu »Boka« zahtevala obsežna dodatna tesnilna dela v kvartarnih naplavinah na desni strani pregrade, kjer manjka kreda.

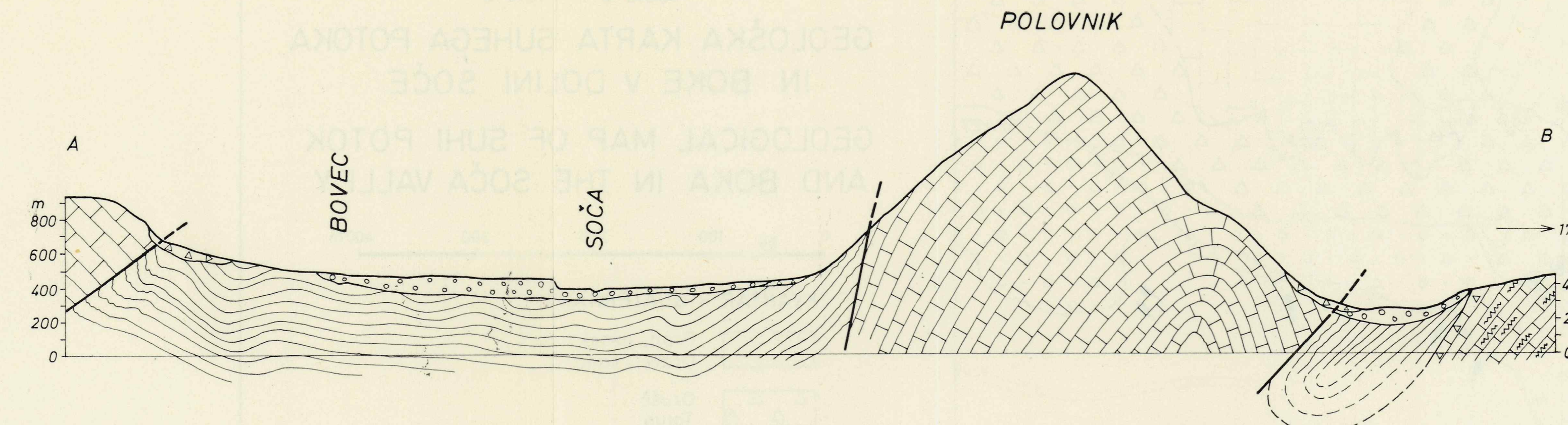
Zgornji prepustni del zasipa ni enoten, ker je Soča s pritoki prvotni zasip erodirala in nasula mlajše naplavine. Prvotni zasip nad jezersko kredo tvori danes bovško teraso in majhno teraso pri izlivu Boke. V teh terasah postaja jezerska kreda više vedno bolj peščena. Ponekod so do 50 cm debele plasti čistega drobnega peska. V spodnjem delu bovške terase so vidne deltaste plasti proda. To so zadnje jezerske plasti bovškega kotla. V vzhodnem delu bovške terase poševnih prodnih plasti ni več videti. Takšnega obsega, kot ga kaže italijanska geološka karta tega območja, jezerske usedline brez dvoma nimajo.

Na ježah teras sega jezerska kreda povečini še 20 do 30 m nad današnjo strugo Soče, to je približno do kote 360 m. Prvotna jezerska gladina je bila še nekoliko višja. To kažejo poševne plasti prodne delte v ježi bovške terase nasproti Čezsoče.

Marsikje je bil zgornji del jezerske krede v mlajšem kvartarju odnesen in teren nasut z mlajšimi rečnimi naplavinami ali gruščem. Jezerska kreda je zato kljub sorazmerno veliki razširjenosti le malokje vidna. Najlepše je vidna v površinskem kopu v Srpenici. Tu so plasti v spodnjem delu kopa popolnoma



Sl. 30. Nagubana jezerska kreda. Odkop krede pri Srpenici
Fig. 30. Folded lacustrine silt and clay. Open pit at Srpenica



Sl. 1 GEOLOŠKI PROFIL BOVEC-TRNOVO
Fig. 1 GEOLOGIC SECTION BOVEC-TRNOVO

KVARTAR - QUATERNARY

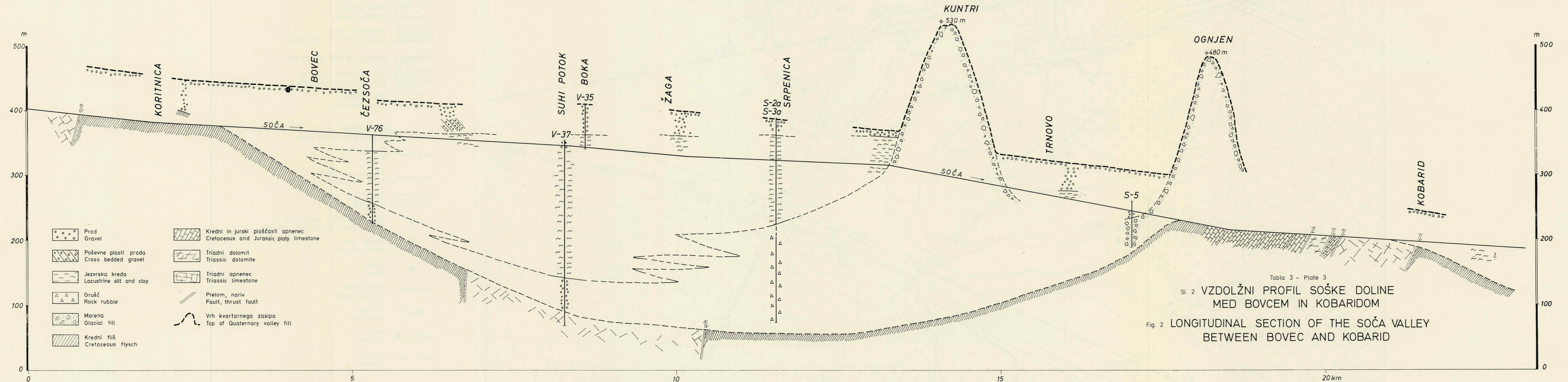
- Melišče in podorina
Rock rubble and rockfall
- Samice, prod in pesek
Boulders, gravel and sand

ZGORNJA KREDA - UPPER CRETACEOUS

- Fliš
Flysch
- Brečasti apnenec
Brecciated limestone
- Tanko plastoviti volčanski apnenec z rožencem
Thin bedded Volče limestone with chert

ZGORNJA TRIADA - UPPER TRIASSIC

- Skladoviti dachsteinski apnenec
Thick bedded Dachstein limestone
- Prelom, reverzni prelom, nariv
Fault, reverse fault, thrust fault



Sl. 2 VZDOLŽNI PROFIL SOŠKE DOLINE
MED BOVCEM IN KOBARIDOM
Fig. 2 LONGITUDINAL SECTION OF THE SOČA VALLEY
BETWEEN BOVEC AND KOBARID

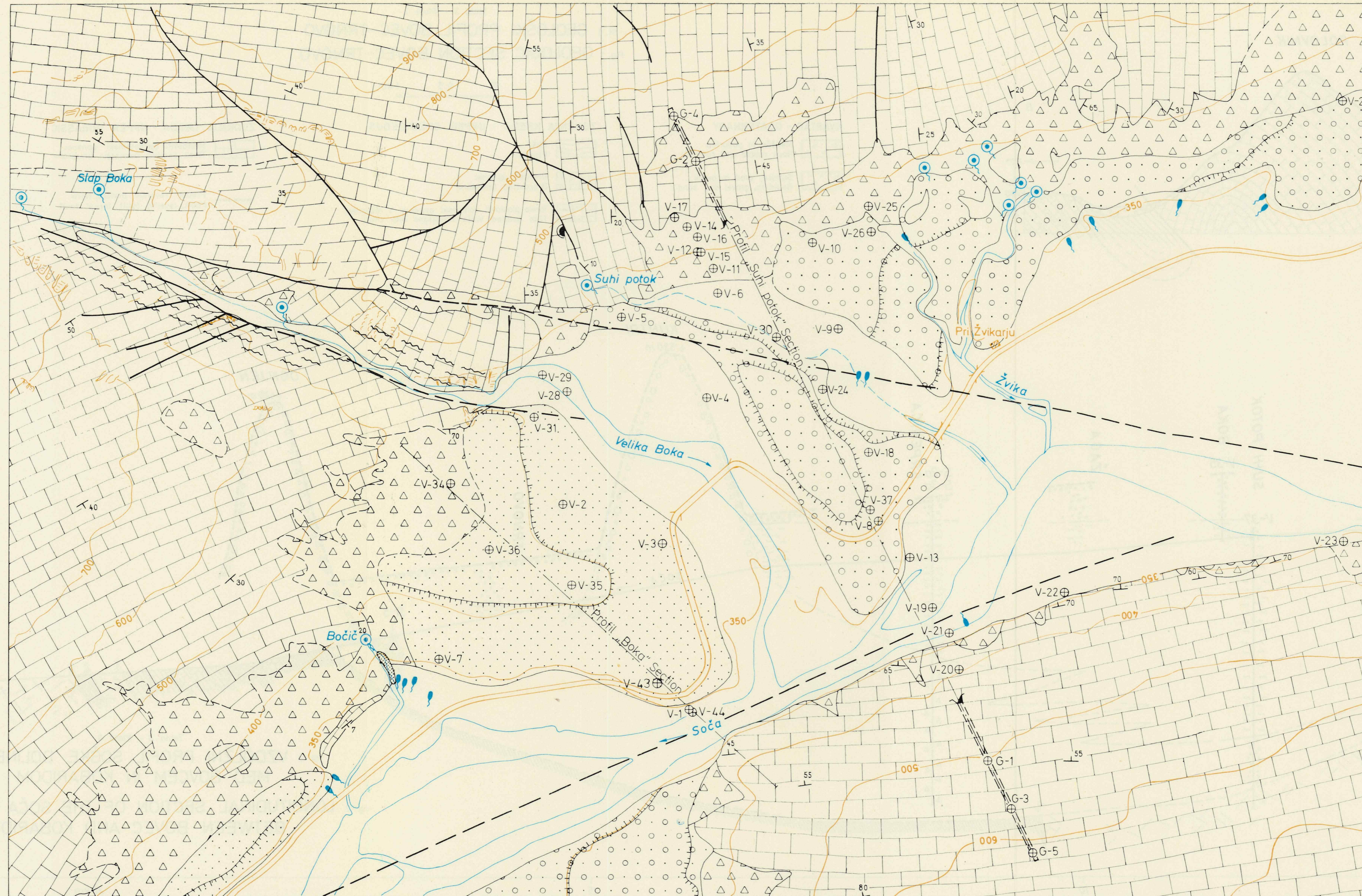


Tabla 2 - Plate 2
GEOLOŠKA KARTA SUHEGA POTOKA
IN BOKE V DOLINI SOČE
GEOLOGICAL MAP OF SUHI POTOK
AND BOKA IN THE SOČA VALLEY

0 50 100 200 300 400 m

KVARTAR - QUATERNARY

- Prod, pesek
Gravel, sand
- Grušč
Talus
- Nižja terasa
Lower terrace
- Višja terasa
Higher terrace
- Jezerska kreda
Lacustrine silt and clay

ZGORNJA TRIADA - UPPER TRIASSIC

- Siv skladovit apnenec
Grey bedded limestone
- Siv dolomit
Grey dolomite

- Vpad plasti
Strike and dip of beds
- Prelom
Fault
- Prelom, domneven
Fault, supposed
- Zdrobljena cona
Crushed zone
- Izvir kvartarnih vodonosnikov
Spring from Quaternary aquifers
- Kraški izvir
Karst spring
- Jama
Cave
- Rob terase
Terrace edge
- Vrtina
Borehole
- Rov
Gallery
- Profil
Section

vodoravne, nad njimi pa slede nagubane plasti (sl. 30). Drugod so zgornje plasti vodoravne in nižje plasti nagubane. Tako so v vrtini V-8 našli pod zgornjimi, vodoravnimi plastmi poševne plasti, katerih naklonski kot postaja proti globini čedalje večji. Ker nad kredo ni nikjer moren, je nagubanost krede lahko le posledica plazenja še svežega sedimenta po dnu jezera.

Hidrogeološka opazovanja na območju pregradnih profilov

Na območju projektirane pregrade so štirje močno prepustni vodonosniki, dva v kvartarnih naplavinah, ki sta ločena s plastjo jezerske krede, in dva v zakraseli podlagi iz dachsteinskega apnenca, po eden na vsaki strani soške doline. Režim vode v krasu obeh bokov se precej razlikuje. To je posledica razlike v velikosti in višini kraškega zaledja. Medtem ko je na desni strani Kanin z višinami nad 2500 m in s širokimi Kaninskimi podi (okrog 25 km²), je na levi strani greben Polovnika širok le okrog 2 km in visok največ 1700 m. Dotok je zato z desne strani močnejši in je ob kopnenju snega močen še v zgodnjem poletju, ko vode s strani Polovnika že usihajo.

V bližini predvidenega pregradnega profila je na desni strani vrsta močnih izvirov. Okrog 2 km nad predvideno pregrado je na stiku fliša z apnencem močan izvir Gljuna okrog 90 m nad dnom doline. Okrog 1 km nad pregrado je več izvirov Žvike. Stalni so tik ob robu kvartarnega dolinskega zasipa, ob močnem deževju pa delujejo še dodatni presihajoči izviri okrog 30 m nad dolinskim dnom. Tik ob desnem boku profila Suhi potok je presihajoči izvir z istim imenom. Po močnejšem deževju in spomladanski odjugi daje več m³/sek. Visoko na pobočju Kanina izvira nad ozko stransko grapo Boka in pada v slapu 80 m globoko. Izvir leži v višini 730 m, tj. 385 m nad dnom soške doline. Je sicer stalen, vendar njegova izdatnost močno niha. Ob suši znaša le okrog 0,2 m³/sek, ob deževju pa okrog 100 m³/sek. 1 km pod profilom Suhi potok izvira Bočič tik ob desni strani dolinskega dna. Ta izvir je precej stalen in napaja vodovod za Žago. Okrog 100 m vzhodno od Bočiča je precej močen izvir v kvartarnih naplavinah, za katerega bi zaradi majhne razdalje od Bočiča lahko domnevali, da gre za zasut kraški izvir. Količina vode v njem pa je bolj stalna kot v Bočiču, poleg tega pa je tudi njegova temperatura za okrog 1 °C višja. Zato domnevamo, da gre za naraven arteški izvir podtalnice iz prodnih naplavin pod kredo. Apnenec v desnem boku doline ni globoko zakrasel; vrtine so pokazale močnejšo prepustnost le do globine 40 do 70 m.

Na levi strani doline pod Polovnikom v okolici predvidenega profila ni močnejših izvirov, kar je zaradi majhne širine Polovnika razumljivo. Poleg tega sega fliš na severni strani Polovnika više na pobočje kot na južni in zato skoro vsa voda odtoka proti jugu, kjer je nasproti vasi Trnovo močan izvir. Ta leži sicer v grušču, vendar gre očitno za zasut kraški izvir, ki odvaja vodo Polovnika. Na severni strani Polovnika je le majhen izvir okrog 1,5 km nad profilom Suhi potok tik ob zahodnem koncu flišnega pasu.

Položaj gladine podtalnice v krasu je bil raziskan v obeh bokih s piezometri, ki so bili zvrtni iz rogov 2 m nad predvideno koto zaježitve. Rov v desnem boku je bil 180 m dolg in je bil opremljen z dvema piezometroma. Rov v levem boku je bil dolg 250 m in je bil opremljen s tremi piezometri (tab. 4). Ob visokih vodah se gladina podtalnice zelo hitro dviga proti notranjosti

hriba in doseže v oddaljenosti 60 do 70 m od vhoda nivo rova. Iz desnega rova teče takrat nad 1 m^3 vode v sekundi, iz levega pa manj. V sušnem času gladina podtalnice močno pade in je še okrog 20 m pod koncem desnega rova. Na levi strani je gladina še nižja; ob nizki vodi je 55 m pod koncem rova. To je razumljivo, ker je napajanje podtalnice v ozkem grebenu Polovnika mnogo slabše in poleg tega zaradi majhne širine tega grebena voda sorazmerno hitro odteče.

V okolici predvidene pregrade sta v kvartarnih naplavinah soške doline dva horizonta podtalnice, ki ju loči jezerska kreda. Le pri vstopu Boke v dolinsko dno in verjetno tudi ob izlivu Učje je ta plast krede prekinjena, tako da lahko spodnja in zgornja podtalnica kvartarnih naplavin komunicirata po prepustnih kameninah nad triadno podlago.

V prepustnih naplavinah nad jezersko kreda je le nezaten horizont podtalnice. Kontakt med jezersko kreda in krovninskimi prodnimi plastmi je zaradi delne erozije v različni višini. Zato podtalnica v zgornjemrodu ne tvori enotnega horizonta.

V vsakem primeru bi bilo treba pri gradnji projektirane pregrade zgraditi neprepustno jedro skozi površinske prepustne naplavine do jezerske krede. Zato prepustnosti tega proda nismo podrobno raziskali. Vsekakor pa lahko računamo na zelo spremenljivo prepustnost, saj imamo v tem, zgornjem horizontu zelo različne hribine, od pobočnega grušča in hudourniškega proda do sorazmerno drobnega proda soških teras.

Gladina podtalnice v zgornjem horizontu je bila opazovana v petih piezometrih. Vrtina V-8 je bila opremljena kot dvojen piezometer za opazovanje gladine spodnje in zgornje podtalnice. V vseh teh piezometrih niha gladina vzporedno s padavinami in z gladino Soče. Najmanjša so nihanja v bližini Soče. V piezometrih ob strugi Boke in Suhega potoka je gladina zgornje podtalnice nižja kot dno sosednje struge. Zgornja podtalnica se tu torej napaja iz površinskih vodnih tokov. Zato je tudi razumljivo močno nihanje gladine zgornje podtalnice, ki znaša v piezometru V-4 do 8,5 m, kar je za odprt horizont precej. Ob nizkih vodah se zato tudi voda Boke kmalu po vstopu v naplavine izgubi vrodu. Barvanje s 5 kg uranina ni dalo nobenih rezultatov. Barvilo se je verjetno delno absorbiralo v kredi, delno pa se je razpršilo po veliki površini in tako razredčilo, da ga ni bilo mogoče zaznati. Verjetno izvira večji del zgornje podtalnice tik ob bregu Soče in pod gladino Soče, tako da tega ne moremo opazovati.

Horizont podtalnice v spodnjemrodu je neprimerno močnejši, ker je debelina tega proda okrog 100 m. Podtalnica je zaprta in sega povsod do neprepustnega krova, ki ga tvori plast krede. V profilu Suhi potok je število vrtin dovolj veliko, da lahko ocenimo površino prečnega preseka prepustnega proda na okrog $27\,000 \text{ m}^2$. Horizont podtalnice v temrodu nima neposredne zveze z zgornjim horizontom vrodu, razen na desni strani profila Boka.

Za oceno izgub iz akumulacijskega bazena je bilo treba določiti prepustnost spodnjega proda. Zaradi velike globine bi bilo vrtanje piezometričnih vrtin ob črpalnih vrtinah izredno drag postopek. Poleg tega bi bila zaradi precej velikih možnih odklonov njihova razdalja od črpalnih vrtin v globini neznana in rezultati črpalnih ali nalivalnih poskusov nezanesljivi. Zato smo se pri določevanju prepustnosti morali omejiti na črpanje in meritev piezometričnih gladin v vrtini sami. Poprečna vrednost 13 takih meritev je dala prepustnost $k = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$.

Podtalnica v spodnjemrodu se napaja v glavnem iz apnenca. To dokazuje piezometrična gladina podtalnice, ki se brez preskoka nadaljuje iz apnenca v prod (tab. 4). Ob nizki vodi je gladina v apnencu le malo bolj nagnjena kot v produ. Ob visoki vodi pa se v apnencu dvigne mnogo močnejše kot v produ. Pri tem pa moramo upoštevati, da pri visoki vodi delujejo močni kraški izviri v neposredni bližini profila (Suhi potok in zgornji izviri Žvike) in da verjetno le sorazmerno majhen del vode iz apnenca napaja spodnji prodni horizont. Tok vode v apnencu je torej mnogo močnejši kot v produ. Piezometrična gladina niha v spodnjemrodu sicer znatno manj kot v apnencu, vendar še vedno precej močno (do 15 m) in hitro ter istočasno kot v apnencu. V okolici vrtin V-8 in V-37 se nivo celo dvigne več metrov nad površje. Vrtina V-8 zato še danes deluje v takem času kot arteški izvir. V določenih obdobjih, predvsem v zgodnjem poletju, se vrtina V-8 spremeni v periodični izvir, ki začne delovati okrog 10. do 11. ure dopoldne in pozno popoldne spet presahne. Zelo verjetno je to posledica kopnenja snega na Kaninu in hitrega dotoka vode po kraških kanalih do dna doline. Ker voda v apnencu neposredno komunicira z vodo v spodnjemrodu in ker je ta horizont brez proste gladine, zelo hitro sledi nihanju pritiska vode v apnencu. Dvig gladine traja torej le toliko časa, kolikor traja dotok zaradi kopnenja snega v toplem dnevnem času.

Piezometrična gladina pada proti Soči. To kaže, da se voda spodnjega horizonta izliva v Sočo, vendar še ni zanesljivo dokazano, kje izvira. Možno je, da izvira voda vsaj delno iz apnenca na levem bregu Soče ali pod strugo Soče, kjer se ta neposredno približa apnencu. Verjetno je pa tudi izvir pod teraso vzhodno od Bočiča naraven arteški izvir spodnjega produ.

Ocena vodnih izgub iz akumulacijskega bazena

Geološke razmere v profilu projektirane pregrade HE Trnovo bi dovoljevale samo gradnjo nasute pregrade. Njena tesnilna obloga ali tesnilno jedro bi moralo biti vododržno vpeto v plast jezerske krede. V tem primeru bi bile izgube vode še vedno možne skozi zakraseli apnenec okrog bokov pregrade in skozi apnenec na obeh straneh akumulacijskega bazena v globino do produ pod plastjo krede in po prodnem zasipu v vzdolžni smeri na spodnjo stran pregrade. Ta voda bi lahko povzročala močen vzgon na spodnji strani krede in bi s tem ogrožala tudi pregrado.

Prepustnost apnenca bi zahtevala injekcijska dela, ki bi zagotovila ustrezno vododržnost bazena. Poleg izgub vode skozi apnenec okrog bokov pregrade bi morali preprečiti tudi pretakanje vode skozi spodnji prod. Globina tega produ je zelo velika (do 300 m), zato ne moremo računati z normalno injekcijsko zaveso, ker bi bilo pri taki globini injiciranje v produ zelo težko. Izgube skozi apnenec in spodnji prod bi lahko zmanjšali tudi z vzdolžno injekcijsko zaveso nad pregrado ob stiku med kredno plastjo in apnencem. Pri dovolj veliki dolžini te vzdolžne zavesa bi se izgube znižale na znosno količino.

Ocena izgub vode iz akumulacijskega bazena brez vzdolžnih injekcijskih zaves

Zaradi majhne globine zakraselosti (50 do 70 m) računamo, da bi s sorazmerno kratko prečno injekcijsko zaveso v bokih lahko preprečili odtekanje

vode okrog bokov pregrade. Pretakanje vode skozi apnenec navzdol v spodnji prod smo skušali oceniti na poenostavljenem modelu. Model je naslednji (sl. 31a in b). Pobočja doline s pravilnim profilom so iz apnenca, ki je do globine okrog 100 m enakomerno zakrasel. Dno doline je globoko zasuto. V zgornjem delu sestoji zasip iz enakomerno debele plasti neprepustne gline, ki se tesno prilega apnencu, pod to plastjo pa je prepusten prod. V vzdolžni smeri je profil povsod enak. To dolino zapremo s pregrado in obenem poskrbimo z drenažnimi vodnjaki za nemoten odtok vode iz spodnjega proda tik pod pregrado. Piezometrična gladina v spodnjem produktu se bo pod pregrado ujemala z dnom doline, pod akumulacijskim bazenom se bo pa postopno dvigala in se asimptotično bližala gladini akumulacijskega jezera. Tok podtalne vode bo v večji oddaljenosti od pregrade sorazmerno majhen. V smeri toka se bo pa ojačeval z dodatno vodo, ki bo povsod pronicala skozi zakraseli apnenec iz bazena v spodnji prod. Najmočnejši bo pretok tik pod pregrado.

V naslednjem pomeni:

x oddaljenost od pregrade

Q pretok v poljubni oddaljenosti od pregrade

Q_0 pretok pod pregrado

H piezometrično višino podtalnice v spodnjem produktu v poljubni oddaljenosti od pregrade, merjeno od vzhodja pregrade

H_0 višino vodne gladine v akumulacijskem bazenu (obenem piezometrični nivo podtalnice v zelo veliki oddaljenosti od pregrade)

i hidravlični gradient

A površino profila spodnjega proda

k prepustnost spodnjega proda

v filtrsko hitrost podtalnice v spodnjem produktu

c pretočnost apnenih bokov pregrade, odvisno od prepustnosti, globine zakraselosti in dolžine poti okrog roba kredne plasti, definirane z enačbo (2).

Izgube vode iz akumulacijskega bazena označujemo kot negativne. Celotni pretok vzdolž spodnjega prepustnega dela prodnega zasipa je tedaj:

$$-Q = A k \frac{dH}{dx}$$

Hidravlični gradient v tem produktu je torej

$$i = \frac{dH}{dx} = - \frac{Q}{A k} \quad (1)$$

Predpostavljamo, da je pretakanje vode v apnencu laminarno in linearno odvisno od razlike ($H_0 - H$). Na dolžini dx bo na obeh straneh dotekala množina vode dQ

$$dQ = c (H_0 - H) dx \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dx} = c (H_0 - H) \quad (2')$$

Če to enačbo odvajamo po x in vstavimo za $\frac{dH}{dx}$ vrednost iz (1), dobimo

$$\frac{d^2Q}{dx^2} = \frac{c}{A k} Q. \quad (3)$$

Ob pogoju, da je pri $x = 0$ pretok $Q = Q_0$, je rešitev te enačbe

$$Q = Q_0 \exp \left(- \sqrt{\frac{c}{A k}} x \right). \quad (4)$$

Ustrezno enačbo za H dobimo, če odvajamo (1) po x in vstavimo za $\frac{dQ}{dx}$ vrednost iz (2')

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = - \frac{c}{A k} (H_0 - H)$$

Rešitev te enačbe je pri pogoju, da je pri $x = 0$ $H = 0$

$$H = H_0 \left[1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{c}{A k}} x \right) \right] \quad (5)$$

Iz tega dobimo:

$$\frac{dH}{dx} = H_0 \sqrt{\frac{c}{A k}} \cdot \exp \left(- \sqrt{\frac{c}{A k}} x \right)$$

Če primerjamo pri $x = 0$ vrednost te enačbe z enačbo (1), dobimo

$$\sqrt{\frac{c}{k A}} H_0 = - \frac{Q_0}{A k}$$

in končno za pretok pod pregrado tik ob izvirih

$$Q_0 = - H_0 \sqrt{A k c} \quad (6)$$

V tej enačbi so dovolj dobro znani H_0 , A in k

$$H_0 = 80 \text{ m}$$

$$k = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$$

$$A = 27\,000 \text{ m}^2$$

Treba je dobiti le še približno oceno koeficienta c , tj. pretočnosti skale. Predpostavljamo, da je skala enakomerno razpokana do globine okrog 100 m. Prepustnost te skale smo izračunali iz preskusov vrtin z vodo pod pritiskom (VDP). Poprečne prepustnosti (k_1) iz velikega števila poskusov je $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/sek}$. Razen v neposredni bližini pregrade bo pretok več ali manj vzporeden z ravnino profila. Če je poprečna razdalja med točko, kjer voda ponira v akumulacijskem bazenu v skalo, in točko, kjer se izliva v spodnji prod l , in če je globina zakraselega apnenca D , potem je pretok skozi skalo na obeh straneh bazena v lameli debeli dx

$$dQ = 2 k_1 \frac{D \cdot dx}{l} (H_0 - H) \quad (7)$$

Če predpostavljamo poprečno vrednost za globino zakraselosti $D = 100 \text{ m}$ in za $l = 100 \text{ m}$, dobimo po primerjavi enačb (2') in (7) $c = 2 k_1$.

Če vstavimo to vrednost v enačbo (6), dobimo za

$$Q_0 = - 0,252 \text{ m}^3/\text{sek}.$$

Izgube skozi drobno razpokano skalo, v kakršni je bilo mogoče normalno meriti prepustnost, torej ne bi bile nevarne.

Kraški izviri na desni strani pregradnega profila pa kažejo, da se voda pretaka tudi skozi večje kanale. Tudi z vrtinami smo našli do 0,3 m velike kaverne v zgornjem delu apnenca.

V nadaljnjem bomo poskusili oceniti pretok iz akumulacijskega bazena skozi kraške kanale v spodnji prod ob zelo poenostavljenih razmerah. Predpostavljamo, da je v skali sistem enako širokih cevastih kanalov, ki segajo iz akumulacijskega bazena do spodnjega proda. Ti kanali naj bodo tako široki, da lahko trenje v njih zanemarimo. Iz ustja kanala v spodnji prod odteka voda radialno. Za tak pretok velja Dupuitova enačba, po kateri je

$$q = (H_0 - H) 2\pi k r_0 \quad (8)$$

Tu pomeni

q pretok iz kanala

r_0 polmer tega kanala

Pri kanalu z $r_0 = 0,1$ m dobimo pretok $q = 6$ l/sek, tj. poprečno hitrost pretoka v kanalu $v = 0,19$ m/sek. Pri taki hitrosti so tlačne izgube v 100 m dolgem kanalu tako majhne (0,052 m), da jih lahko zanemarimo (primerjaj npr. B. J. Vozdviženskij, 1946). Pri $r_0 = 1$ cm pa bi znašale tlačne izgube že 30 m in jih ne bi smeli več zanemariti. Zato za tako ozke kanale naslednji račun ne velja več.

Predpostavljamo, da je kavernočnost apnenca enaka p in je vsa vezana na enako široke okrogle kanale. Na stični ploskvi med apnencem in prodom s površino P je vsota prečnih presekov vseh kanalov enaka pP . Če je premer vseh kanalov, ki sekajo to ploskev, enak r_0 in je njihovo število N , je

$$N \pi r_0^2 = pP$$

Število kanalov je torej

$$N = \frac{pP}{\pi r_0^2} \quad (9)$$

Nadalje predpostavljamo, da je razdalja med kanali tako velika, da lahko medsebojni vpliv pretokov v prodju pred ustjem kanalov zanemarimo. Pretok skozi sistem kanalov bomo zaradi tega računali enostavno kot vsoto pretokov posameznih kanalov pri čistem radialnem pretoku. Za en kanal velja enačba (8).

Pretok skozi vseh N kanalov, ki sečejo ploskev P , je torej

$$Q' = Nq = N 2\pi k r_0 (H_0 - H)$$

Če vstavimo N iz (9) dobimo

$$Q' = 2k (H_0 - H) \frac{pP}{r_0} \quad (10)$$

Izgube so torej pri skalah z enako kavernočnostjo tem večje, čim ožji so kanali. To velja seveda le tako dolgo, dokler lahko zanemarimo trenje v kanalih.

Del vode — dQ , ki se izgublja na odseku akumulacijskega bazena, dolgem dx , se preceja skozi kontaktno ploskev med prodom in apnencem in spodnjim prodom s površino $P = S dx$, kjer pomeni S dolžino prepustnega kontakta med apnencem in prodom v prečnem profilu. Če nadomestimo v enačbi Q' z dQ in P s $S dx$, dobimo

$$dQ = 2k (H - H_0) \frac{p S dx}{r_0} \quad (10')$$

Če primerjamo to enačbo z enačbo (2), vidimo, da je

$$c = 2 k p S \frac{1}{r_0}$$

Po podatkih vrtin ne moremo oceniti števila in širine kanalov dovolj točno. Za poskusni račun predpostavimo naslednje vrednosti

$$p = 1 \text{ ‰}, r_0 = 0,1 \text{ m}, S = 100 \text{ m in } k = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$$

in dobimo vrednost

$$c = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/sek}$$

Če vstavimo to vrednost v enačbo (7) z $A = 27 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ in $H_0 = 80 \text{ m}$, dobimo za

$$Q_0 = -7 \text{ m}^3/\text{sek}$$

Kavernoznost 1 ‰, ki smo jo predpostavljali za skalo, je verjetno cenjena pesimistično. Ker pa je pretočnost v enačbi (7) pod kvadratnim korenem, padajo izgube le sorazmerno počasi z zmanjševanjem pretočnosti skale. Če predpostavljamo namesto kavernoznosti $p = 1 \text{ ‰}$ le $p = 0,1 \text{ ‰}$, kar je verjetno preoptimistično, dobimo za $c = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$, za izgube pa

$$Q_0 = -2,2 \text{ m}^3/\text{sek}$$

Izgube, ki jih lahko pričakujemo, skozi skalo in spodnji prod, so torej tolikšne, da bi pri realizaciji projekta morali znižati pretok vode v tej smeri.

V nadaljnjem računajmo z vrednostmi: za pretočnost skale $c = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$, za $A = 27 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ in za $k = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$.

Vrednost korena v enačbah (4) in (5) je

$$\sqrt{\frac{c}{A k}} = 0,0272 \text{ m}^{-1}$$

S tem koeficientom se glasita obe enačbi (4) in (5)

$$Q = Q_0 e^{-0,0272 x} \quad (4a)$$

$$H = H_0 (1 - e^{-0,0272 x}) \quad (5a)$$

Večji del vode se izgubi torej v bližini pregrade. Iz enačbe (4a) lahko izračunamo, kolikšen je odsek akumulacijskega bazena, na katerem se izgublja devet desetlin vode iz bazena. Izračunati moramo torej, v kateri oddaljenosti je pretok

$Q = \frac{Q_0}{10}$. To vrednost vstavimo v enačbo (4a) in dobimo

$$\frac{Q_0}{10} = Q_0 e^{-0,0272 x}$$

$$x = \frac{\ln 10}{0,0272} = 85 \text{ m}$$

Devet desetlin vse vode bi se torej izgubilo v 85 m dolgem odseku akumulacijskega bazena nad pregrado, če bi bila skala enakomerno prepustna.

Ocena izgub vode iz akumulacijskega bazena z vzdolžnima injekcijskima zavesama

Pretakanje vode iz bazena skozi skalo v spodnji prod bi lahko zmanjšali z injekcijsko zaveso. Zaradi velike globine spodnjega proda bi bilo injiciranje

tega proda s prečno injekcijsko zaveso izredno težko in uspeh dvomljiv. Izgube bi pa lahko zmanjšali z vzdolžnima injekcijskima zavesama v skali ob obeh robovih doline ob kontaktu med jezersko kredo in skalo, ki bi segali do dna zakrasele skale (sl. 31c in d). Ne smemo pa misliti, da bi lahko ob pogojih, kot smo jih prej predpostavljali, izgube zmanjšali na $1/10$ že s 85 m dolgo injekcijsko zaveso. Če bi injicirali skalo v bližini pregrade, bi padel piezometrični nivo v spodnjemrodu v večji oddaljenosti od pregrade in bi se izgube tam povečale.

V računu pomeni:

L dolžino injekcijske zaveses

Q_L pretok v spodnjemrodu med pregrado in koncem injekcijske zaveses

Q pretok v spodnjemrodu na območju, kjer ni injekcijske zaveses

H_L piezometrično višino na koncu injekcijske zaveses

H'_0 razliko piezometričnih višin ob koncu injekcijske zaveses in gladino akumulacijskega bazena ($H'_0 = H_0 - H_L$)

Vse piezometrične višine merimo od dna doline.

Do razdalje L od pregradnega profila je pretok Q_L konstanten, ker injekcijska zavesa ne dovoljuje nobenega dotoka iz bazena

$$\begin{aligned} -Q_L &= A k \frac{H_L}{L} \\ H_L &= -\frac{Q_L L}{A k} \end{aligned} \quad (11)$$

Od konca injekcijske zaveses naprej pa vladajo podobne razmere kot v primeru brez injekcijske zaveses le da moramo zamenjati H_0 z H'_0 , Q_0 z Q_L in x z $(x - L)$.

Za H'_0 in Q_L velja torej enačba, ki je analogna enačbi (6) za H_0 in Q :

$$\begin{aligned} -Q_L &= H'_0 \sqrt{A k c} = (H_0 - H_L) \sqrt{A k c} \\ -Q_L &= H_0 \sqrt{A k c} - H_L \sqrt{A k c} \end{aligned} \quad (6a)$$

Prvi sumand na desni strani enačbe je po enačbi (6) enak $-Q_0$, v drugega vstavimo za H_L vrednost iz (11) pa dobimo po ustrezni preureditvi

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + L \sqrt{\frac{c}{A k}}} \quad (12)$$

Pretok pri injekcijski zavesi dolžine L je torej za faktor $\frac{1}{1 + L \sqrt{\frac{A k}{c}}}$

manjši kot pretok brez injekcijske zaveses.

Če iz zgornje enačbe izračunamo L , dobimo

$$L = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_L \sqrt{\frac{c}{A k}}} \quad (13)$$

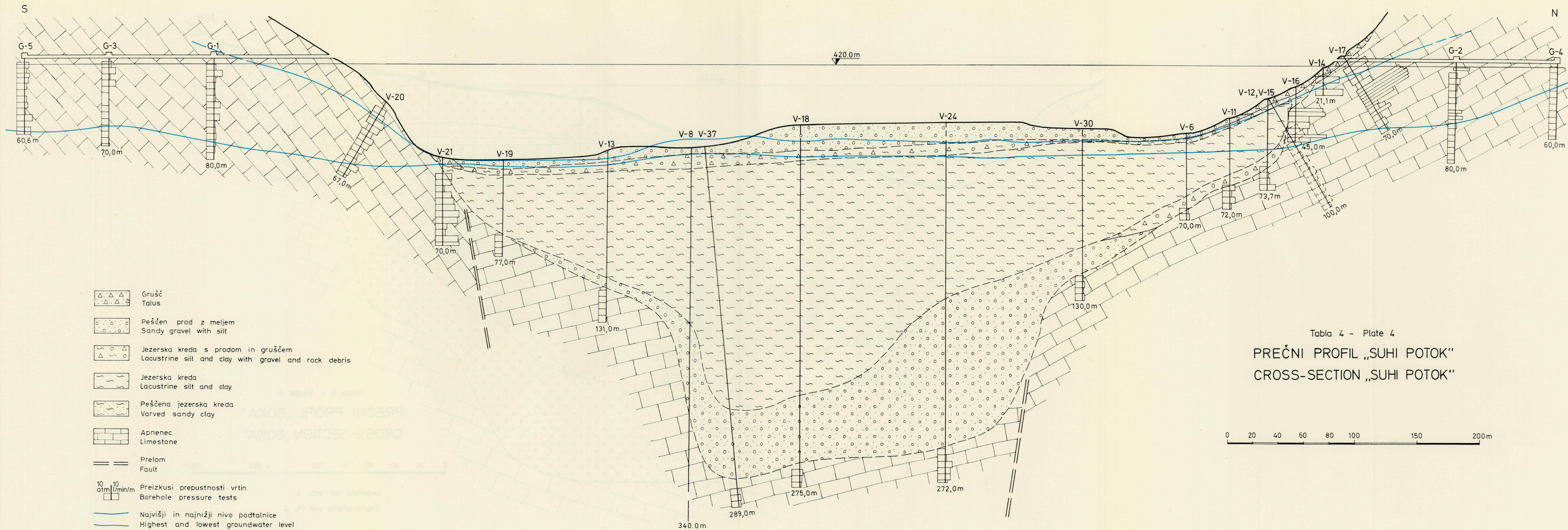
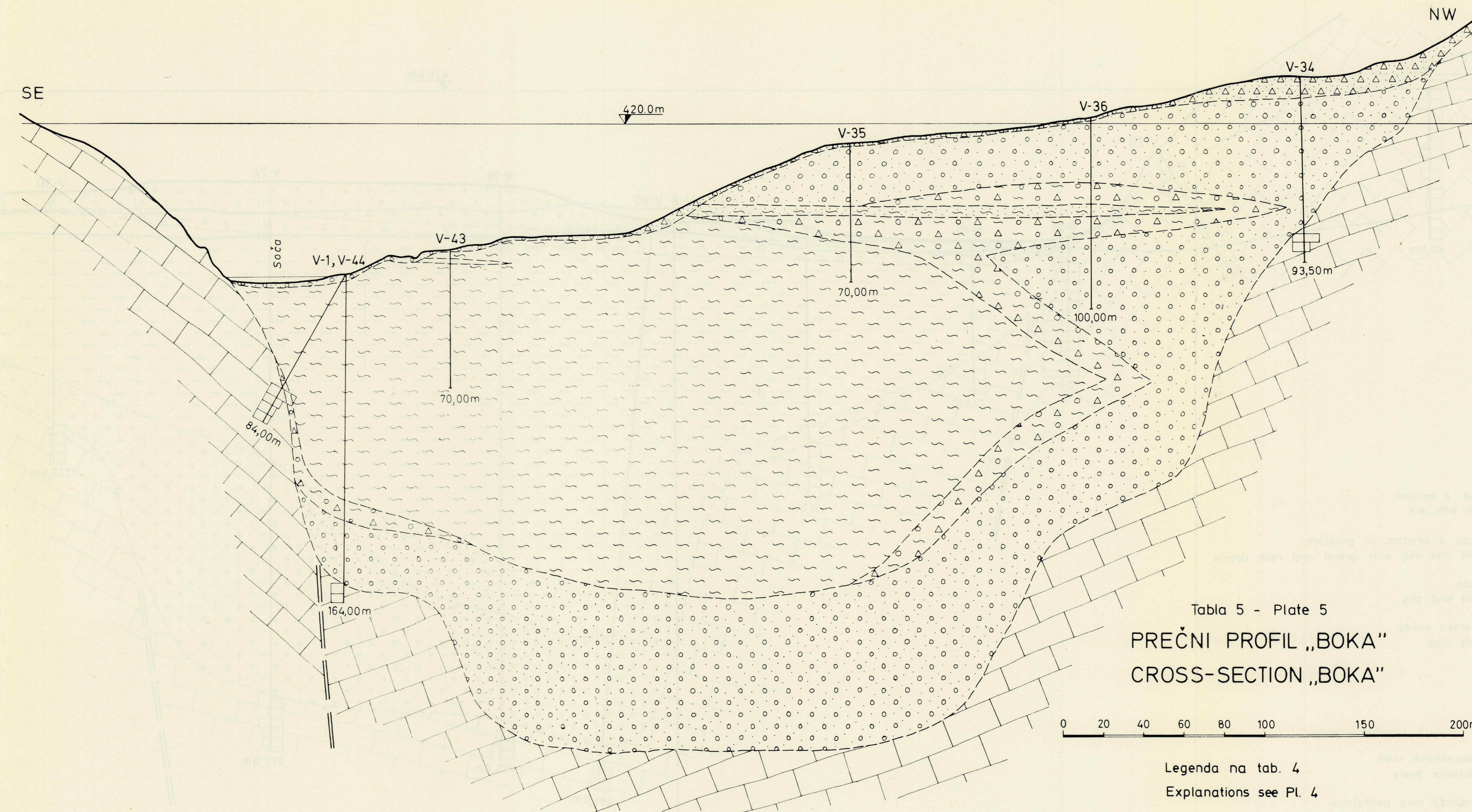
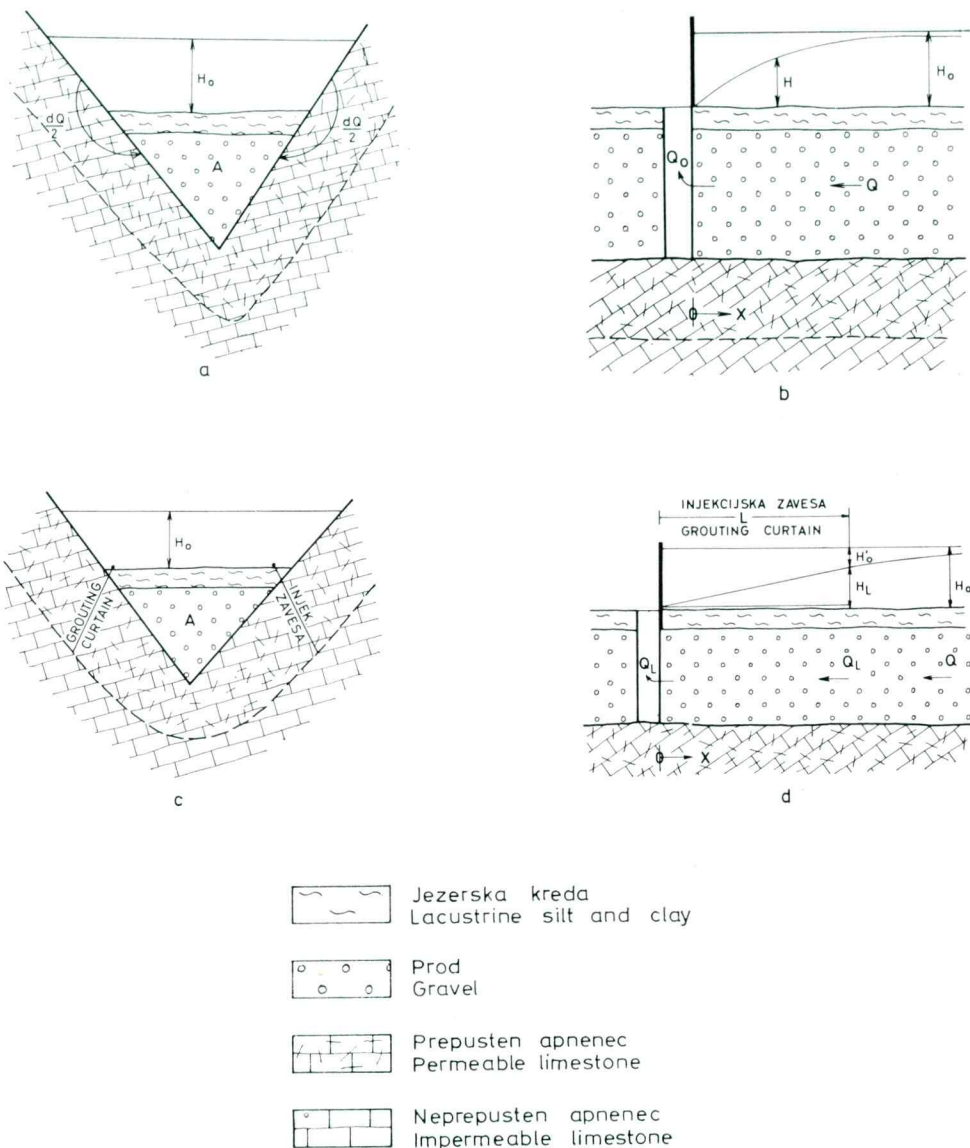


Tabla 4 - Plate 4
PREČNI PROFIL „SUHI POTOK“
CROSS-SECTION „SUHI POTOK“





Sl. 31. Prečni (a) in vzdolžni (b) presek modela za račun izgub vode iz akumulacijskega bazena brez vzdolžnih injekcijskih zaves
Prečni (c) in vzdolžni (d) presek modela za račun izgub vode iz akumulacijskega bazena z vzdolžnima injekcijskima zavesama

Fig. 31. Cross section (a) and longitudinal section (b) of the model for estimating water leakage from the reservoir without longitudinal grouting curtains
Cross section (c) and longitudinal section (d) of the model for estimating water leakage from the reservoir with longitudinal grouting curtains

Po enačbi (13) bi lahko izračunali dolžino injekcijske zavesa, ki bi bila potrebna, da bi prvotni pretok Q_0 zmanjšali na naprej izbrano vrednost Q_L .

Če vzamemo za c , A in k prejšnje vrednosti in izračunamo, kako dolga bi morala biti injekcijska zavesa, da bi zmanjšali izgube na $1/10$, tj. od $Q_0 = 7 \text{ m}^3$ na $Q_L = 0,7 \text{ m}^3$, dobimo $L = 330 \text{ m}$.

Kot preje, mislimo, da je tudi ta rezultat preveč pesimističen, ker smo predpostavljali sorazmerno visoko in enakomerno vrednost za kavernoznost skale. V resnici je kavernoznost zelo neenakomerna. Pri izvedbi podobnega projekta bi morali računati z injekcijsko zaveso, ki bi se začela neposredno ob pregradi in bi segla kontinuirano do razdalje kakih sto metrov v akumulacijski bazen. V večji oddaljenosti od pregrade pa bi bilo treba injicirati le dele, kjer bi raziskave pokazale, da je skala močno kavernoza in obstajajo širši kanali med akumulacijskim bazenom in spodnjim prodom.

Geology of the Soča Valley between Bovec and Kobarid

Dušan Kuščer

Inštitut za geologijo, Ljubljana, Aškerčeva 20

Karel Grad, Anton Nosan and Bojan Ogorelec

Geološki zavod, Ljubljana, Parmova 33

The results of geological investigations for the Trnovo Hydroelectric Project on the River Soča are discussed. The area is composed dominantly of Upper Triassic limestone and dolomite, succeeded in places by reduced Jurassic series and finally by thick Cretaceous deposits. The observed facial differences of this system are ascribed to synsedimentary tectonics.

The Quaternary valley fill is up to 320 m thick and consists of three units: a lower permeable dominantly gravelly unit, a middle, impermeable silty and clayey unit, and an upper permeable alluvial unit. An estimation of the expected leakage from the reservoir through the karstified abutments down to the aquifer in the lower permeable unit of the Quaternary valley fill showed that the hydraulic transmissivity of similar limestone-gravel systems with the same total porosity is approximately inversely proportional to the width of their solution channels.

Introduction

The geological investigations for the Trnovo Hydroelectric Project on the Soča River were carried out during the period 1951—1965. The whole area of the project was mapped in detail (Pl. 1 and 2), and explored by numerous boreholes and galleries. The project was abandoned some years ago due to environmental protection. Some interesting geological facts which were brought to light during these exploration works, and which were later supplemented by investigations sponsored by the Boris Kidrič Foundation, are presented in this paper. This paper only deals with the area between the planned reservoir in the Bovec Basin (Fig. 1) and the planned power station at Kobarid. Since the investigations of the Quaternary sediments were carried out in much greater detail than those of the pre-Quaternary sediments, separate descriptions are given for the pre-Quaternary formations and for the Quaternary valley fill.

The stratigraphy of the pre-Quaternary formations

Triassic

The oldest formations exposed in the area are Upper Triassic dolomite and limestone. According to R. Selli (1963), who explored the neighbouring area

in Italy, the limestone and dolomite are stratigraphic equivalents and can replace one another. The Upper Triassic Dachstein Limestone surrounds the Bovec Flysch Basin on all sides, forming high mountains (Figs. 3, 4). Abundant *Megalodus* sp. is found on Mt. Polovnik (Fig. 2). The Dachstein Limestone is of the Upper Noric and, in its higher parts, probably of Rhetic age. K. Grad (1964) and L. Šribar (1968) found in a similar limestone of the south-eastern Julian Alps the Lower Liassic foraminifer *Involutina liassica* (Jones). The same fossil occurs on Monte Sorelli in the western Julian Alps (M. Cousin & M. Neuman, 1965). It was possible to study the Dachstein Limestone in detail in both exploration galleries at the dam site Suhi potok. According to J. Ivanković (1964) the limestone beds of the galleries are intercalated by brecciated limestone and clay. During repeated inspections of the galleries a cyclic succession of lithologic units, similar to the A, B and C members of the Lofer facies in the Northern Alps, described by A. Fischer (1964), were established. Member A is composed of breccia or conglomerate with a red or green clayey matrix. Member B consists of laminated, partly stromatolitic dolomite (loferite) (Figs. 6, 7), and Member C of calcilutite and calcarenite, frequently containing megalodonts. The described sequence indicates a shallow water environment of Dachstein Limestone.

South of the Žaga—Srpenica line the Upper Triassic is predominantly composed of massive, crystalline dolomite. To the north of this line the dolomite occurs to a minor extent in the core of the Polovnik anticline (Pl. 3, Fig. 1) and at the Boka Waterfall (Fig. 5).

The described characteristics of the Upper Triassic limestone and dolomite, and their uniformity over large areas as well as their great thickness, indicate a steady régime of carbonate deposition, compensating for the subsidence of the sea floor.

Jurassic

In the vicinity of Tolmin (20 km to the southeast of the mapped area) stratified dolomite with chert nodules and layers occurs. F. Kossmat (1920) attributed it to the Bača Facies of the Upper Triassic, but according to S. Buser (1960) the dolomite of the Tolmin region and similar dolomite of the Kobarid region are of Lower Liassic age.

Above the dolomite there is a bedded, partly oolitic limestone. From similar rocks in neighbouring areas NE and W of Bovec R. Selli (1953) mentions Liassic fossils.

L. Šribar in B. Ogorelec, (1970) determined *Globigerina helveto-jurassica* Haeusler, a characteristic Doggerian fossil as well as numerous Verneulinidae and Textulariidae from a bedded limestone with marly intercalations and limonitic nodules in the Koritnica Valley (Figs. 8 and 9).

On the northern slope of Mt. Polovnik there is a bedded oolitic limestone, probably of Jurassic age, including up to 5 cm large limonitic nodules (Fig. 10). It contains numerous microfossils (Verneulinidae and Textulariidae) but no characteristic Jurassic fossils. The similarity with the above-mentioned limestone in the Koritnica Valley suggests Jurassic age.

The pink limestone, exposed in restricted areas north of Bovec, is probably of Jurassic age, too.

Cretaceous

Cretaceous sediments occur in two regions, which are separated by the Triassic Mt. Polovnik (Fig. 11). To the north of it lies the deep Bovec basin. Here the limestone of probably Jurassic age is overlain by a reddish, occasionally grey, micritic, thin bedded limestone with some intercalations of marly clay, usually described by the name "Scaglia". (Fig. 12). Pelagic microfauna is abundant, with globotruncanas (*G. linneiana* d'Orbigny), *G. tricarinata* (Quereau), *G. calcarata* Cushman (Fig. 13), *G. elevata* (Brotzen). Numerous chert lenses are present in the limestone. The thickness of the "Scaglia" in the Bovec Basin is up to 150 m. On the northern slope of Mt. Polovnik, it is somewhat less thick.

To the south of Mt. Polovnik the "Scaglia" is substituted by the Volče limestone (Figs. 21, 22). Because of its lithology the Volče Limestone must be considered as a carbonate flysch. A four meter long profile has been measured near the village of Drežnica, north of Kobarid (Fig. 23). The grey limestone beds are mostly from 4 to 10 cm thick, exceptionally reaching a thickness of 40 cm. They are separated by thin marly films. The limestone beds are composed of a lower, graded interval, a middle, parallel and current laminated interval, and an upper, micritic interval (Figs. 24, 25). The middle, laminated interval is not always developed. The micritic limestone abounds with foraminifers (*Globotruncana linneiana* d'Orbigny, *G. coronata* Bolli) indicating a lower Senonian age (Fig. 26). Chert lenses are abundant and are situated mostly near the boundary between the graded and laminated interval (Fig. 27).

The different facies of the above-described Lower Senonian sediments of the two regions indicate an east-west trending ridge, separating the two regions.

During the Upper Senonian a nearly identical, dominantly marly flysch was deposited in both regions. The beginning of this flysch sedimentation was probably initiated by the Ressen tectonic phase.

In the southern area the lower portion of this flysch is an about 15 m thick unit of basal calcareous sandstone, having the characteristics of the distal parts of turbidites. The flysch sequences are up to 30 cm thick and only the T_c and T_e intervals (after A. H. Bouma, 1962) are represented.

In the northern area the basal sandstone is absent and the base of the flysch is a marly mudstone with few thin sandstone beds. The sandstone beds become more numerous about 60 m above the base (Fig. 14, 16). The sandstone is a greywacke or a subgreywacke (Fig. 15). Helminthoid tracks are abundant. Flute and groove casts indicate currents from the northwest (Fig. 18).

The upper part of the flysch formation has the characteristics of the proximal parts of turbidites. The layers are thicker and all the intervals from T_a to T_e are represented (Fig. 17). The upper intervals of the flysch sequences abound with globotruncanas, indicating an Upper Senonian age.

In the southern area, in the surroundings of Drežnica, there are, in addition to the described sediments, thicker beds of coarse-grained sandstone and microbreccia. The mineral composition of these beds is different, too. The grains are almost exclusively composed of Cretaceous and Jurassic limestone, occurring only along the southern margin of the area.

In both areas there are olistostromes intercalated in the upper part of the flysch. Their blocks are up to a few cubic meters in volume. In the Drežnica

zone the blocks consist of Volče Limestone, and of Jurassic and Triassic carbonate rocks. The thickness of the olistostromes is mostly between 10 to 30 m, but near Drežnica Village there is one reaching a thickness of 60 m. The poorly rounded blocks lie in a silty-marly matrix. The lithology of the blocks indicates that the olistostromes come from the south.

In the Bovec area the blocks are composed mostly of "Scaglia", though sometimes they are made up of Jurassic and Triassic carbonate rocks, too. The pebbles of conglomeratic olistostromes consist of "Scaglia" and of Jurassic and Triassic carbonate rocks (Figs. 19, 20).

In the Bovec area the flysch formation is up to 800 m thick, being only 400 m thick in the Drežnica area (Fig. 28). The thickness of the flysch formation and the lithologic composition of the olistostromes and the coarse-grained sandstone in the Drežnica area differ considerably from those of the Bovec area because a ridge between the two areas was already in existence at the time of sedimentation.

The coincidence of the facies boundary between the northern and southern flysch area with the ridge of Mt. Polovnik, as well as the northern dip of the flysch beds along the southern margin of the Bovec Basin, strongly indicate that the Mt. Polovnik has an autochthonous position (F. Kossmat, 1913, 91 and 93) (Pl. 3, Fig. 1). It therefore seems very improbable that Mt. Polovnik is a part of the thrust sheet of the Central Julian Alps, and that the Bovec Basin is a tectonic window, as was suggested by A. Winkler (1920, 109).

The heavy minerals have a fairly uniform composition in both areas. Garnet and zircon are dominant, the other minerals (apatite, turmaline, rutile, and chlorite) being subordinate. Among opaque minerals pyrite prevails. The heavy minerals probably originate from the igneous and metamorphic rocks of the Central Alps.

The Quaternary valley fill

At the time of its maximum extent the Pleistocene glacier reached the surroundings of Most na Soči, some 20 km downstream of Bovec. As a result of this glaciation the valley floor is extensively covered by Quaternary deposits. Exploratory borings at the proposed dam site Suhi potok revealed that the valley fill was of exceptional thickness. At bore hole V-37 (Pl. 4) bedrock was reached at a depth of 280 m while at bore hole S-3, some 3 km downstream, it was reached at a still greater depth of 322 m. Here the bedrock is at an elevation of 90 m above sea level, i.e. 110 m lower than 6 km downstream at Magozd, and 310 m lower than in the upper part of the Bovec basin (Pl. 3, Fig. 2). The depression of the bedrock between these two points can hardly be attributed only to glacial erosion, but is probably the effect of recent subsidence. The occurrence of permeable gravel deposits in the deepest part of the depression could be hardly explained otherwise.

A similar Quaternary trough, whose depth, however, is as yet unknown, exists beneath the valley floor between Kobarid and Tolmin. The deepest bore hole in this part, which was driven at Tolmin (60 m), did not reach bedrock. One indication of the recent tectonic activity of this region is its high seismicity.

The Quaternary deposits of the investigated dam sites are composed of three units (Pl. 4 and 5):

1. The Upper permeable alluvial unit,
2. The Middle, impermeable, glacialacustrine unit,
3. The Lower permeable alluvial unit.

The few outcrops of the glacialacustrine sediments indicate that the lake was approximately 8 km long. In places, where the glacialacustrine sediments have been protected from erosion, it can be seen that the tops of these sediments are nearly all at the same elevation of 360 m, which indicates the lake water-level before its final filling up.

The glacialacustrine deposits consist predominantly of a varved clayey silt. The varves are usually horizontal (Fig. 29), but in many places dip at sharp angles, or are even highly contorted (Fig. 30). As the clay is post-glacial this phenomenon could be explained only by the synsedimentary sliding down of the lake bottom.

The maximum thickness of the lacustrine deposit, established by bore holes, is 197 m (Pl. 5). Towards the sides of the valley it gets thinner, overlaps the lower alluvial unit and overlies the Triassic bedrock. The lower alluvial unit is thus sealed off from direct hydrologic connection with the surface. An exception has been detected only on the right abutment of the Boka dam site, where the clayey deposit pinches out before it reaches the Triassic limestone.

Between Srpenica and Kobarid two ridges of glacial till and rubble, culminating in Kuntri (530 m) and Ognjen (480 m), bar the valley floor. The small basin between them has been occupied by a lake (A. Winkler, 1926).

Hydrogeologic features of the dam sites

Besides the aquifers of the two permeable units of the valley fill there are two additional aquifers in the Triassic limestone, one on each side of the valley.

On the right-hand side there are numerous karst springs at different elevations. The intermittent ones are not the highest ones as is the rule in other groups of karst springs. The largest and highest of the springs is the source of the Boka Torrent, lying at an elevation of 730 m just above the 80 m high waterfall. Its discharge varies from about 0,2 to more than 100 cu m/sec (Fig. 5). Among the other, lower-lying sources, there are several intermittent ones. This irregular arrangement of perennial and intermittent springs strongly indicates that the karst channels are poorly interconnected and probably not very deep under the ground surface. Bore hole pressure tests showed only a slight karstification of the limestone at depths greater than 50 to 70 m below rock floor.

On the left-hand side of the valley there are only few small springs due to the much smaller extent of the catchment area.

The ground-water level in the limestone abutments has been observed in bore holes from two exploration galleries in the Suhi potok profile (Pl. 4). The high ground water level intersects the galleries at a distance of 60—70 m from their entrances. At high water the gallery on the right side discharges more than 1 cu m/sec, and the one on the left several hundreds of l/sec. The low

ground-water level drops to 20 m below the end of the right gallery, and to 55 m below the end of the left gallery.

The thickness of the upper Quaternary aquifer is variable, due to partial erosion of the lacustrine deposit before the deposition of the recent gravel. Along the Boka Torrent the permeability of the upper unit is very high. The ground-water level is in places below the torrent channel and, due to different rates of infiltration at different water levels of the Boka Torrent, the ground-water level fluctuations are very high (up to 8,5 m).

The thickness of the lower Quaternary aquifer is up to 120 m (Pl. 4 and 5). As previously mentioned, this aquifer is sealed off from direct communication with surface water. The cross-sectional area of this aquifer in the Suhi potok profile is about 27 000 sq m. Thirteen pumping tests have been performed and an average hydraulic conductivity $k = 1,2 \cdot 10^{-4}$ m/sec has been obtained.

The piezometric head of the lower aquifer showed oscillations of up to 13 m. The continuity of the ground-water level across the limestone-gravel boundary proves that both aquifers are interconnected.

At high water, two of the bore holes in the lower aquifer overflow. Sometimes, especially during early summer they discharge intermittently during midday and in the afternoon, drying up during the night. This phenomenon is probably due to snow melting on the high Kanin Plateau to the north during the hot day hours, and a very fast underground run-off through karst channels down to the valley floor.

Estimation of the leakage from the reservoir

It is supposed that the leakage around the abutments could be prevented by a relatively small grout curtain and that the watertight core of the dam reaches everywhere to the impermeable lacustrine deposits. Grouting of the deep-lying lower permeable unit would be very difficult and of doubtful effect. Therefore an estimation of the waterlosses from the reservoir through the limestone down to the lower alluvial aquifer was carried out. In the equations the following symbols are used (see also Fig. 31a and b):

- x distance from the dam,
- Q ground-water flow at a distance x from the dam,
- Q_0 ground-water flow below the dam,
- H piezometric head at the distance x from the dam,
- H_0 piezometric head at a very great distance
(equal to the reservoir water level),
- i hydraulic gradient,
- A cross-sectional area of the lower permeable unit,
- k hydraulic conductivity of the lower permeable unit,
- v specific discharge,
- c constant of proportionality of leakage through the limestone
valley walls, as defined by eq. (2) (see below).

Denoting the waterlosses from the reservoir as negative, the ground-water flow along the lower permeable unit is:

$$-Q = A k \frac{dH}{dx},$$

and the hydraulic gradient is:

$$i = \frac{dH}{dx} = - \frac{Q}{A k} \quad (1)$$

Supposing that the leakage from the reservoir through the limestone abutments is proportional to the head difference $H_0 - H$, the leakage from a section of the reservoir of length dx would be:

$$dQ = c (H_0 - H) dx \quad (2)$$

whence:

$$\frac{dQ}{dx} = c (H_0 - H) \quad (2')$$

Differentiating and introducing $\frac{dH}{dx}$ from eq. (1) we obtain:

$$\frac{d^2Q}{dx^2} = \frac{c}{A k} Q \quad (3)$$

Satisfying the condition $Q = Q_0$ at $x = 0$, the solution of (3) is:

$$Q = Q_0 \exp \left(- \sqrt{\frac{c}{A k}} x \right) \quad (4)$$

The corresponding equation for H is obtained by differentiating (1) and introducing $\frac{dQ}{dx}$ from (2'):

$$H = H_0 \left[1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{c}{A k}} x \right) \right] \quad (5)$$

Differentiating (5) and introducing the value of $\frac{dH}{dx}$ from eq. (1) the water flow at $x = 0$ is:

$$Q_0 = - H_0 \sqrt{A k c} \quad (6)$$

Supposing that the permeability of the limestone is due to small fissures only, an approximate estimation of its hydraulic conductivity k_1 could be obtained from pressure tests of bore holes. From all successful pressure tests a mean value of 1.5×10^{-6} m/sec has been obtained for k_1 . Supposing a thickness D of the upper, permeable part of the limestone, a mean length l of the percolation path from the reservoir down to the lower permeable unit of the Quaternary valley fill, and that the percolation obeys Darcy's law, the total leakage for both sides of the reservoir over a section of length dx would be:

$$dQ = 2 k_1 \frac{D dx}{l} (H_0 - H) \quad (7)$$

Approximate values are $D = 100$ m, and $l = 100$ m. Equating (7) and (2) gives $c = 2k_1$. With this value and with $H_0 = 80$ m, $A = 27\,000$ m² and $k = 1.2 \times 10^{-4}$ m/sec the total leakage calculated from equation (6), is $Q_0 = 0.252$ m³/sec, which would be negligible.

The permeability of the limestone is not caused only by small fissures, but also to a far greater extent by solution channels. Their capacity cannot be tested in bore holes. The model which will serve for estimating leakage through such channels, is a rock perforated by evenly spaced circular channels of the same width and covered at the outlet by a thick gravel deposit. We suppose that the gravel does not penetrate into the channels. For water flow through the combined limestone-gravel system the piezometric head losses in the channels will be negligible, provided that the channels are large enough (in our model larger than about 10 cm). The radial flow q from the outlet of a circular channel of a diameter $2r_0$ into a semi-infinite permeable material is

$$q = (H_0 - H) \cdot 2\pi k r_0 \quad (8)$$

Suppose, now, that different limestones with the same total porosity p but with differing channel diameters exist. Over an area P of the limestone-gravel interface the sum of cross-sections of all the channels would be:

$$pP = N\pi r_0^2$$

where N is the number of channels, whence:

$$N = \frac{pP}{\pi r_0^2} \quad (9)$$

The following conclusion is valid only in the case when the distances between neighbouring channels are large, so that the flow from one channel does not perceptibly affect the flow from any other.

The total discharge from N channels is:

$$Q' = Nq = N(H_0 - H) 2\pi k r_0$$

Introducing N from (7), we get:

$$Q' = 2k(H_0 - H) \frac{pP}{r_0} \quad (10)$$

This result shows that the discharge from a large number of small channels is greater than that from a small number of large channels, provided that the total porosity is the same in both cases.

Consider a length dx of the reservoir contributing a portion $-dQ$ to the leakage. Denoting the length of the gravel-limestone interface in the cross-section (Fig. 31a) as S , this portion $-dQ$ is leaking through an area $P = S dx$ of the interface. Substituting in eq (9) dQ for Q' and $S dx$ for P we get:

$$dQ = 2k(H - H_0) \frac{p S dx}{r_0} \quad (10')$$

Comparing with (2):

$$c = 2kpS \frac{1}{r_0}$$

Supposing $S = 100$ m, $p = 0.1\%$, $r_0 = 0.1$ m and $k = 1.2 \times 10^{-4}$ m/sec the value of c is $c = 2.4 \times 10^{-4}$ m/sec. With this value of c eq. (6) given an excessive leakage of $Q_0 = 2.2$ cu m/sec. As the supposition of a porosity of 0.1% and of

0.1 m wide channels seems quite reasonable, one must conclude that the discussed leakage path would require special treatment, with longitudinal grouting curtains in the limestone extending from the dam abutments along the edges of the lacustrine deposit up into the reservoir. The length of the curtain which would be sufficient to reduce the leakage to supportable values has to be determined.

Supposing that longitudinal grouting curtains of length L are accomplished, the leakage from the reservoir can be easily estimated using the equations previously deduced. We shall use the following symbols (see also Fig. 31c and d).

L length of the longitudinal grouting curtains,

Q_L ground-water flow between the dam and the end of the grouting curtain,

Q ground-water flow at distances greater than L from the dam,

H_L piezometric head at the end of the grouting curtain,

H'_0 difference in piezometric head between the end of the grouting curtain and the reservoir water level, $H'_0 = H_0 - H_L$.

From the dam up to a distance L the ground-water flow is constant, Q_L . For distances greater than L equation (6) can be used replacing H_0 by H'_0 , and Q_0 by Q_L :

$$-Q_L = H'_0 \sqrt{A k c} = (H_0 - H_L) \sqrt{A k c} \quad (6a)$$

H_L can be readily found from the water flow between the dam and the end of the grouting curtain

$$H_L = -\frac{Q_L L}{A k} \quad (11)$$

Introducing this value in eq. (6a) we get:

$$-Q_L = (H_0 - H_L) \sqrt{A k c} = H_0 \sqrt{A k c} + Q_L L \sqrt{\frac{c}{A k}}$$

Rearranging, and introducing Q_0 from eq. (6) we obtain:

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + L \sqrt{\frac{c}{A k}}} \quad (12)$$

With a grouting curtain of a length L the ground-water leakage diminishes by a factor $\frac{1}{1 + L \sqrt{\frac{c}{A k}}}$

Determining L from equation (10) we get:

$$L = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_L \sqrt{\frac{c}{A k}}} \quad (13)$$

This equation can be used for estimating the length of the longitudinal grouting curtain necessary to reduce the leakage from Q_0 to a pre-selected value Q_L . As the transmissivity of the limestone is very non-homogeneous, the

values obtained are of limited value only. In practice it would be necessary to carry out continuous grouting curtains to a length of some few hundred metres from the dam, and in the case of highly karstified regions farther up the reservoir, additional discontinuous curtains in these regions, too.

Literatura

- Bouma, A. H. 1962, *Sedimentology of some Flysch deposits*. Amsterdam.
- Cousin, M. 1970, *Esquisse géologique des confins italo-yougoslaves: leur place dans les Dinarides et les Alpes méridionales*. B. S. G. F. 7., XII, Paris.
- Cousin, M., Neumann, M. 1965, *Microfaciès du Lias dans les Préalpes Juliennes occidentales (Frioul, Italie)*. Note préliminaire. C. R. somm. S. G. F., Paris.
- Fabiani, R. 1937, *Carta geologica delle Tre Venezie 1:100 000*, Tolmino. Firenze.
- Fischer, A. 1964, *The Lofer Cyclothemes of the Alpine Triassic*. Bull. Kansas Geol. Surv. 169, Topeka.
- Hauer, F. 1868, *Geologische Übersichtskarte der österreichischen Monarchie*. Jahrb. Geol. R. A. Bd. XIX, Wien.
- Ilešič, S. 1951, *Podolžni profil Soče*. Geogr. vestnik. XXIII, Ljubljana.
- Ivanković, J. 1964, *Inženjersko geološke i hidrogeološke prilike pregradnog mjesta HE Trnovo*. Diplomsko delo, Univerzitet, Zagreb.
- Kossmat, F. 1908, *Beobachtungen über den Gebirgsbau des mittleren Isonzgebietes*. Verh. Geol. R. A., Wien.
- Kossmat, F. 1909, *Der küstenländische Hochkarst und seine tektonische Stellung*. Verh. Geol. R. A., Wien.
- Kossmat, F. 1913, *Die adriatische Umrandung in der alpinen Faltenregion*. Mitt. Geol. Ges. Bd. VI, Wien.
- Kossmat, F. 1914, *Geologie des Wecheinertunnels und der südlichen Anschlusslinie*. Denkschr. Akad. d. Wiss. Bd. 82, Wien.
- Kossmat, F. 1920, *Geologische Karte 1:75 000*, Tolmein. Wien.
- Ogorelec, B. 1970, *Kredni fliš Gornjega Posočja*. Diplomsko delo, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana.
- Seilacher, A. 1959, *Zur ökologischen Charakteristik von Flysch und Molasse*. Eclogae Geol. Helvetiae, 51, No. 3, Basel.
- Selli, R. 1953, *La geologia dell'alto bacino dell'Isonzo*. Giorn. di Geol. s. 2, 19 (1947), Bologna.
- Selli, R. 1963, *Schema geologico delle Alpi Carniche e Giulie occidentali*. Anali Museo Geol. Bologna, s. 2, vol. XXX (1962), Bologna.
- Stur, D. 1858, *Das Isonzo-Thal von Flitsch abwärts bis Görz, die Umgebung von Wippach, Adelsberg und die Wochein*. Jahrb. Geol. R. A. Bd. IX, Wien.
- Sercelj, A. 1970, *Würmska vegetacija in klima v Sloveniji*. Razpr. 4. r. Slov. akad. znan. umetn. XIII/7, Ljubljana.
- Tollman, A. 1966, *Die alpidischen Gebirgsbildungs-Phasen in den Ostalpen und Westkarpaten*. Geotekt. Forsch. H. 21, Stuttgart.
- Winkler, A. 1920, *Das mittlere Isonzgebiet*. Jahrb. Geol. R. A. Bd. LXVIII, Wien.
- Winkler, A. 1924, *Über den Bau der östlichen Südalpen*. Mitt. Geol. Ges. Wien, B. XVI, (1923), Wien.
- Winkler, A. 1926, *Zur Eiszeitgeschichte des Isonzotales*. Zeitschr. f. Gletscherkunde, XV, Leipzig.
- Winkler, A. 1931, *Zur spät- und postglazialen Geschichte des Isonzotales*. Zeitschr. f. Gletscherkunde, XIX, Leipzig.
- Vozdviženskij, B. I., Kuličihin, N. I., Meerson, E. G., Utkin, I. A. in Jakobi, N. O., 1946, *Spravočnik razvedčika poleznih iskopaemih*. Moskva, Leningrad.
- Zankl, H. 1971, *Upper Triassic Carbonate Facies in the Northern Limestone Alps*. 8. Internat. Sediment. Congress. Guidebook. Heidelberg.