4.1

956/1 F

Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques

et Glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich

EROSION DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

Examen des causes
Prévision de l'évolution future
Recommandations sur les mesures à prendre

Grande Cariçaie, Groupe d'étude et de gestion
à Champ-Pittet près d'Yverdon

Zurich, février 1990

956/1 F

Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques

et Glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich

EROSION DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

Examen des causes
Prévision de l'évolution future
Recommandations sur les mesures à prendre

Grande Cariçaie, Groupe d'étude et de gestion
à Champ-Pittet près d'Yverdon

Zurich, février 1990

TABLE DES MATIERES

1. Introduction et objet de la présente étude 1

2. Bases de travail 2
   2.1 Reconnaissance des sites 2
   2.2 Documents topographiques 2
   2.3 Vues aériennes 10
   2.4 Données concernant les vents 11
   2.5 Matériau formant le fond du lac au voisinage des rives 11
   2.6 Evolution des niveaux du lac 13

3. Vagues dues au vent et transport des sédiments 13
   3.1 Généralités 13
   3.2 Vents 17
   3.3 Vagues 17
   3.4 Courants induits par les vagues et transport des sédiments 20

4. Morphologie de la rive sud du lac 29
   4.1 Etat des connaissances 29
   4.2 Le recul de la rive depuis 1880 30
   4.3 Influence de l'action de l'homme sur l'érosion des rives 39
   4.4 Une stabilisation naturelle, un état d'équilibre des rives peuvent-ils être attendus? 39

5. Conséquences à tirer des observations faites et recommandations pour la procédure future à suivre 40

6. Mesures constructives de protection 42
   6.1 Généralités 42
   6.2 Môles en matériau remblayé aménagés en eau peu profonde 42
   6.3 Remblayage d'épis placés perpendiculairement à la rive 43
   6.4 Renforcement de la rive existante 44

7. Résumé 46

Liste des symboles utilisés 48

Sources 50

Annexe 1 53

Annexe 2 61

1. Introduction et objet de la présente étude

La rive sud du lac de Neuchâtel, entre Yverdon et Estavayer, est soumise à l'érosion par les vagues sur de grandes distances. Chaque année, le plan d'eau s'avance en moyenne d'un à deux mètres vers la rive qui se voit ainsi amputée de quelques hectares. Les roselières de la "Grande Cariçaie", déclarée zone protégée et appartenant aux cantons de Vaud et de Fribourg, sont particulièrement menacées [1]. Le "Groupe d'étude et de gestion" (GEG) à Champ-Pittet près d'Yverdon, organe exécutif désigné par un accord passé entre les deux cantons, la Ligue suisse pour la protection de la nature et le World Wildlife Fund Suisse, est responsable de la sauvegarde de cette zone avec l'appui de la Confédération.

En date du 13 novembre 1987, le GEG a chargé le Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, d'effectuer une étude devant permettre de prévoir l'évolution future de la Grande Cariçaie et de définir les mesures adéquates à prendre pour en assurer la conservation.

Le problème posé soulève différentes questions:

- Comment se déroule le phénomène d'érosion?

- Quelle est la cause de l'érosion, et ainsi du recul de la rive?

- Si une diminution de l'érosion de la rive ne devait pas être constatée dans un proche avenir, est-il possible de protéger efficacement le marais? Si oui, quelles sont les mesures techniques envisageables et quel est le prix de leur réalisation?

- Quelles sont les conséquences à attendre si la zone protégée et les tronçons de rive adjacents sont laissés dans leur état actuel et que le phénomène d'érosion ne soit pas combattu?

- Comment la régulation actuelle des lacs du Jura influence-t-elle l'érosion des rives?

La présente étude tente de donner une réponse concluante à ces questions. Toutefois, il ne s'avère pas possible de fournir une justification complète et exacte sur tous les aspects traités du problème. En effet, trop peu de données quantitatives ont été dégagées autrefois de l'observation à long terme du phénomène d'érosion des rives.

Il faut cependant signaler que l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel a déjà été décrite de manière approfondie dans de nombreux ouvrages [2], [3].

D'autres lacs sont concernés par le problème de l'érosion et de la protection des rives [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Celui-ci n'est pas nouveau mais l'opinion publique n'en a guère pris conscience avant la dernière décennie. La régression des roselières est due à diverses influences dont le degré d'importance est difficile à cerner. Les observations faites dans un cas précis ne peuvent pas être simplement extrapolées à un autre cas. Chaque lac possède ses propres caractéristiques et doit ainsi être considéré en particulier.

2. Bases de travail

2.1 Reconnaissance des sites

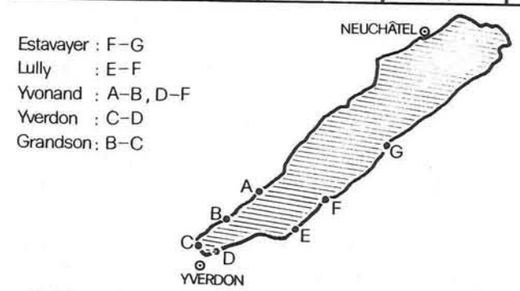
Le 5 novembre 1987, une reconnaissance en bateau des rives menacées a été faite par l'auteur de ce rapport, accompagné des représentants du groupe d'étude et de gestion. Quelques impressions récoltées à cette occasion sont données par les photographiques choisies qui suivent (voir photos 1 à 7). A certains endroits, l'érosion est si forte que la végétation n'a pas le temps de repousser sur le front d'attaque des vagues. Les dommages causés à la rive sont d'une telle ampleur qu'ils peuvent même être constatés sans peine par une personne non avertie.

Le GEG n'est toutefois pas resté inactif et a pris des mesures pour combattre l'érosion des rives. Divers types d'ouvrages de protection ont été mis en place. Mais il est encore trop tôt pour en apprécier valablement la fiabilité (photos 8, 9, 10 et 11).

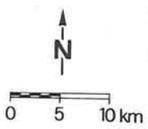
2.2 Documents topographiques

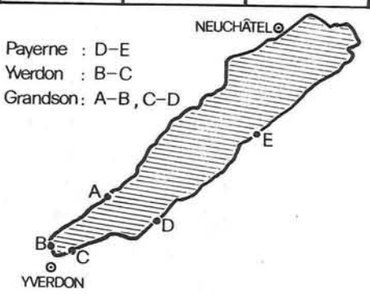
L'analyse du recul de la rive a été entreprise sur la base des cartes topographiques mentionnées dans le tableau 1. La plus grande partie de ces cartes étant épuisées et non disponibles dans les bibliothèques, des copies ont été commandées à l'Office fédéral de topographie. Il a été possible d'obtenir ainsi les feuilles de la nouvelle Carte nationale de la Suisse (dès 1953), de l'Atlas Siegfried (1890 - 1953) et, comme relevé le plus ancien, celui des courbes de niveau du fond du lac, au 1:25'000, établi par R. Manuel et A. Durheim (1880).

Ort / Localité	Siegfried Karten / Atlas Siegfried 1:25000					neue Landeskarten / Cartes nationales de la Suisse 1:25000		
Blatt / Feuille	286	287	293	324	326	1183	1184	1203
Ausgabe - bzw. Nachführungsjahr / Année d'édition resp. de mise à jour	GRANDSON	YVONAND	YVERDON	ESTAVAYER	LULLY	GRANDSON	PAYERNE	YVERDON
				1889	1889			1953
	1890							1956
		1891				1957	1957	
			1892					1961
	1894	1894	1894	1894	1894		1964	
	1903	1903	1903		1903	1968	1968	1968
				1907		1974		1974
			1926/31				1975	
	1927/29	1927/30				1979		
				1928/30			1981	
					1930/32			1986
	1935/38	1935/39	1936/39					
				1937/40				
					1939/41			
	1945/50	1945/51	1945/49					
				1946/52	1946/53			



Estavayer : F-G
Lully : E-F
Yvonand : A-B, D-F
Yverdon : C-D
Grandson : B-C





Payerne : D-E
Yverdon : B-C
Grandson : A-B, C-D

zusätzlich : Neuenburgersee 1880
supplément : Lac de Neuchâtel 1880

1:25000 P. Manuel, A. Durheim

Tableau 1 Répertoire des cartes géographiques utilisées pour l'étude

34/65/33

Photo 1 Les racines de grands arbres ont été mises à nu par l'abaissement de la rive dû à l'érosion.

Foto 1 Die Wurzelstöcke grosser Bäume sind entblöst, der umgebende Boden abgetieft.

34/65/31

Photo 2 De nombreux arbres ont basculé dans le lac.

Foto 2 Zahlreiche Stämme sind in den See gekippt.

34/86/14

Photo 3 Les vagues et le bois flottant échoué endommagent les roselières en les couchant sur la rive.

Foto 3 Der Schilfbestand wird durch Wellengang und herangeführtes Schwemmholz landeinwärts abgedrängt.

34/65/34

Photo 4 A proximité des rives, le terrain est actuellement situé environ 1 m plus bas que le niveau primitif estimé.

Foto 4 In Ufernähe liegt der Sandboden gegenüber dem mutmasslichen früheren Niveau etwa 1 m tiefer.

34/86/23

Photo 5 La disparition d'anciennes roselières est mise en évidence par les nombreux rhizomes visibles sur la rive.

Foto 5 Abgestorbene Schilfrhizome zeugen von ehemaligen Schilfbeständen.

34/86/21

Photo 6 Roselière lacustre menacée de destruction. A droite, le recul de la rive sablonneuse est visible.

Foto 6 Der Zerstörung ausgesetzte Schilfflächen im Wasser, rechts das rückschreitende Sandufer.

34/86/20

Photo 7 Un à deux hectares de ce marais sont engloutis annuellement par le lac.

Foto 7 Von dieser Riedlandschaft verschlingt der See jährlich eine bis zwei Hektaren.

34/86/5

Photo 8

Rangées de pieux retenant les fascines de protection. A droite, une palissade tressée.

Foto 8

Pfahlreihen mit dazwischen liegenden Senkfaschinen (Lahnung), rechts Flechtzaun

34/86/6

Photo 9 Vue, prise du lac, des parois de protection.

Foto 9 Ansicht der Lahnung vom See her.

34/86/22

Photo 10 Môle constitué par des rangées de pieux et des perches horizontales retenant un remblai recouvert de végétation. Des géotextiles ont été utilisés comme filtre.

Foto 10 Mole, bestehend aus Pfahlreihen, Längsruten und einer bepflanzten Hinterfüllung. Als Filter sind Geotextilien verwendet worden.

34/86/16

Photo 11 Rangées de pieux

Foto 11 Pfahlreihen

2.3 Vues aériennes

Les vues aériennes suivantes ont été mises à la disposition du Laboratoire:

Tableau 2: Liste des vues aériennes disponibles

Année	Date	No
1937		383, 384, 416, 417, 419, 420, 421, 422, 423, 432
1954		3061, 3062, 3086, 3087, 3088, 3089, 3090, 4302
1968	24.5.	9116, 9118, 9120, 9149, 9150, 9151
1974	4.6.	1784, 1785, 1786, 1787, 1788, 1789, 1790, 1791
1975	4.6.	4507, 4508, 4522, 4523, 4540, 4541, 4561, 4562, 4563
1975	5.6.	4283, 4284, 4285

La figure 1 ci-dessous indique les tronçons de la rive du lac photographiés lors des différentes années.

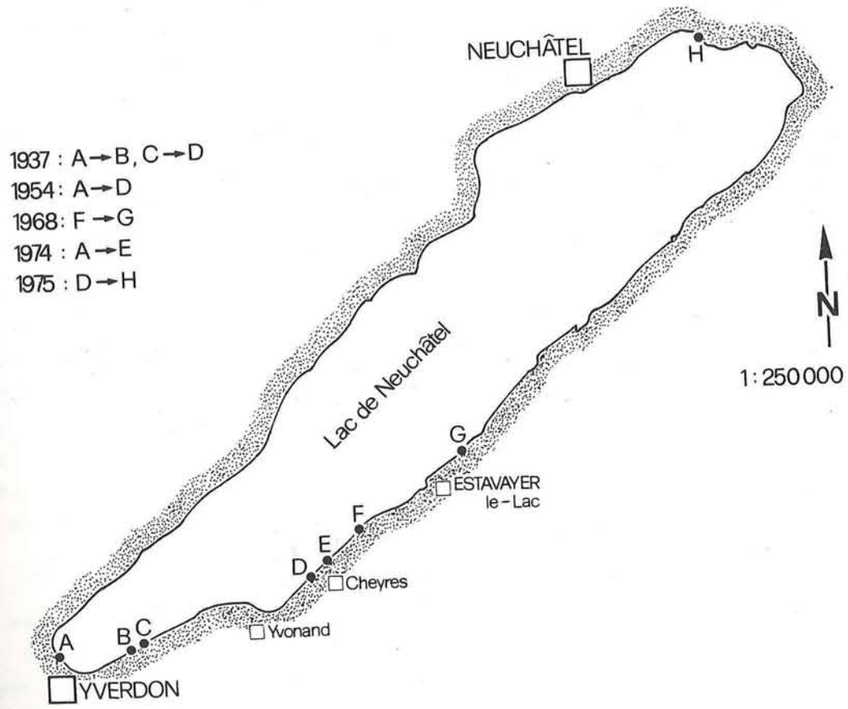


Figure 1 Emplacements des rives du lac recensées par vues aériennes

Figur 1 Die von den verfügbaren Luftbildern erfassten Uferstrecken

2.4 Données concernant les vents

La connaissance de la direction principale des vents est nécessaire à l'estimation des vagues du lac déterminantes pour le phénomène d'érosion constaté. Le résultat des mesures enregistrées à la station de Chables [11] entre les années 1971 et 1980 est donné sous forme de roses des vents dans les annexes 1A à 1L. Pour cette même période d'observation, les valeurs des semestres d'été et d'hiver sont également montrées. Deux directions principales des vents sont visibles: celle de la bise, soufflant du nord-est, et celle du vent du sud-ouest. Pendant le semestre d'hiver (octobre à mars), quand le niveau du lac est bas, le vent du sud-ouest domine. Par contre, la bise est plus fréquente au cours du semestre d'été (avril à septembre) lorsque les niveaux élevés du lac sont atteints. Ces directions, parallèles à la chaîne du Jura, sont également typiques pour les vents soufflant sur le lac de Bienne [10].

Des considérations approfondies sur les vents mesurés à Neuchâtel ont déjà été faites sous [3].

Aucune mesure de l'intensité et de la durée des vents n'est disponible. Ces grandeurs doivent donc être estimées et, dans le sens d'une analyse de sensitivité, variées lors du calcul des vagues engendrées.

2.5 Matériau formant le fond du lac au voisinage des rives

Dans la région touchée par l'érosion, le sol est constitué de sable fin. C'est le cas tant pour le sous-sol du marais à protéger que pour le fond du lac dans la bande de 200 m de largeur délimitant la zone des eaux peu profondes. L'analyse d'un échantillon prélevé sur la plage entre Cheyres et Yvonand (Les Grèves) a conduit à la courbe granulométrique montrée sur la figure 2. La plupart des composantes sont situées dans le domaine de grosseur des grains compris entre 0.25 et 0.75 mm, tandis que 50 % du poids de l'échantillon est formé de sable d'un diamètre inférieur à 0.36 mm. Près de la rive, des débris de coquillages sont mélangés au sable.

La sable provient des roches de molasse constituant le flanc de la vallée (Côte du Lac) au sud-ouest de la ligne ferroviaire Yverdon-Estavayer. Avant la première correction des eaux du Jura, la rive du lac suivait le pied de cette falaise. Au cours de différentes périodes géologiques, les vagues ont érodé la molasse et transporté le sable dans le lac.

Kornverteilung in Summationskurven
Courbe granulométrique

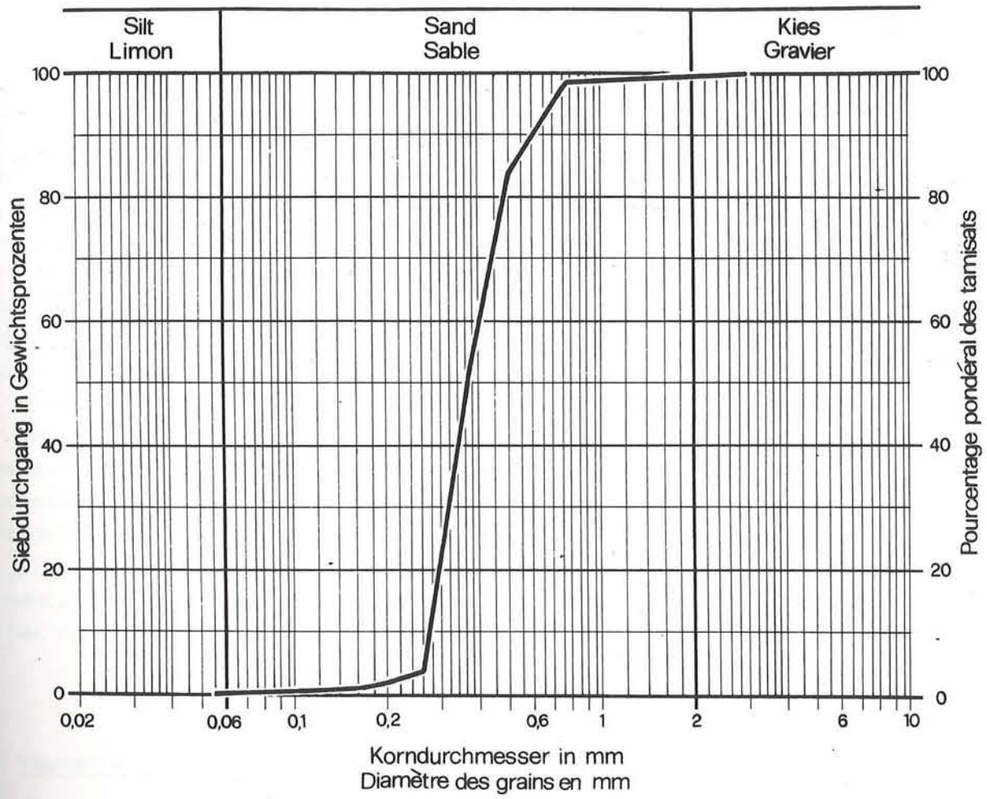


Figure 2 Courbe granulométrique du sable formant le fond du lac. Endroit de prélèvement: rive sud entre Cheyres et Yvonand

Figur 2 Kornverteilung des Seebodensandes. Entnahmestelle: Ufer zwischen Cheyres und Yvonand

2.6 Evolution des niveaux du lac

Avant la première correction des eaux du Jura, le niveau moyen du lac de Neuchâtel se situait à 432.23 m s.m., soit environ 3 m plus haut qu'actuellement (429.23 m s.m.). Ces cotes se rapportent au nouvel horizon de la topographie fédérale introduit dès 1903. L'ancien horizon, supérieur de 3.26 m, détermine les cotes indiquées dans les cartes établies antérieurement à cette date. La connaissance du domaine de variation des niveaux du lac est utile à l'appréciation de l'érosion des rives. Les valeurs limites prévues sont données en fonction du temps à la figure 3. Cette représentation indique également les faits importants concernant les deux corrections des eaux du Jura. Les maxima et minima annuels du niveau du lac sont présentés dans les figures 4a (1817 - 1896), 4b (1896 - 1984) et dans [12]. La description technique et l'histoire des deux corrections des eaux du Jura peuvent être tirées de la référence [14]. De plus amples détails sur la deuxième correction sont donnés dans [15]. La référence [16] décrit plus particulièrement l'influence du règlement 1980 - 1982 sur l'environnement et sur les niveaux d'eau.

Avant la 1 ère correction des eaux du Jura, la variation maximale du niveau du lac était de 2.15 m. Après les travaux, qui ont conduit à un abaissement du lac, cette valeur a atteint 3.01 m. Avec la deuxième correction, on s'est efforcé de limiter le domaine de variation à 1.65 m au plus, tout en maintenant le même niveau moyen du lac (figure 3). Comme le montrent les courbes de la figure 4b, la variation maximale des niveaux du lac ne dépasse pratiquement pas 1 m depuis 1960.

3. Vagues dues au vent et transport des sédiments

3.1 Généralités

L'érosion des rives d'un lac et le transport de sédiments qui en résulte sont le plus souvent provoqués par les vagues dues au vent. La présence d'un potentiel suffisant en énergie éolienne est une condition nécessaire pour que l'érosion ait lieu. Plus rarement, des vagues peuvent être engendrées par le passage de bateaux à moteur. Les vents jouent toutefois le rôle prépondérant sur la rive sud du lac de Neuchâtel.

L'énergie d'une vague est proportionnelle au carré de la hauteur de cette dernière. La hauteur des vagues à attendre en un endroit déterminé du lac dépend de la longueur du fetch (F), de la vitesse (v) et de la durée (t) du vent. Elle croît avec ces grandeurs. Au cours de sa

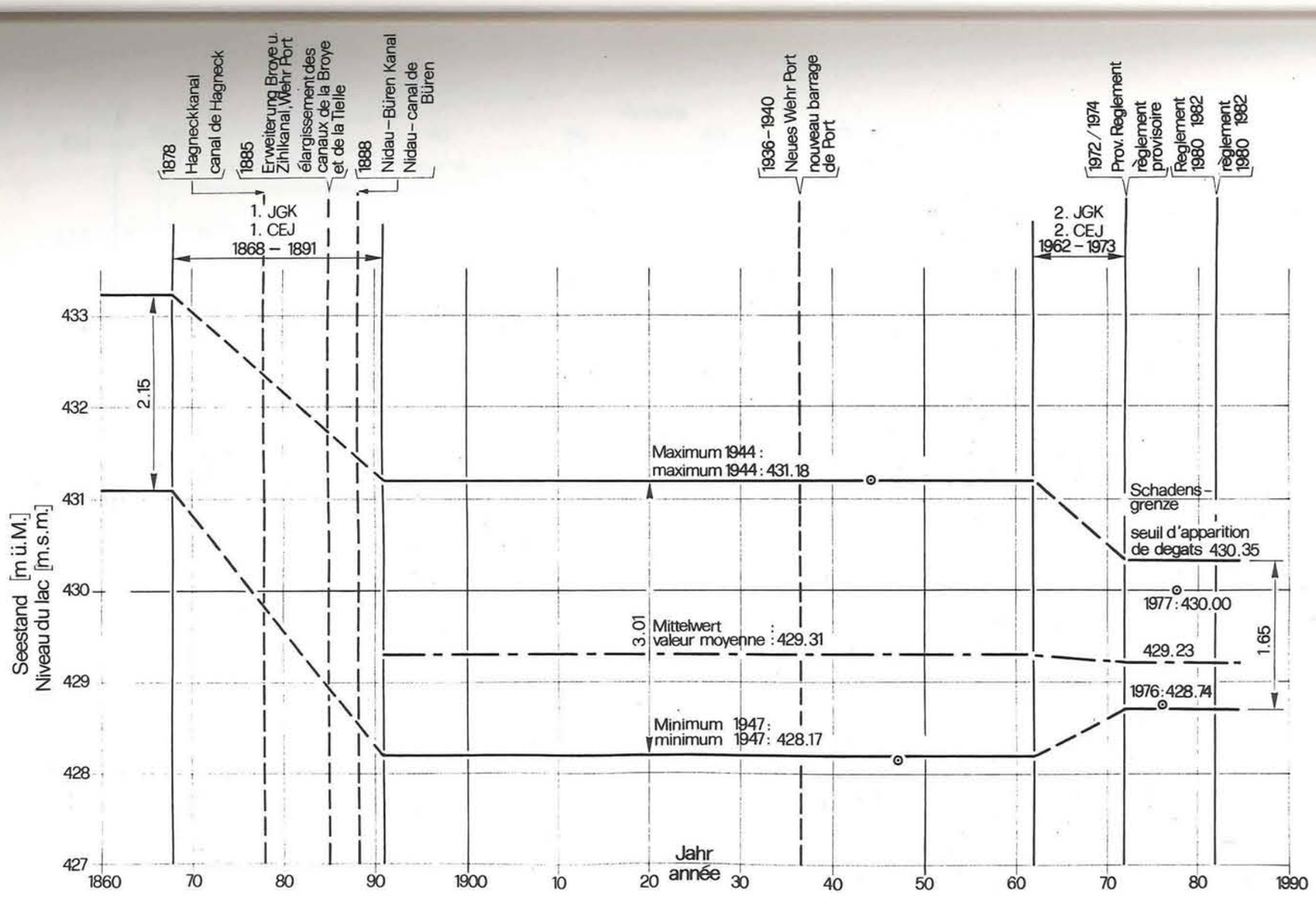


Figure 3: Limites des niveaux extrêmes du lac depuis 1860

Figur 3: Angestrebte Grenzwerte der Seestände seit 1860

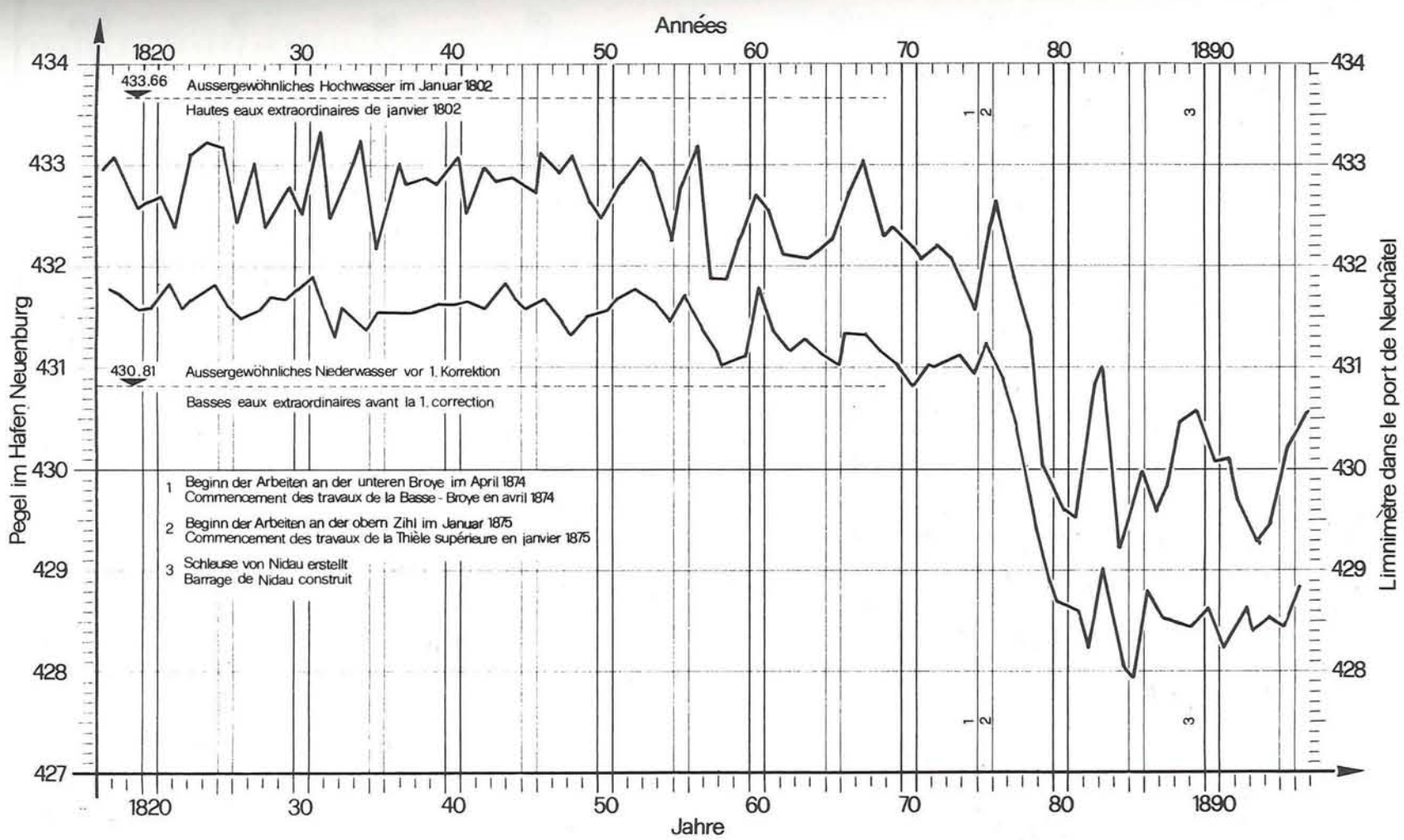


Figure 4a: Niveaux maximum et minimum annuels du lac, observés entre 1817 et 1896

Figur 4a: Die jährlich höchsten und tiefsten Seestände zwischen 1817 und 1896.

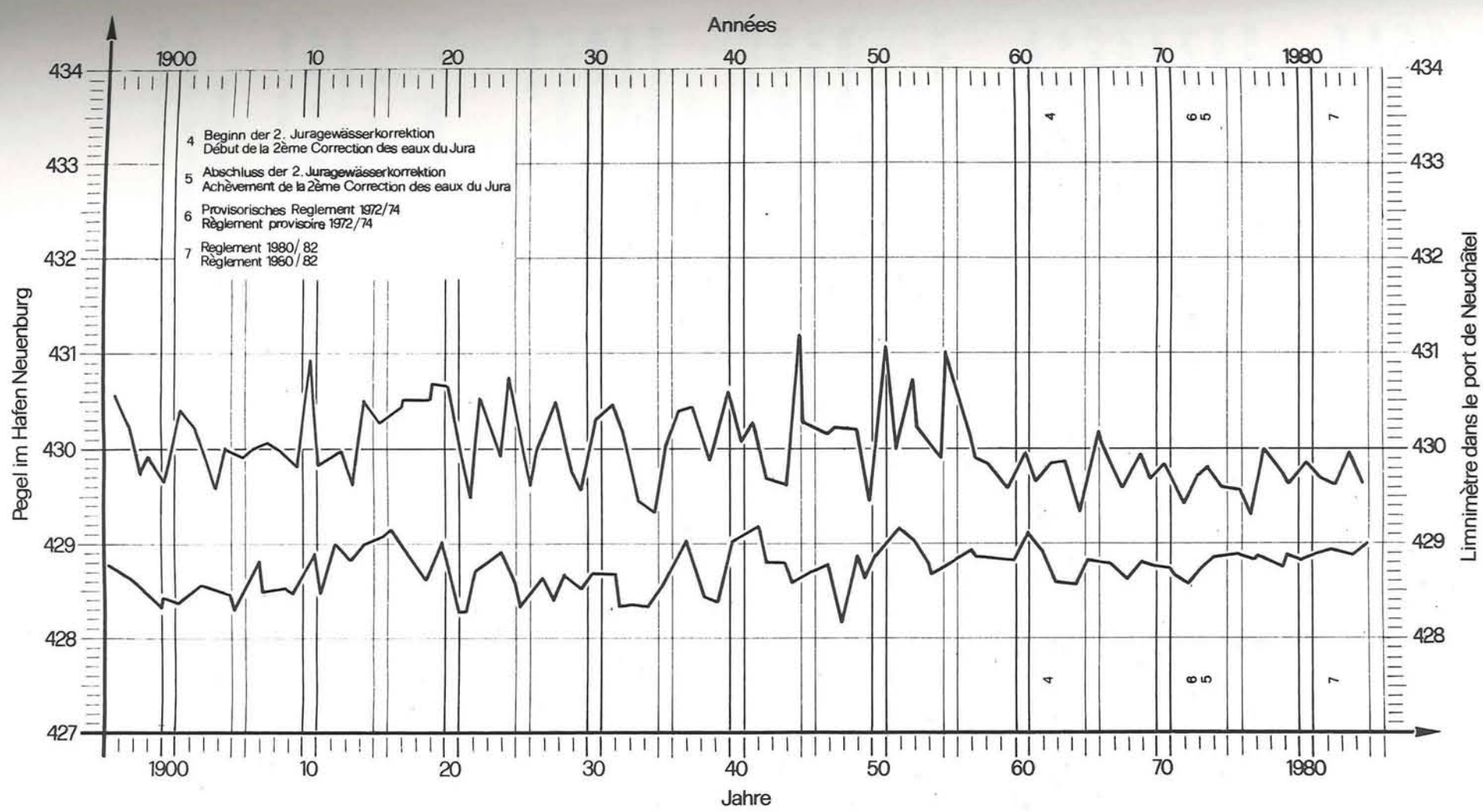


Figure 4b: Niveaux maximum et minimum annuels du lac, observés entre 1896 et 1984

Figur 4b: Die jährlich höchsten und tiefsten Seestände zwischen 1896 und 1984.

propagation sur la longueur du fetch, la vague reçoit l'énergie transmise par le vent. Cette énergie est alors transformée en chaleur, non mesurable, par la turbulence dans la zone de déferlement (en eau peu profonde) ou lors de l'impact de la vague contre une rive escarpée.

Aux grandes profondeurs du lac, le courant induit par les vagues n'est pas perceptible sur le fond. On parle ainsi de "vagues en eau profonde". A proximité de la rive, ce courant atteint par contre le sol et il s'agit dans ce cas de "vagues en eau peu profonde". Selon la théorie des vagues, cette dernière situation apparaît lorsque la profondeur d'eau devient inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la vague. Des forces d'entraînement agissent alors sur le matériau du fond et peuvent provoquer un transport si la granulométrie et la densité des sédiments sont suffisamment faibles.

3.2 Vents

Selon l'emplacement considéré sur la rive érodée entre Yverdon et Estavayer, la longueur du fetch pour le vent du sud-ouest varie entre 0 et 14 km (mesurée depuis l'extrémité ouest du lac), respectivement pour la bise entre 23 et 37 km (mesurée depuis l'extrémité est du lac). Les vagues d'importance prépondérante sont donc celles provoguées par la bise.

Sur le Plateau, l'expérience montre que les tempêtes durent souvent plusieurs heures et que des pointes de vitesse du vent dépassant 100 km/h peuvent être atteintes en cas extrême. Les vitesses moyennes du vent sont approximativement deux fois plus faibles et voisinent environ 15 m/s. En l'absence de mesures plus précises, les considérations qui suivent se basent sur ces estimations grossières.

3.3 Vagues

La relation existant entre la hauteur significative et la période des vagues, la longueur du fetch, la durée et la vitesse du vent, est montrée dans le diagramme universel établi par l'Institut royal de météorologie des Pays-Bas (figure 5):

Avec une longueur du fetch estimée à 35 km pour la bise, les caractéristiques suivantes peuvent être ainsi déterminées pour différentes vitesses du vent:

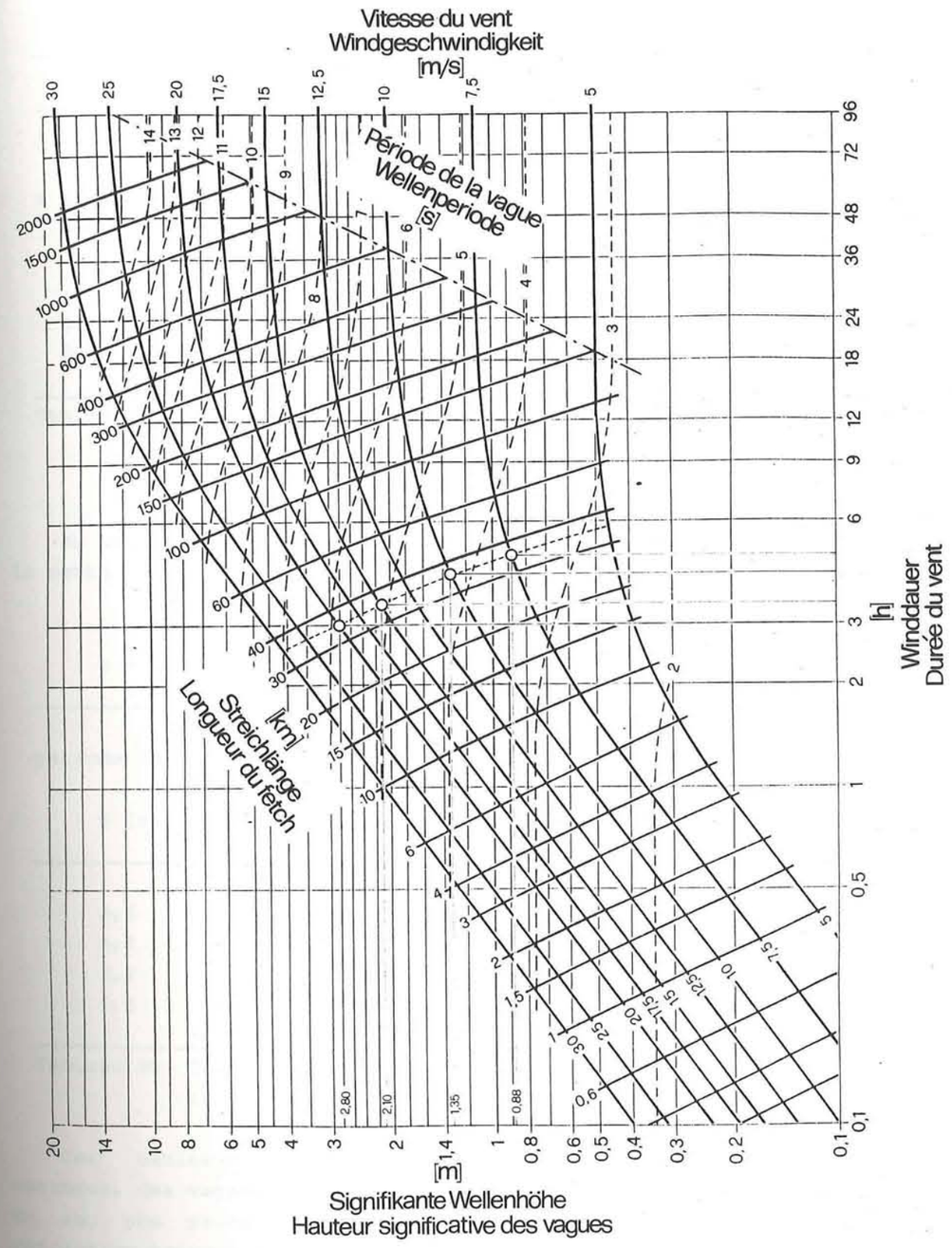


Figure 5 Relation entre la hauteur significative des vagues, la période des vagues, la longueur du fetch, la durée du vent et la vitesse du vent.

Figur 5 Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe, Wellenperiode, Streichlänge, winddauer und Windgeschwindigkeit.

vitesse du vent v [m/s],	[km/h]	intensité du vent selon Beaufort	hauteur significative des vagues $H_{1/3}$ [m]	période de la vague T [s]	durée du vent t [h]
7,5	27	4	0,88	3,6	5,0
10	36	5	1,35	4,2	4,5
15	54	7	2,1	5,2	3,6
20	72	8	2,8	5,8	3,0

Tableau 3a Ordre de grandeur des caractéristiques du vent et des vagues

En eau profonde, la vitesse de propagation (célérité), la longueur et la pente des vagues peuvent été calculées à l'aide des formules suivantes:

$$c = L_o/T = \sqrt{g\ L_o/2\pi} \quad \text{und} \quad L_o = T^2 g/2\pi = 1{,}56\ T^2$$

période de la vague T [s]	vitesse de propagation c [m/s]	longueur L_o [m]	pente $(H/L_o).100$ [%]
3,6	5,6	20	0,044
4,2	6,7	28	0,048
5,2	7,9	41	0,051
5,8	9,0	52	0,054

Tableau 3b Ordre de grandeur de la vitesse de propagation, de la longueur et de la pente des vagues

Ces tableaux montrent que, dans des situations météorologiques extrêmes, des vagues de hauteur supérieure à 2 m peuvent être engendrées. En eau peu profonde, les vagues s'amplifient encore et, par effet de réfraction lorsque le courant atteint le fond du lac, elles s'orientent parallèlement à la rive. On voit également que, dans les zones de faible profondeur (1 à 2 m) de la rive sud du lac de Neuchâtel, des vagues relativement petites (longueur 2 à 4 m) suffisent déjà à induire un

courant perceptible sur le fond. En cas de fort vent et de tempête, des turbulences importantes sont engendrées sur toute la hauteur d'eau (zone de faible profondeur).

3.4 Courants induits par les vagues et transport des sédiments

Le mouvement du matériau sur le fond du lac dépend d'une part de la turbulence due aux vagues et, d'autre part, de la grosseur et de la densité des grains. Selon la théorie linéaire des vagues, les composantes des vitesses de l'écoulement induit par les vagues peuvent être calculées en chaque point de la profondeur d'eau. La vitesse d'écoulement peut alors être prise comme critère d'appréciation de la turbulence. En particulier, la valeur maximale de la composante horizontale de vitesse sur le fond du lac U_{xmax} (la composante verticale étant nulle) est donnée par l'expression [17]:

$$U_{x\ max} = \pi H/T \ \frac{1}{\sinh 2\pi d/L}$$

où H est la hauteur des vagues, T la période, d la profondeur d'eau et L la longueur d'onde des vagues.

Ces grandeurs et leur interdépendance sont reportées dans le diagramme de la figure 6. Les courbes 1 à 4, qui concernent les vagues dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3, indiquent la variation de la vitesse horizontale maximale sur le fond U_{xmax} avec la profondeur d du lac. L'expérience montre que des vitesses de 0.1 à 0.2 m/s suffisent déjà à mettre le sable en mouvement et à former les rides observées en eau peu profonde. Selon la figure 6, des vitesses de 0.7 à 2.5 m/s peuvent être attendues avec une profondeur du lac de 2 m. Le sable fin du fond (voir paragraphe 2.5) n'est pas à même de résister à la sollicitation provoquée par de tels courants. En cas de forte intensité des vagues, il est soulevé et mis en suspension jusqu'à des profondeurs du lac de plusieurs mètres.

La figure 7 indique quelles vitesses U_{xmax} sur le fond du lac sont engendrées à différentes vitesses du vent et longueurs du fetch. On constate que les valeurs de 0.1 à 0.2 m/s, critiques pour le début du transport de sable, sont déjà atteintes aux vitesses modérées du vent et à des longueurs du fetch de quelques km.

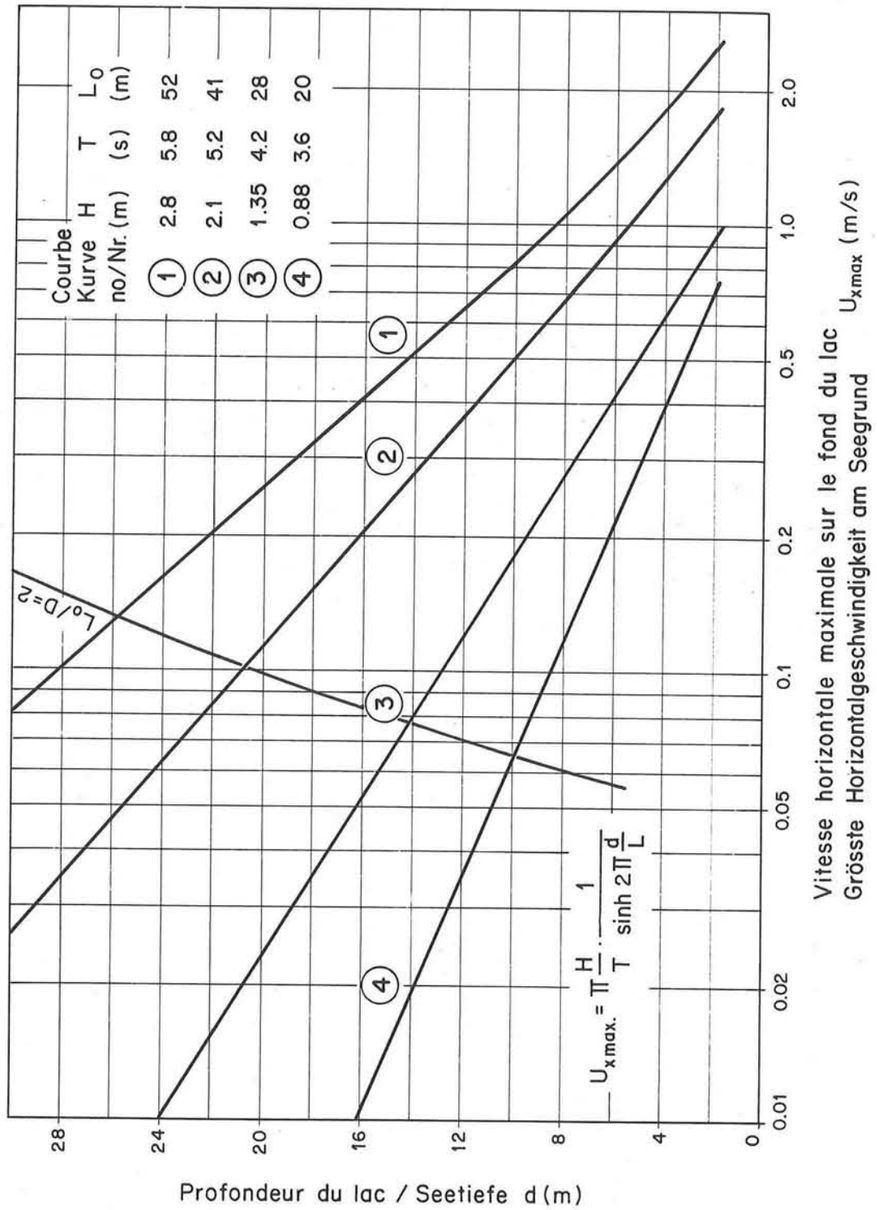


Figure 6 Vitesse horizontale maximale de l'écoulement induit par les vagues sur le fond du lac, en fonction de la hauteur, de la période, de la longueur d'onde des vagues et de la profondeur du lac.

Figur 6 Grösste wellenbedingte horizontale Strömungsgeschwindigkeit am Seegrund in Abhängigkeit von Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenlänge und Seetiefe.

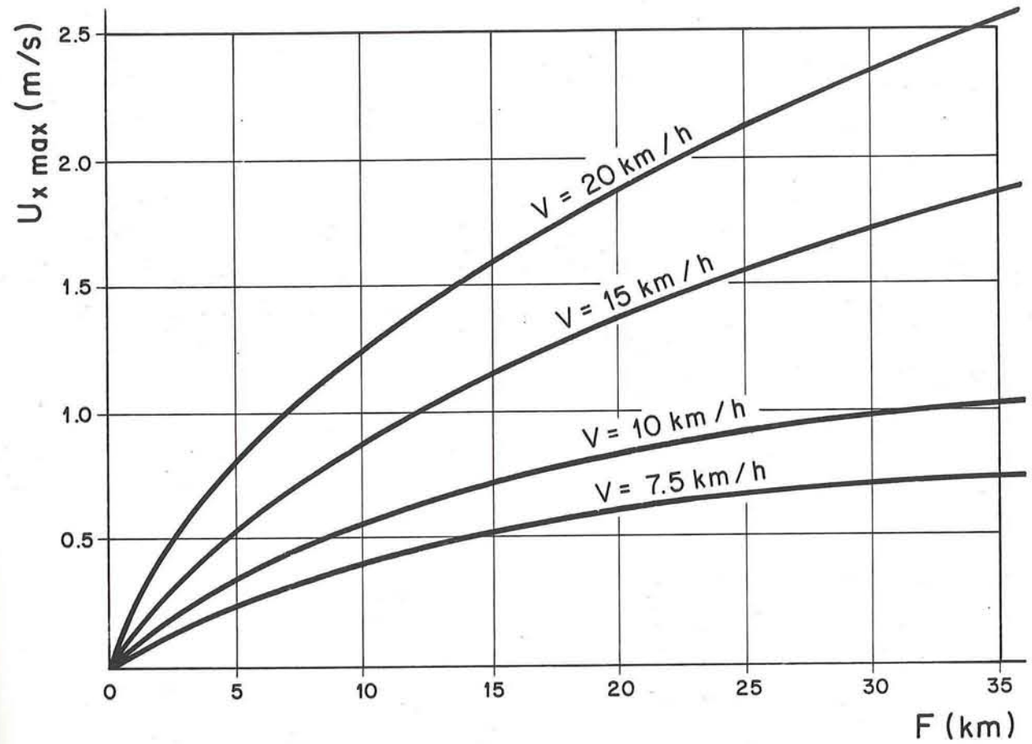


Figure 7 Maximum de la vitesse horizontale $U_{x\,max}$ du courant au fond du lac en fonction du fetch F et de la vitesse du vent v pour une profondeur de 2 m

Figur 7 Grösste Geschwindigkeit der Wellenströmung $U_{x\,max}$ am Seegrund in Funktion der Streichlänge F und der Windgeschwindigkeit v bei einer Wassertiefe von 2,0 m.

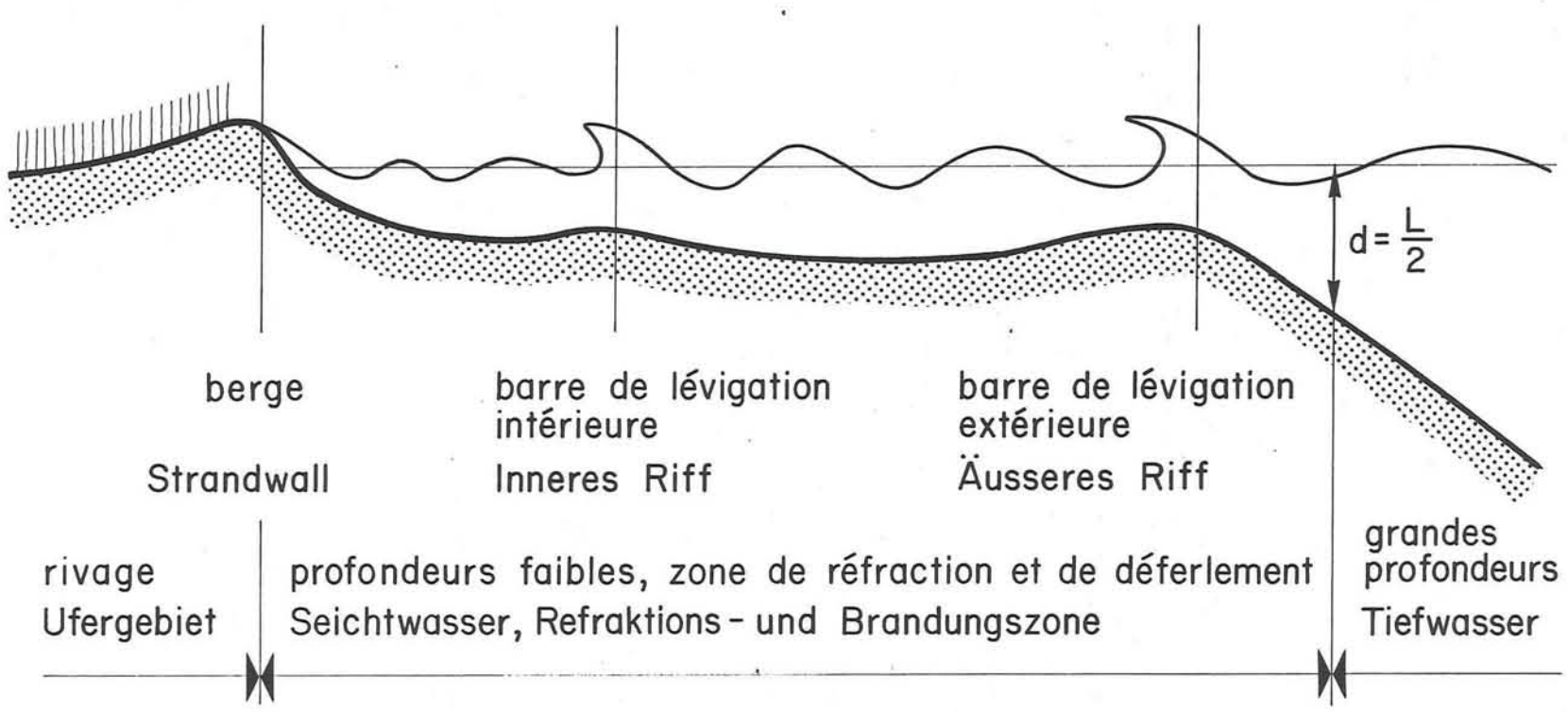


Figure 8: Coupe schématique de la rive en eau peu profonde

Figur 8: Schematischer Schnitt durch das Flachwassergebiet

La zone des eaux peu profondes de la rive sud du lac de Neuchâtel est représentée schématiquement à la figure 8. Cette zone s'étend à plus de 200 m vers le large. Elle devient même nettement plus importante à l'embouchure de la Menthue [1]. La profondeur du lac y est d'environ 1 à 2 m et le plan d'eau varie de max. 1.65 m depuis la deuxième correction des eaux du Jura (figure 3). Parallèlement à la diminution de la profondeur d'eau, la densité de l'énergie des vagues augmente en direction de la rive. Les vagues s'amplifient jusqu'à un état d'instabilité et se brisent le long de la "ligne de brisant extérieure". Si la zone des eaux peu profondes est large, les vagues peuvent se briser à nouveau sur une seconde ligne après avoir rechargé suffisamment d'énergie éolienne. Le reste de cette énergie est dissipé par déferlement sur le rivage.

Les mouvements du sable entraînant les plus gros déplacements de matériau se produisent sur les barres de lévigation et dans la zone de déferlement [18],[19]. A ces endroits, les vagues perdent le plus d'énergie en se brisant et en déferlant. Leur vitesse diminue et le sable en suspension forme des dépôts. Les masses d'eau situées entre la ligne de brisant et la rive sont soumises par les vagues à une force vive qui provoque une circulation dans la zone de faible profondeur (figure 9). Pour des raisons de continuité, la quantité d'eau s'écoulant en direction de la rive doit être égale à celle de l'eau s'en éloignant. Des courants de retour typiques ramènent ainsi l'eau vers le large.

Le transport du sédiment est provoqué d'une part par les courants de retour au large perpendiculaires à la rive. Ceux-ci entraînent le sable sur le fond ou en suspension vers la zone plus tranquille des eaux profondes, où il peut alors se déposer (figure 9a). D'autre part, la force vive des vagues frappant la rive de biais induit des courants longitudinaux de déferlement (figure 9b) qui causent également des mouvements du sédiment. Sur la rive sud considérée, le transport longitudinal dirigé vers la partie antérieure du lac est prépondérant. Il est dû à l'effet de la bise qui, à cet endroit, crée les plus grosses vagues. Le déplacement du sable s'effectue dans la zone de décélération et de déferlement des vagues. Celle-ci s'étend de la barre de lévigation extérieure (crête délimitant la zone des eaux peu profondes où le fond du lac s'incline fortement vers le large) à la ligne du rivage (figure 8). L'effet dû à la superposition du courant de retour et du courant de déferlement est reproduit schématiquement à la figure 9c. Les parties de la rive touchées par l'érosion et les zones supposées de formation des dépôts (des mesures topographiques permettant une comparaison n'existent pas) sont visibles à la figure 10.

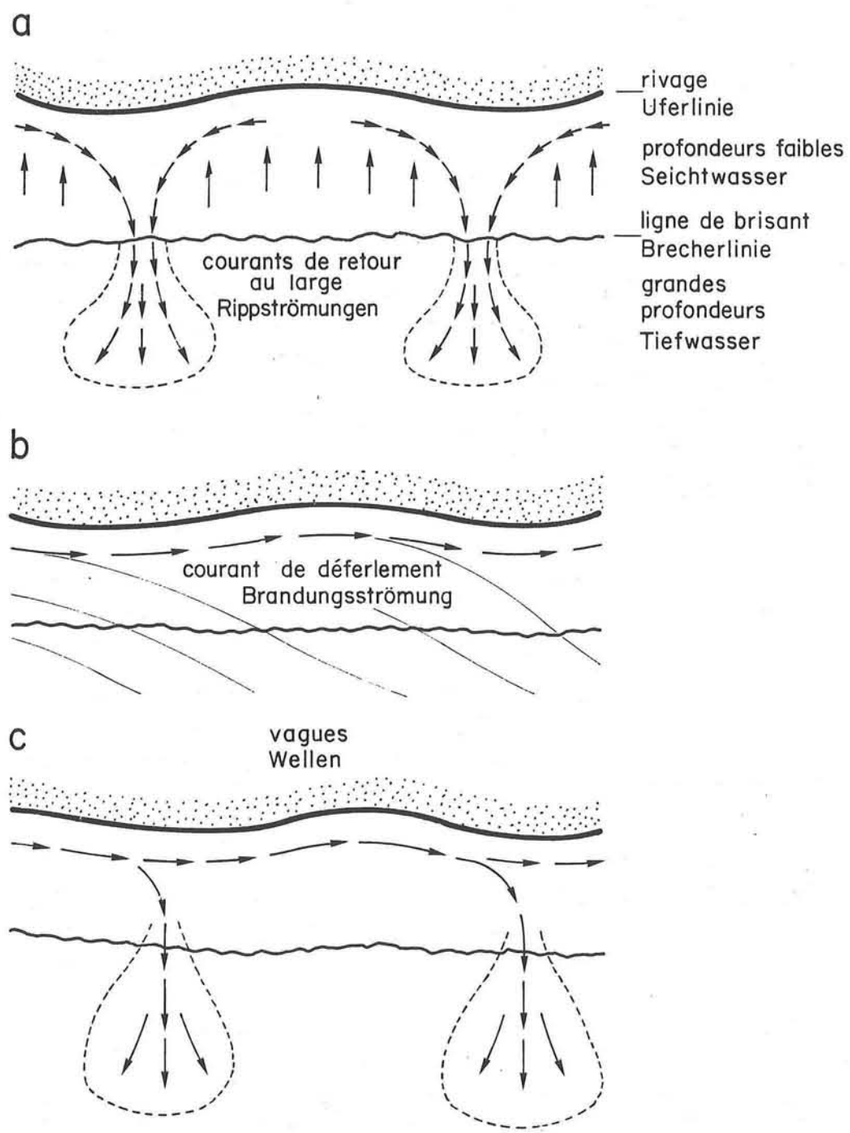


Figure 9 Courants induits par les vagues et mouvement du sable en eau peu profonde

Figur 9 Wellenerzeugte Strömungen und Sandwanderung vor dem Flachufer.

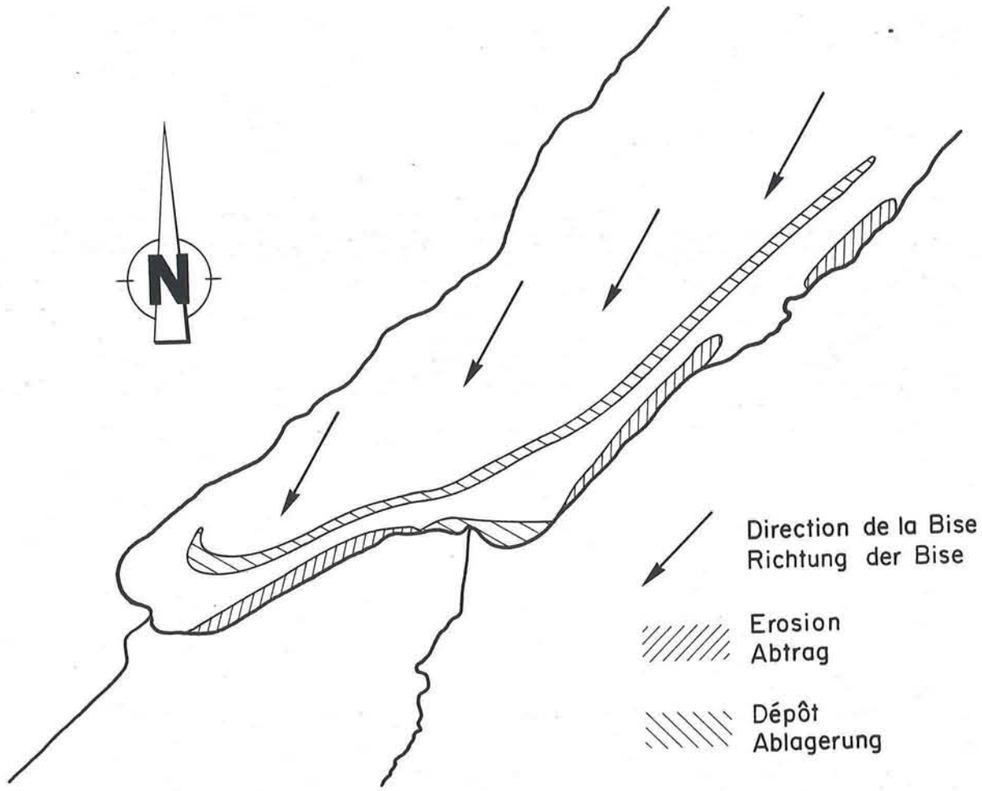


Figure 10 Zones d'érosion et de sédimentation du sable formant le fond du lac

Figur 10 Erosions- und Sedimentationsgebiete des Seebodensandes

Photo 12 A premier plan, la roselière de Champ-Pittet; au fond le lac de Neuchâtel avec turbidité en eau plus profonde et eau de couleur bleu-foncé au large (15 mai 1989).

Foto 12 Im Vordergrund das Schilfgebiet von Champ-Pittet, dahinter der Neuenburgersee mit Trübung im Flachwasser und dunkelblauer Farbe im Tiefwasser (15. Mai 1989).

Photo 13 Fortes vagues engendrées par la bise près d'Yvonand et qui provoquent le transport de sable (15 mai 1989).

Foto 13 Starke Biswellen bei Yvonand sorgen für den Sandtransport (15. Mai 1989).

Les observations faites "in situ" et décrites ci-après permettent de mieux comprendre la relation existant entre les vagues et les déplacements du sable.

L'auteur de ce rapport a recueilli les informations suivantes: A l'apparition de fortes vagues, la zone du lac située près de "La Motte" (420 m s.m.) devient trouble. Le phénomène peut être aisément observé des hauteurs du Jura. La Motte est un rehaussement du fond localisé au milieu du lac, entre Cortaillod et Portalban. La profondeur de l'eau à cet endroit ne dépasse pas 9 m. Il s'agit de courants induits par les vagues et qui mettent le sédiment en mouvement à cette profondeur. Ceci implique que la longueur des vagues soit supérieure au double de la profondeur d'eau, c'est-à-dire être d'au moins 20 m.

Une forte bise a soufflé sur le lac de Neuchâtel, le lundi de Pentecôte 15 mai 1989. La hauteur des vagues était telle que la majorité des amateurs de voile ont renoncé à faire une sortie. Alors que la zone des eaux profondes au pied du Jura présentait une couleur bleu-foncé, la zone des eaux peu profondes sur la rive sud a pris une teinte jaunâtre due à la mise en suspension du sable formant le fond. Ce phénomène a été observé sur une bande de plusieurs centaines de mètres de large (photos 12, 13). En eau turbulente, la profondeur de visibilité sous la surface n'a guère dépassé quelques décimètres. La turbidité constatée montre la présence de forts déplacements de sédiment à l'apparition de telles conditions météorologiques.

Lors de l'inspection des rives faite en bateau le 5 novembre 1987, l'auteur a pu observer sur le fond du lac la présence de petites rides de 5 à 20 cm de longueur d'onde. La profondeur d'eau était alors d'env. 1.5 m. On voit ainsi que les courants induits par des petites vagues de quelques mètres de longueur suffisent déjà à transporter le sable fin. Rappelons que ce transport a lieu dès que le vitesse du courant sur le fond dépasse 0.1 m/s.

Comparativement aux autres lacs suisses, le lac de Neuchâtel présente de nombreux tronçons de rive en eau peu profonde, ceci particulièrement dans sa partie sud-ouest. Pour une surface totale du lac de 217 km^2, les zones de profondeur d'eau inférieure à 2 m s'étendent sur 23.5 km^2, d'où un rapport de 11 %. Celles-ci sont caractérisées par un fond le plus souvent formé de sable fin. La grande superficie du lac favorisant la formation de grosses vagues, les zones sus-mentionnées sont vulnérables et particulièrement exposées à l'érosion. Mais au cours des millénaires, l'érosion de la rive elle-même a contribué à la formation de ces zones. Si les déplacements importants de sable ont bien lieu lors des tempêtes, on a

vu qu'un transport s'installe déjà sous l'effet de vagues de moyenne importance. Depuis l'abaissement du niveau du lac ayant suivi la première correction des eaux du Jura (vers 1880), la quantité de sable prélevé par érosion à la rive, respectivement à la zone de faible profondeur d'eau, puis transporté vers le large représente un ordre de grandeur de plusieurs millions de mètres cube.

4. Morphologie de la rive sud du lac

4.1 Etat des connaissances

Actuellement, le mécanisme de l'érosion d'une rive est généralement connu sur le plan qualitatif. Comme indiqué plus haut, cette problématique a été présentée dans un travail de recherche détaillé et soigné [3]. Les descriptions et interprétations que celui-ci contient sont également appuyées par l'auteur du présent rapport. On renoncera ici à des répétitions peu utiles.

Plusieurs nouvelles questions se posent quant à l'évolution de la rive menacée par l'érosion:

a) Quel espace de temps a-t-il fallu pour que la rive soit modifiée jusqu'à son état actuel?

b) Dans quelle mesure ces processus sont-ils imputables à l'action de l'homme?

c) Une stabilisation de la rive (ou en quelque sorte un état d'équilibre) peut-elle être attendue dans un proche avenir?

d_1) En cas de réponse positive à la question c: comment se présente cet état d'équilibre?

d_2) En cas de réponse négative à la question c: la rive menacée peut-elle être stabilisée par la prise de mesures d'ordre constructif? Si oui, quelles sont-elles?

Les paragraphes qui suivent abordent ces questions.

4.2 Le recul de la rive depuis 1880

A l'aide des données topographiques disponibles (paragraphe 2.2, tableau 1), le déplacement de la rive depuis 1880 a été évalué. A cet effet, la position de la rive donnée dans les différentes éditions annuelles des cartes a été relevée et reportée sur un calque original à l'échelle 1:25'000. Ce travail de longue haleine a fourni ainsi la base à une comparaison optique de l'évolution de la rive (annexe 2 A à 2 D). Malgré le soin apporté à l'investigation, quelques incertitudes ou imprécisions subsistent quant à la position exacte des lignes de rive:

- la détermination exacte de la position de la rive dans le terrain est souvent difficile, plus particulièrement où celle-ci traverse des roselières. L'interprétation propre à divers topographes se répercute dans l'établissement des cartes.

- lorsque la berge présente une faible pente, la position de la ligne de rive dépend fortement de celle du plan d'eau au moment du relevé. Dans la nouvelle Carte nationale, la rive indiquée est donnée de manière uniforme par le niveau d'eau moyen du lac. Selon les informations de l'Office fédéral de topographie, aucune réglementation uniforme n'existe par contre pour l'Atlas Siegfried. De plus, dans le relevé de Manuel et Durheim fait en 1880, la ligne de rive prise en considération n'a pas été définie.

- un décalage temporel entre la campagne topographique et l'établissement des nouvelles cartes est inévitable. De ce fait, l'année de parution des cartes et celle du relevé lui-même peuvent être différentes.

- le report des données dans le calque original sus-mentionné a été réalisé à partir de copies xerox fournies par l'Office fédéral de topographie. De faibles distorsions et décalages inhérents à la reproduction sont à prendre en considération.

- l'élaboration manuelle du calque original n'est pas entièrement exempte de petites imperfections.

Pour les raisons suivantes, peu d'informations valables ont pu être tirées des photographies aériennes (paragraphe 2.4):

- l'échelle des copies photographiques n'est pas uniforme, à savoir 1937: 1:15120; 1954: 1:19020; 1968: 1:22380; 1974: 1:24240; 1975: 1:24480

Elle est de plus distordue par la prise de vue à des altitudes de vol différentes.

- le pouvoir de résolution des photographies dans la zone de la rive est insuffisant.

- les niveaux du lac correspondant aux prises de vue sont partiellement inconnus par manque d'information sur la date exacte de celles-ci.

- la période d'observation aérienne est sensiblement plus courte que celle des relevés topographiques. Les plus anciennes vues ne sont pas antérieures à 1937.

- la comparaison directe du stade d'évolution des rives ne peut être effectuée que de façon incomplète dans le temps et l'espace (voir figure 1).

La période d'observation s'étendant sur environ 100 ans, il n'est donc pas nécessaire de se concentrer sur des petits intervalles de quelques années et sur des détails de faible importance dans l'analyse de l'évolution des rives. Le but poursuivi est l'obtention d'ordres de grandeur et la définition de tendances éventuelles dans le recul constaté de ces rives.

La période totale d'observation a été subdivisée en 4 intervalles, à savoir:

A 1880 - 1894: - Période de la 1 ère correction des eaux du Jura (1868-1891) légèrement prolongée. Selon les maxima et minima du niveau du lac indiqués au paragraphe 2.6, figure 4a, l'abaissement de ce dernier était déjà réalisé en 1880.

B 1894 - 1926/32: - Intervalle de 32 à 36 ans, pendant lequel la rive ne s'est que peu modifiée.

C 1926/32-1956/57: - Intervalle de 27 à 30 ans précédant la 2 ème correction des eaux du Jura (1962 à 1973)

D 1956/57-1974/81: - Période de 17 à 24 ans, englobant la 2 ème correction des eaux du Jura.

Les dates sont fixées par les années d'émission des quelques cartes disponibles (tableau 1). Une subdivision en intervalles plus petits

n'aurait guère augmenté la précision de l'estimation car de relativement grandes erreurs de lecture et de transformation seraient apparues.

Le recul de la rive en fonction du temps a été établi sur la base des 4 intervalles A à D. Les résultats de cette mise en valeur sont présentés dans les tableaux 4a et 4b, respectivement sous la forme de diagrammes "temps-distance" pour 11 profils définis dans les figures 11a et 11b.

Six profils concernent le tronçon de la rive situé entre Yverdon et Yvonand. Ils coïncident avec les axes de coordonnées 540, 541, 542, 543, 544 et 545. Ils ne sont pas perpendiculaires à la ligne de rive mais coupent celle-ci sous un angle de 60° environ (voir résultats à la figure 11a).

Quatre autres profils sont répartis sur le tronçon Yvonand-Estavayer, tandis qu'un cinquième profil se trouve à 1 km au nord-est d'Estavayer. Ces 5 profils, pratiquement perpendiculaires à la ligne de rive, ont été choisis de manière à couper en deux les angles formés respectivement par les axes de coordonnées 184/549, 185/550, 186/551, 187/552 et 189/556 (voir résultats à la figure 11b).

L'ampleur du recul de la rive ayant eu lieu dans le premier intervalle A est particulièrement visible sur les figures 10a et 10b ainsi que dans l'annexe 2 A. Pendant cette période, allant de 1880 à 1894 et précédée de l'abaissement du lac d'env. 3 m consécutif à la 1 ère correction des eaux du Jura, la rive s'est déplacée par endroits jusqu'à 200 m en direction des terres. A Champ-Pittet (profil 541), une anse de 400 m de profondeur s'est même formée (annexe 2 A).

Hormis les documents topographiques mentionnés, aucun renseignement ni aucune mesure plus précise décrivant l'évolution de la rive à cette époque ne sont disponibles. Des nivellements et des profils de la zone des rives relevés à différentes années manquent et ne permettent ainsi aucune comparaison. Pour ces raisons, les considérations qui suivent conservent uniquement le caractère d'hypothèses.

Dans une première phase, l'abaissement du lac provoque un avancement de la rive vers le large qui atteint quelques centaines de mètres sur certains tronçons (figures 12 a et 12 b). Plusieurs km^2 de terrain sont gagnés sur la superficie du lac. Mais le sol nouvellement émergé est constitué de sable fin encore saturé d'eau. Parallèlement au phénomène de drainage qui peut durer plusieurs décennies, la charge exercée par les couches supérieures asséchées du sol augmente. La suppression de la poussée d'Archimède sur le matériau engendre ainsi des tassements

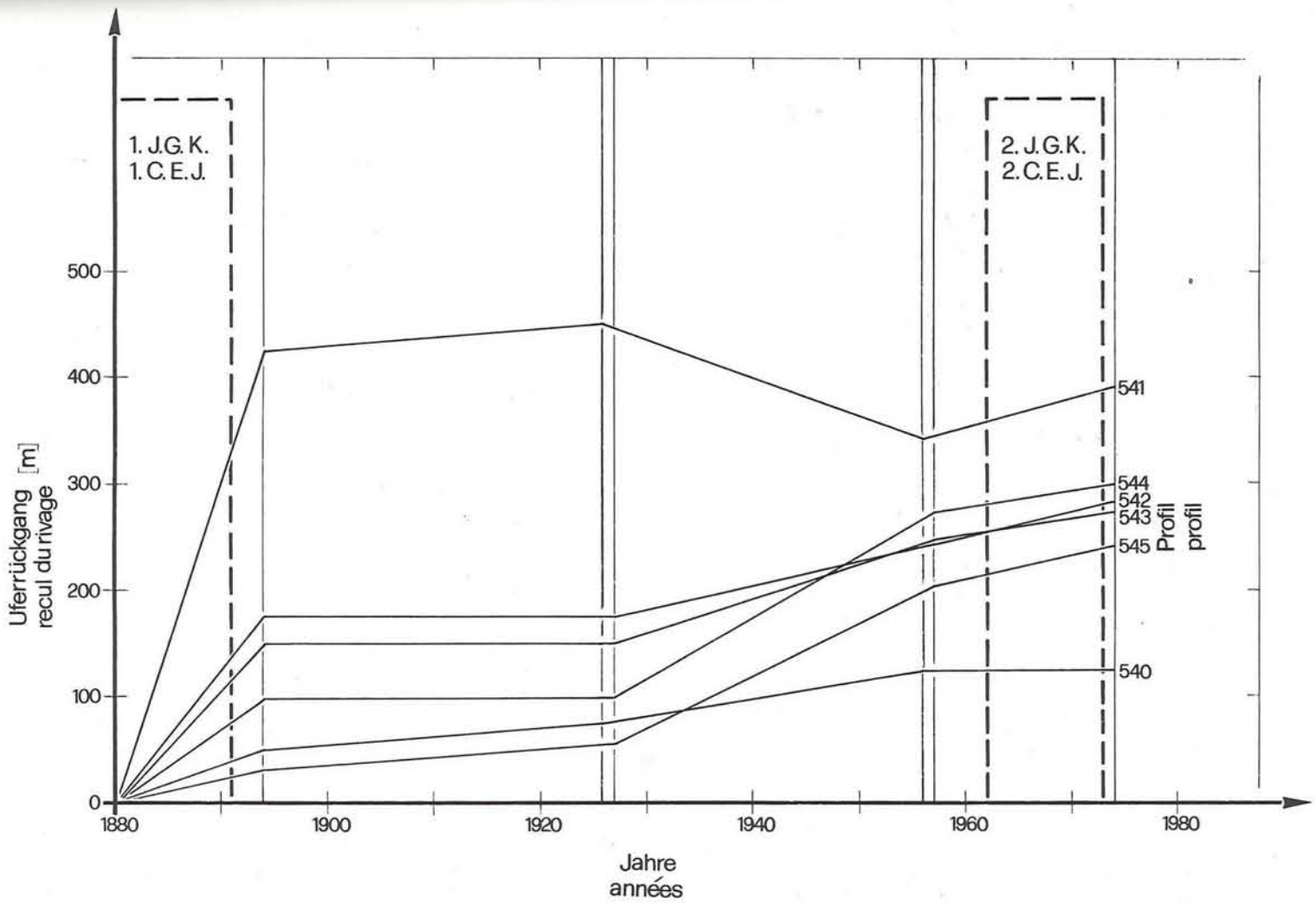


Figure 11a: Recul du rivage, observé pendant la période allant de 1880 à 1973, dans 6 profils en travers choisis entre Yverdon et Yvonand

Figur 11a: Uferrückgang in 6 ausgewählten Querprofilen zwischen Yverdon und Yvonand in der Zeit von 1880 bis 1973.

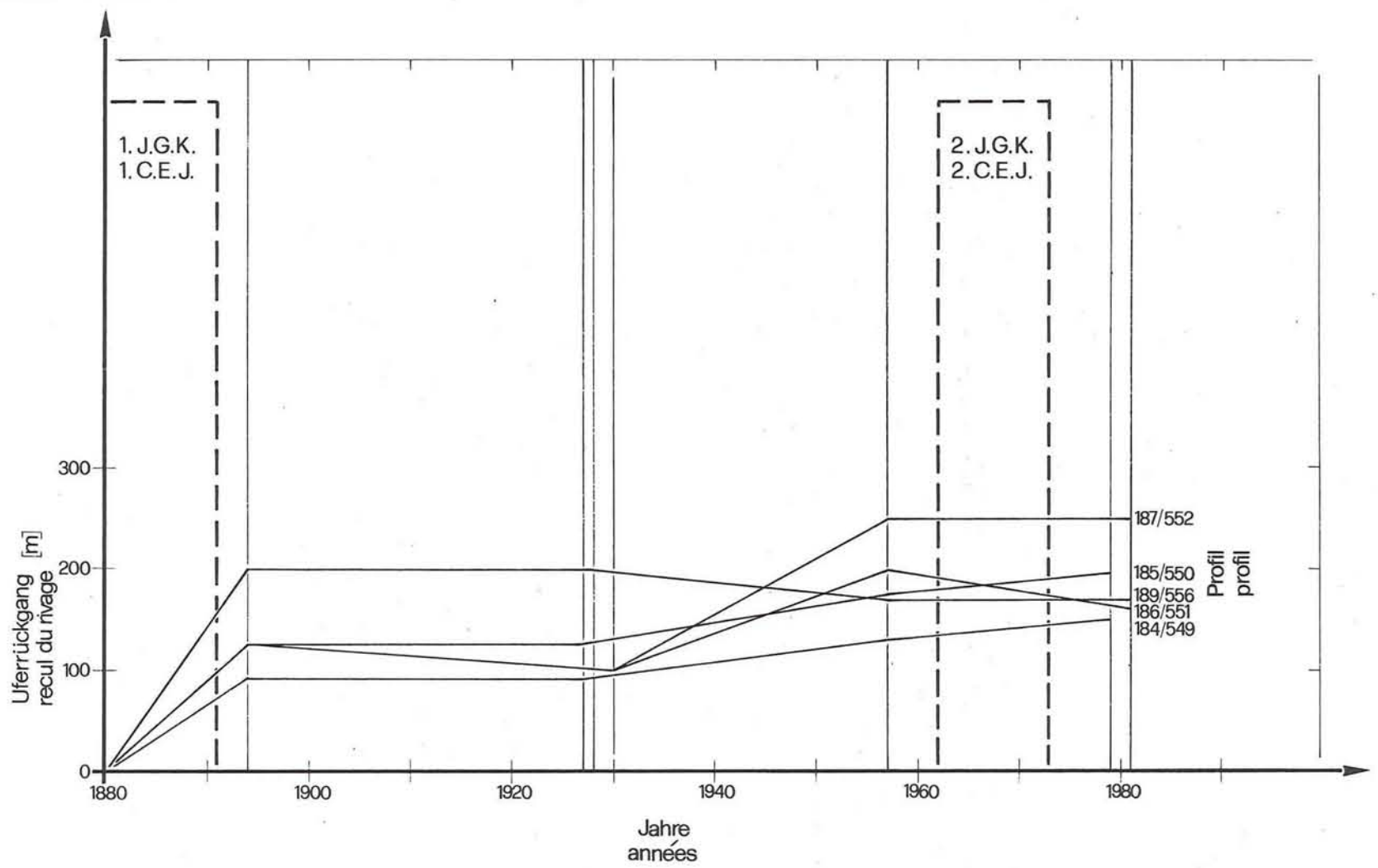


Figure 11b: Recul du rivage, observé pendant la période allant de 1880 à 1981, dans 4 profils en travers choisis entre Yvonand et Estavayer

Figur 11b: Uferrückgang in 4 ausgewählten Querprofilen zwischen Yvonand und Estavayer in der Zeit von 1880 bis 1981.

Intervalle	Profil/Profil	540	541	542	543	544	545
----------	Année/Jahr	1880	1880	1880	1880	1880	1880
	Feuille/Blatt		R. Manuel , A. Durheim				
	l [m]	-50	-425	-175	-150	-100	-30
A	t [a]	14	14	14	14	14	14
	l/t [m/a]	-3,6	-30,4	-12,5	-10,7	-7,1	-2,1
----------	Année/Jahr	1894	1894	1894	1894	1894	1894
	Feuille/Blatt	293	293	287	287	287	287
	l [m]	-25	-25	--	--	--	-25
B	t [a]	33	33				33
	t/l [m/a]	-0,8	-0,8	--	--	--	0.8
----------	Année/Jahr	1926/31	1926/31	1927	1927	1927	1927
	Feuille/Blatt	293	293	287	287	287	287
	l [m]	-50	+110	-70	-100	-175	-150
C	t [a]	29	29	30	30	30	30
	t/l [m/a]	-1,7	+3,8	-2,3	-3,3	-5,8	-5,0
----------	Année/Jahr	1956	1956	1957	1957	1957	1957
	Feuille/Blatt	1203	1203	1183	1183	1183	1183
	l [m]	--	-50	-40	-25	-25	-35
D	t [a]		18	17	17	17	17
	t/l [m/a]	--	-2,8	-2,4	-1,5	-1,5	-2,1
----------	Année/Jahr	1974	1974	1974	1974	1974	1974
	Feuille/Blatt	1203	1203	1183	1183	1183	1183

Tableau 4a Détermination du diagramme "temps/distance" pour le recul de la rive dans 6 profils situés entre Yverdon et Yvonand
l = recul de la rive, t = Intervalle de temps

Intervalle	Profil/Profil	184/549	185/550	186/551	187/552	189/556
----------	Année/Jahr	1880	1880	1880	1880	1880
	Feuille/ Blatt			P. Manuel, A. Durheim		
	l [m]	-90/+140	-125/+140	-125	-125	-200/+225
A	t [a]	14	14	14	14	14
	l/t [m/a]	-6,4	-8,9	-8,9	-8,9	-14,3
----------	Année/Jahr	1894	1894	1894	1894	1894
	Feuille/ Blatt	287	287	326	326	324
	l [m]	--	--	+25	+25	--
B	t [a]			36	36	
	l/t [m/a]	--	--	+0,7	+0,7	--
----------	Annnée/Jahr	1927/30	1927/30	1930/32	1930/32	1928/30
	Feuille/ Blatt	287	287	326	326	324
	l [m]	-40	-50	-100	-150	+30
C	t [a]	30	30	27	27	29
	l/t [m/a]	-1,3	-1,7	-3,7	-5,6	+1,0
----------	Année/Jahr	1957	1957	1957	1957	1957
	Feuille/ Blatt	1183	1183	1183	1184	1184
	l [m]	-20	-20	+40	--	--
D	t [a]	22	22	24	24	
	l/t [m/a]	-0,9	-0,9	+1,7	--	--
----------	Année/Jahr	1979	1979	1981	1981	1981
	Feuille/Blatt	1183	1183	1183	1184	1184

Tableau 4b Détermination du diagramme "temps/distance" pour le recul de la rive dans 5 profils situés entre Yvonand et Estavayer.
l = recul de la rive, t = intervalle de temps

importants qui conduisent à une nouvelle immersion d'une partie des rives (figure 12c). Le recul de celles-ci observé au cours des 15 années en question est dû pour une part importante à ce processus de consolidation.

D'autre régions assainies par l'abaissement du lac, telles que le "Grosses Moos", ont également subi des tassements [14] toutefois pour des conditions différentes dues à la présence de tourbe qui se décompose facilement. Leur ordre de grandeur est de 1 à 1.5 m. En 1920, ces derniers atteignaient 0.70 m puis 1 m en 1960. Le phénomène n'est pas encore complètement achevé à l'heure actuelle.

La nouvelle rive n'étant pas encore protégée par une couche dense et résistante de végétation, les vagues ont facilement provoqué son érosion et transporté le sable vers le large.

Lors de la période suivante (invervalle B, 1894 - 1926/32), aucune modification sensible de la rive n'a pu être constatée (figures 11a, 11b, annexe 2B). La profondeur d'eau à proximité immédiate de celle-ci devait vraisemblablement être inférieure à la profondeur actuelle. Dans cette zone, une forte atténuation des vagues a eu lieu, réduisant ainsi l'énergie responsable de l'érosion. Par contre, le fond du lac en eau peu profonde s'est progressivement abaissé au cours de ces décennies (figure 12d). Un volume de sédiments atteignant plusieurs millions de m^3 a été transporté. Les courants parallèles à la rive provoqués par les vagues ont déplacé le sable vers l'extrémité ouest du lac et l'ont déposé devant les tronçons de rive orientés perpendiculairement à la direction de la bise. Il s'agit principalement de la région d'Yverdon et de l'embouchure de la Menthue à Yvonand.

Dans l'intervalle C, allant de 1926/32 à 1956/57, on constate une accélération de l'érosion des rives (annexe 2 C). La zone des eaux peu profondes s'étant progressivement abaissée à la suite du transport de matériau, les vagues ont frappé la rive avec une énergie croissante (figures 10 a et 10 b).

La deuxième correction des eaux du Jura (1962 - 1973) a été réalisée pendant la période définie par l'intervalle D (1956/57 - 1974). Elle avait pour objet une réduction du domaine de variation des niveaux du lac (figure 3). Le résultat obtenu est mis en évidence à la figure 4 b. L'abaissement des cotes maximales du plan d'eau a directement conduit à une diminution des plus grandes hauteurs rencontrées en eau peu profonde. Comme conséquence, les vagues, de plus en plus freinées par la réfraction et atténuées par un déferlement prématuré, perdent une partie importante de leur énergie avant d'avoir atteint la rive. Le taux d'érosion annuel

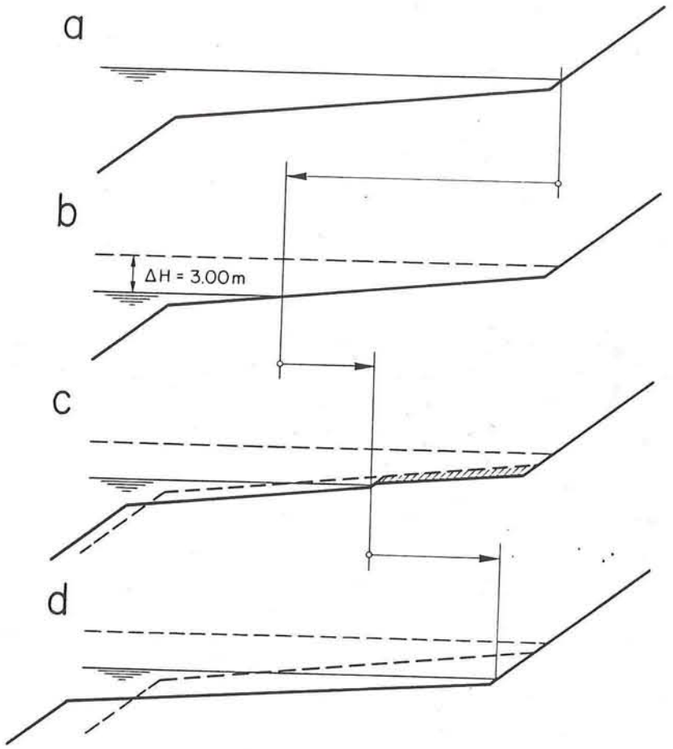


Figure 12 Stades d'évolution de la Grande Cariçaie. Développement du profil de la rive

a) Avant la première correction des eaux du Jura, le lac s'étendait jusqu'à la falaise.
b) L'abaissement d'environ 3 m du niveau du lac, consécutif à la première correction des eaux du Jura, a provoqué un déplacement de la rive de plusieurs centaines de mètres en direction du large.
c) Etat actuel: Après l'abaissement du lac, les vagues ont érodé la rive sablonneuse qui recule chaque année d'un à deux mètres. Parallèlement, le marais asséché est soumis à un lent tassement.
d) Sans la prise de mesures de protection, le reste de la Grande Cariçaie sera complètement érodé par les vagues au cours des 100 prochaines années et le lac atteindra à nouveau la falaise.

Figur 12 Stadien der Grande Cariçaie, Entwicklung des Uferprofils.

a) Vor der ersten Juragewässerkorrektion reichte der See bis an die Falaise.
b) Mit der Seespiegelabsenkung der ersten Juragewässerkorrektion um 3 m verschob sich die Uferlinie mehrere 100 m seewärts.
c) Aktueller Zustand: Nach der Seespiegelabsenkung erodierten die Wellen das sandige Ufer und verschieben dieses Jahr für Jahr um 1 bis 2 m landeinwärts. Gleichzeitig setzt sich das durch die Trockenlegung gewonnene Riedland langsam.
d) Ohne entgegenwirkende bauliche Massnahmen werden die Wellen den Rest der Grande Cariçaie bis in etwa 100 Jahren abgetragen haben und wieder zu bis den Falaises vorgestossen sein.

diminue, ce qui explique la réduction du recul de la rive observée dans cet intervalle de temps (annexe 2 D, figures 10 a et 10 b). Si l'hypothèse ainsi avancée devait être juste, la deuxième correction des eaux du Jura aurait alors contribué en principe à réduire l'érosion des rives au cours des dernières années.

Bien que l'importance du phénomène d'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel ait été reconnue depuis une décennie, il ne faut pas oublier que les lacs subissent un processus morphologique au cours des périodes géologiques, même en l'absence de toute influence exercée par l'homme.

Les considérations données ici ont tenté d'apporter une réponse à la question a) posée au paragraphe 4.1. Comme déjà indiqué, seules des bases de travail plus précises, telles que des nivellements et des relevés de profils, permettent d'aboutir à une meilleure connaissance du problème étudié. Il n'est toutefois pas certain que ces bases existent.

4.3 Influence de l'action de l'homme sur l'érosion des rives

Le recul important des rives constaté lors des 100 dernières années est sans aucun doute lié à l'abaissement du lac provoqué par la 1 ère correction des eaux du Jura. Grâce à celle-ci, le marais de la "Grande Cariçaie" s'est formé. A l'heure actuelle, le lac tend, par l'intermédiaire de l'énergie des vagues, à reconquérir cette zone et à retrouver l'emplacement primitif de sa ligne de rive au pied des parois de molasse (Falaise) situées plus au sud. De celles-ci provient le sable formant le fond du lac. Même ces parois n'ont pas constitué une délimitation fixe de la rive. Elles ont toutefois été soumises beaucoup plus lentement au processus d'érosion que les plages de sable actuelles.

4.4 Une stabilisation naturelle, un état d'équilibre des rives peuvent-ils être attendus?

En physique, on distingue les états d'équilibre statique et dynamique. Alors que l'état d'équilibre statique est caractérisé par l'absence de mouvement, l'état d'équilibre dynamique peut être comparé à un écoulement permanent. Si l'équilibre est rompu, des modifications locales apparaissent et l'état qui en résulte est dit non permanent.

La surface terrestre est soumise au processus de transformation continue due à l'érosion. Selon l'ampleur avec laquelle l'observation est faite dans le temps et l'espace, l'état considéré peut être statique,

dynamique ou non permanent. Sur une grande période, tous les processus géomorphologiques sont non permanents. Ce mode d'observation s'applique également à l'évolution du lit des cours d'eau et à celle des rives des lacs. Les modifications d'un milieu formé de matériau meuble sont plus rapides que celles concernant un matériau compact. Sur la rive sud du lac de Neuchâtel, avant la première correction des eaux du Jura, les vagues ont érodé les parois de molasse beaucoup plus lentement que la rive sablonneuse actuelle. Rapportées à la durée de vie d'un être humain, les modifications temporelles sont devenues plus évidentes.

Sans la prise de mesures constructives de protection, une stabilisation du profil des rives ne doit pas être attendue. Avec son sous-sol sablonneux, la "Grande Cariçaie" reste un potentiel susceptible d'être érodé par les imposantes vagues du lac de Neuchâtel. Le sable prélevé par le courant en eau peu profonde est continuellement remplacé par un apport venant du front de la rive. A l'apparition de forts vents et de hautes vagues, celle-ci recule par paliers en direction des terres. Le stade final de cette érosion ne peut être atteint que lorsque la ligne de rive se trouvera repoussée jusqu'au pied de la falaise. Cet état correspondrait à celui qui a précédé la première correction des eaux du Jura.

5. Conséquences à tirer des observations faites et recommandations pour la procédure future à suivre

Les résultats de la présente étude ne permettent pas d'attendre une interruption du processus d'érosion avant que le lac n'ait atteint les parois de molasse. Même le ralentissement du recul de la rive constaté depuis 1957/58 ne saurait tromper à ce sujet. Si des mesures constructives de protection contre l'érosion ne sont pas prises, il faut s'attendre à ce que le marais de la "Grande Cariçaie" soit entièrement érodé par les vagues et disparaisse dans un siècle environ (figure 11 d). Cette prévision est basée sur l'hypothèse que la vitesse d'érosion enregistrée jusqu'ici, soit en moyenne 250 à 300 m au cours des 100 dernières années, se maintienne (figures 10a et 10b).

Les relations compliquées entre les paramètres intervenant dans le processus d'érosion ne peuvent guère être quantifiées. Qualitativement, le phénomène observé sur la rive sud du lac de Neuchâtel est explicable. Des phénomènes identiques se produisent sur les côtes maritimes, par exemple à l'île de Sylt en Allemagne du Nord [18]. Les constatations et conlusions présentées dans ce rapport donnent toutefois une base de décision valable pour la procédure future à adopter.

Une décision de principe doit en effet être prise à brève échéance sur l'alternative suivante:

- la lutte, par des mesures constructives efficaces et d'une ampleur importante, contre le processus d'érosion des rives du lac doit-elle être poursuivie?

- la "Grande Cariçaie", désignée comme zone protégée, doit-elle être abandonnée à l'érosion due aux vagues?

Si cette décision devait exprimer la volonté de sauver la "Grande Cariçaie", la phase actuelle de prospection pourrait être close et les mesures actives de protection des rives déjà mises en oeuvre seraient à poursuivre et à intensifier. Par un contrôle périodique des résultats obtenus, le bien-fondé de ces mesures pourrait être alors jugé en connaissance de cause. De toute manière, la planification des travaux doit être réalisée par étappes et s'appuyer sur les observations intermédiaires faites in situ.

Au cours de la présente étude, un manque de données topographiques détaillées a été constaté. Tant les profils de la rive à différents stades d'évolution que la topographie du lac ou de la zone des rives à une grande échelle (p.ex 1:2000) et à faible équidistance des courbes de niveau (p.ex. 0.5 à 1 m) ne sont pas disponibles. Ces données sont non seulement nécessaires à l'établissement de pronostics mais surtout à la réalisation des contrôles d'efficacité des mesures constructives prises.

Depuis quelques années, la topographie de différents lacs suisses, ou de parties de ceux-ci, a été relevée à l'aide d'écho-sondes. Le tableau 5 ci-dessous donne des informations pouvant servir à la réalisation d'une campagne semblable concernant la rive sud du lac de Neuchâtel.

lac/partie du lac	année du relevé	échelle	équidistance des courbes de niveau	littérature
Walensee	1979	1 : 5000	1,0	[20],[21]
Ritomsee	1983	1 : 2000	2,0	[22]
Lago Maggiore/Maggia-Delta	1952/86	1 : 5000		[23]
Alpnachersee/Südufer	1987	1 : 2000	0,5	[24]
Sarnersee/Melchaa-Delta	1987	1 : 2000	0,5	[26]

Tableau 5: Exemples de relevés topographiques récents du fond de différents lacs suisses

6. Mesures constructives de protection

6.1 Généralités

Seules des mesures constructives appropriées permettent de combattre l'érosion des rives. Les ouvrages de protection doivent être à même de s'opposer aux effets du transport de sédiment engendré par les vagues. De plus, ils doivent s'intégrer le mieux possible au site et éviter d'être perçus comme des corps étrangers perturbateurs. Pour cette raison, le choix des solutions possibles est limité.

La protection envisagée a pour but d'interrompre, ou au moins de diminuer fortement, le transport de sable dans la zone proche de la rive. Le choix d'un concept valable présuppose la connaissance du mécanisme de ce transport. Les courants induits par les vagues et responsables des mouvements du matériau fin sont issus de phénomènes complexes dont la description ne peut être que qualitative et incomplète (paragraphe 3.4).

D'une part, le transport du sable a essentiellement lieu devant la berge dans la zone touchée par les courants longitudinaux et sur les lignes de brisant. En provoquant les plus hautes vagues, la bise est déterminante dans le phénomène d'érosion de la rive sud du lac. Les courants longitudinaux induits sont dirigés vers le sud-ouest, soit vers la partie antérieure du lac. D'autre part, les courants de retour, régulièrement espacés entre eux et quittant la rive perpendiculairement, entraînent également du sable vers le large par-dessus la ligne de brisant extérieure. Aucun calcul valable ne permet de décrire ce phénomène. Par contre, les observations faites in situ et en modèle peuvent conduire à une solution du problème posé [18]. Dans les paragraphes qui suivent, des mesures possibles de protection des rives sont présentées. Ces variantes ne constituent que la base de départ à une planification de détail intensive et nécessaire.

6.2 Môles en matériau remblayé aménagés en eau peu profonde

Si les hautes vagues peuvent être retenues et atténuées avant qu'elles n'atteignent la rive, le danger d'érosion de cette dernière est écarté. Un tel objectif pourrait être atteint par l'aménagement en eau peu profonde de môles en remblais isolés et alignés parallèlement à la rive menacée. Ceux-ci sont formés d'un matériau résistant à l'érosion. Leur emplacement le plus favorable coïncide avec la ligne de brisant extérieure ou avec une ligne parallèle plus rapprochée de la rive. La séparation ainsi créée entre les eaux profondes et peu profondes permettrait la formation d'une

zone tranquille, sur une largeur de 100 m ou plus, entre la rive elle-même et l'alignement des môles. Afin d'éviter dans cette zone la formation de vagues importantes parallèles à la rive, un cloisonnement par des épis transversaux distants d'env. 1 km devrait être aménagé (voir figure 13a).

Les espaces de quelques mètres séparant les môles longitudinaux sont sans autre acceptables, les vagues venant du large et pénétrant dans la zone tranquille n'étant pas en mesure de menacer la rive.

Le matériau provenant par exemple de l'excavation des tunnels de la route nationale qui longe la rive nord du lac pourrait être utlisé pour le remblayage. Un matériau plus grossier doit cependant être utilisé pour renforcer et protéger la surface des môles contre le déferlement des vagues et l'érosion des composantes plus fines. Le corps du môle lui-même doit être constitué de couches filtrantes répondant au critère de Terzaghi. L'utilisation de géotextiles peut aussi s'avérer rentable. Lors de l'établissement du projet, la capacité portante du sol et les tassements à attendre sont à prendre en considération.

Le couronnement des môles ne doit pas dépasser le niveau maximum du lac, à savoir la cote d'env. 430 m s.m. (figures 3, 4b). Ces môles, devant s'intégrer discrètement dans le site, peuvent représenter un obstacle dangereux et peu décelable pour les bateaux en cas de hautes eaux. Une signalisation conventionnelle est à prévoir.

6.3 Remblayage d'épis placés perpendiculairement à la rive

Un certain nombre d'épis d'env. 50 m de longueur protègent actuellement la rive à l'ouest d'Yvonand. Leur rôle consiste à réduire le déplacement du sable le long de cette rive. S'ils se prolongent au-delà de la ligne de brisant extérieure jusqu'en eau profonde, le déplacement en question est totalement interrompu. Entre les épis, une nouvelle ligne de rive inclinée par rapport à la rive primitive s'instable. Sa direction est approximativement parallèle à la crête des vagues qui déferlent (figure 13 b).

La fiabilité à long terme de tels épis ne peut être estimée par la théorie. Peu de données existent sur la formation des courants de retour entre les épis. Comme de tels ouvrages sont utilisés depuis plusieurs décennies, il paraît adéquat de tenir compte des expériences faites lors de l'établissement de nouveaux projets. Des questions importantes concernant le choix des tronçons de rive à protéger, la longueur des épis et la distance à prévoir entre ceux-ci, doivent être abordées.

6.4 Renforcement de la rive existante

A la demande du GEG, des troupes techniques de l'Armée ont renforcé diverses parties de la rive menacée à l'aide de rangées de pieux, de clayonnages et de fascines (photos 8, 9, 10). Ces moyens de protection sont à même de freiner l'érosion à court terme. Toutefois, seules les observations montreront si leur action reste efficace à longue échéance.

Les pronostics suivants, qu'il convient d'apprécier avec la prudence nécessaire, peuvent être formulés: En cas de fortes tempêtes, les rangées de pieux, relativement basses, sont submergées par l'impact des vagues. Ces rangées de pieux et les clayonnages qu'elles soutiennent ne pouvant assumer la fonction d'un filtre fin, leur action est comparable à celle d'un tamis grossier. A son retrait, l'eau de la vague prélève du sable fin de la berge et l'entraîne vers le lac à travers l'ouvrage de protection. Même si dans son ensemble le matériau de la berge est consolidé, il faut attendre une érosion de celle-ci à long terme. Le transport du sable pourrait être empêché par la mise en place d'un tapis géotextile à mailles fines et d'un coffre de galets entre la berge et la première rangée de pieux. Le filtre ainsi créé permettrait de retenir le sable tout en assurant l'écoulement de l'eau. Bien entendu, la croissance de bosquets et de buissons le long de l'ouvrage de protection est possible (figure 13 c).

Les courants dus aux vagues n'érodent pas seulement la berge. Dans la zone des lignes de brisant, des déplacements de sable se produisent. Les courants de retour entraînent le matériau vers les eaux profondes. Si l'apport en provenance de la berge est interrompu par des mesures constructives, un bilan négatif ne peut être évité. Pour cette raison, un abaissement du fond en zone des eaux peu profondes doit être attendu avec le temps. Une menace pour la stabilité de l'ouvrage de protection de la rive pourrait en résulter. Il convient ainsi de battre les pieux le plus profond possible.

Dans tous les cas, des contrôles périodiques de l'état du site devraient être entrepris. Sur la base de relevés du profil des rives, réalisés particulièrement à la suite de fortes tempêtes, des informations comparatives précieuses pourraient être acquises. Seule cette procédure permet de prendre des mesures appropriées et d'éviter des investissements erronés.

Pour des raisons liées à la protection de l'environnement et, compte tenu des frais de réalisation, une solution envisageant un aménagement massif des rives n'a à priori pas été retenue.

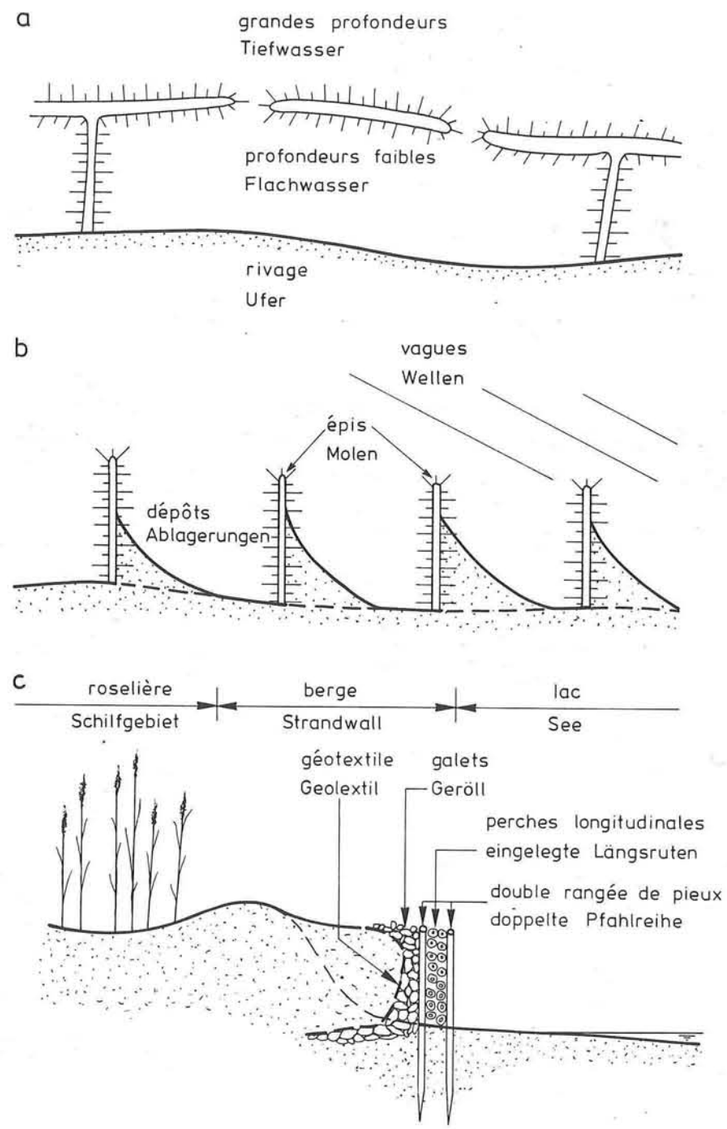


Figure 13: Variantes possibles pour la protection de la rive
a) Môles placés parallèlement à la rive, avec espaces intermédiaires et épis perpendiculaires destinés à amortir les grosses vagues.
b) Epis perpendiculaires à la rive servant à interrompre le mouvement du sable le long de celle-ci.
c) Consolidation de la rive menacée, par la mise en place de palissades avec remblai et tapis filtrant.

Figur 13 Mögliche Typen des Uferschutzes
a) Uferparallele Molen mit Unterbrüchen und Quermolen zum Abfangen der grossen Wellen
b) Senkrecht zum Ufer stehende Molen zur Unterbindung der Sandwanderung längs zum Ufer
c) Befestigung des gefährdeten Ufers mittels Palissaden und einer Hinterfüllung mit eingelegter Filtermatte

7. Résumé

Au cours des 100 dernières années, la rive sud du lac de Neuchâtel a été fortement érodée sous l'effet des vagues engendrées par les vents. A certains endroits, cette érosion s'étend jusqu'à 200 m en direction des terres. Si le phénomène devait continuer à évoluer librement, la zone naturelle de la Grande Cariçaie, déclarée site protégé, serait amenée à disparaître d'ici un siècle.

L'origine de ce recul des rives remonte à la première correction des eaux du Jura, entreprise entre 1868 et 1891. A la suite des travaux et selon le projet, les niveaux des trois lacs jurassiens se sont abaissés d'env. 3 m. Par cette mesure, le Grosses Moos et de grandes surfaces longeant les lacs ont été asséchés. Sur la rive sud du lac de Neuchâtel, le sol sablonneux primitivement immergé a favorisé la formation de la Grande Cariçaie aujourd'hui menacée. Par l'intermédiaire des imposantes vagues dues à la bise, le lac a aussitôt cherché à reconquérir son ancien territoire. L'examen d'anciennes cartes topographiques remontant jusqu'à 1880 montre que la moitié de cette besogne s'est déjà accomplie. Le recul de la rive est également renforcé par de lents tassements du terrain caractéristiques des régions drainées. Consécutivement à la suppression de la poussée d'Archimède, la partie du sol mise à sec exerce une charge supplémentaire sur les couches inférieures.

L'érosion des rives est favorisée lorsque les niveaux du lac sont élevés. Dans la zone des eaux peu profondes, une augmentation de la hauteur d'eau se traduit par le fait que les vagues déferlent moins et subissent un ralentissement moins prononcé avant d'atteindre la rive. La deuxième correction des eaux du Jura (1962 - 1973) avait pour objet de réduire le domaine de variation des niveaux du lac et d'abaisser la cote des hautes eaux. Depuis lors, l'érosion annuelle a quelque peu diminué (figures 11 a, 11 b). La processus d'érosion poursuit cependant son évolution.

Sans la prise de mesures constructives appropriées, l'érosion progressive de la Grande Cariçaie jusqu'aux falaises de molasse ne peut être empêchée. La réalisation par étapes de la protection des rives, avec contrôle permanent de l'efficacité obtenue, est à même de fournir les meilleurs résultats. Le problème posé est trop complexe pour que l'ensemble des mesures à prendre puissent être définies à priori avec précision. La succession, dans le temps, des démarches à entreprendre dépend des priorités que la menace actuelle des rives impose.

Le comportement des ouvrages déjà mis en place et leur influence sur le mouvement du sable doivent être sans cesse observés. Des relevés topographiques établis à l'aide de méthodes précises sont nécessaires pour apprécier l'évolution du phénomène d'érosion. Dans cette optique, les données topographiques encore manquantes concernant la partie sud du lac de Neuchâtel devraient être acquises sans retard. Il serait souhaitable que les cartes à établir indiquent les courbes de niveau du lac avec une équidistance de 1 m, voire de 0.5 m. Des profils de la rive et de la zone située à proximité immédiate devraient également être disponibles. Sans ces documents d'appréciation, la réalisation optimale de la protection des rives n'est guère envisageable.

Zurich, le 14 février 1990/Ra

Laboratoire de recherches hydrauliques,
hydrologiques et glaciologiques de l'EPF Zurich

Pour la direction

A. Chervet
ing.dipl.EPFZ

Le chef du groupe
Hydraulique de l'environnement

Dr. A. Huber
ing. dipl. EPFZ

Adaptation du rapport en langue française:

Dr. F. Raemy, ing.dipl. EPFZ

Symboles/Legende

(voir figure 14, siehe Figur 14)

c	[m/s]	vitesse de propagation de la vague (célérité) Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
d	[m]	profondeur du lac Seetiefe
F	[km]	fetch Streichlänge
g	[m/s^2]	accélération de la pesanteur (9,81 m/s^2) Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
H	[m]	hauteur de la vague Wellenhöhe
L	[m]	longueur de la vague en eau peu profonde Wellenlänge im Seichtwasser
L_o	[m]	longueur de la vague en eau profonde Wellenlänge im Tiefwasser
t	[h]	durée du vent Winddauer
T	[s]	période de la vague Wellenperiode
U_{xmax}	[m/s]	maximum de la vitesse horizontale du courant au fond du lac Maximum der horizontalen Geschwindigkeitskomponente am Seegrund
v	[km/h]	vitesse du vent Windgeschwindigkeit

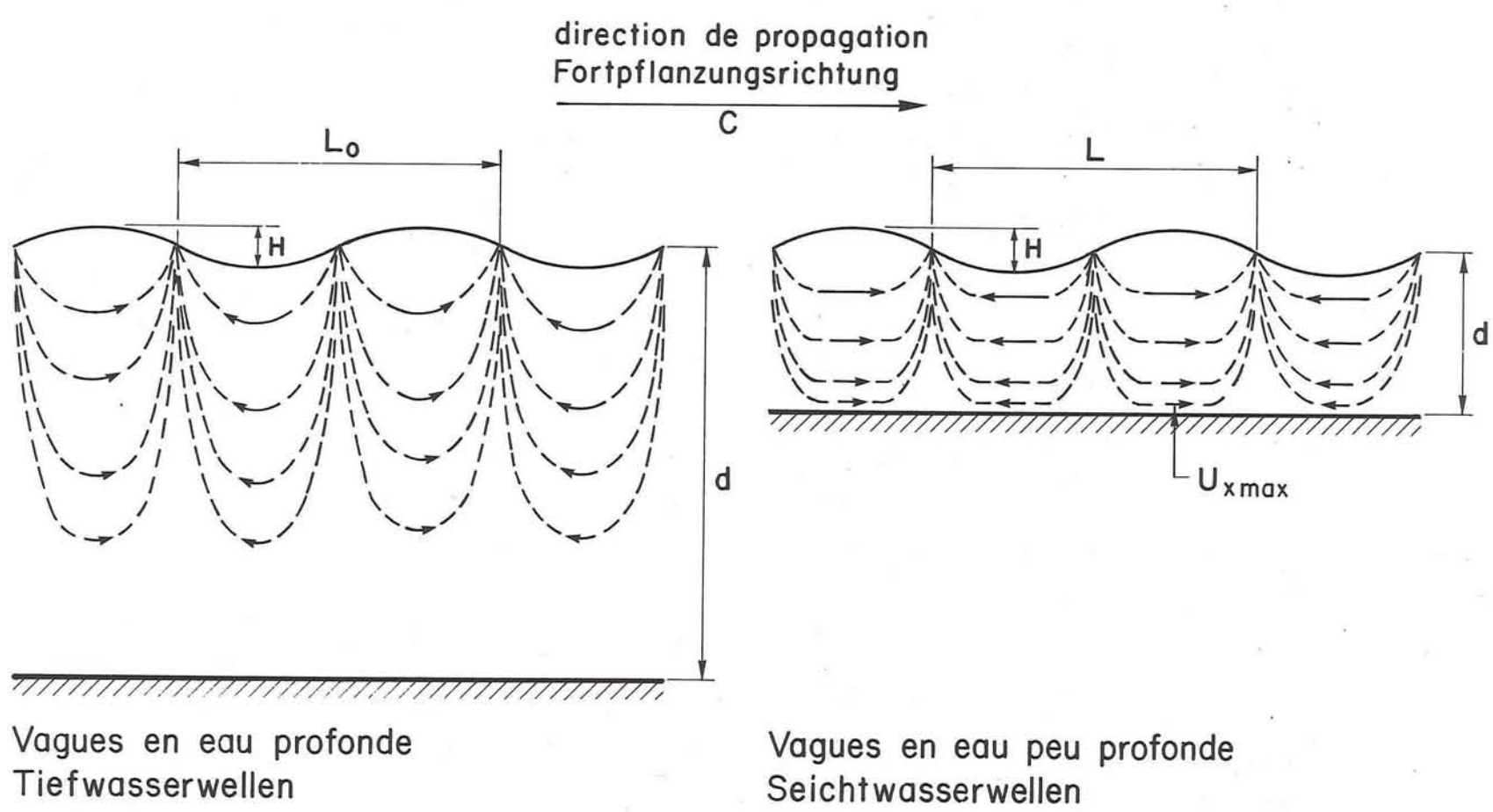


Figure 14: Schéma de définition des vagues en eau profonde, réspectivement en eau peu profonde. Courants induits par les vagues.

Figur 14: Definitionsskizze zu den Tief- und Seichtwasserwellen, Wellenströmungen.

Sources/Quellen

[1] Rollier M.
Antoniazza M.
Roulier C.
Plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel, Carte de la protection de la nature, 1 : 30'000, mai 1981

[2] Roulier C.
Plan de protection des rives du lac de Neuchâtel, étude préliminaire de l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel, étude No. 10, Ligue suisse pour la protection de la nature

[3] Dufour B.
Robin P.
Etude du recul d'une rive du lac de Neuchâtel (secteur compris entre Yverdon et Cheyres) Institut du Génie de l'environnement, EPFL, 1982

[4] Iseli Ch.
Imhof Th.
Bielersee 1987, Schilfschutz, Erhaltung und Förderung der Naturufer Verein Bielerseeschutz, Schriftenreihe Nr. 2

[5] Lachavanne J.B.
Jaquet J.M.
Juge R.
Perfetta J.
Zustand, Erhaltung und Schutz der Ufer des Vierwaldstättersees Herausgeber: BFL, BUS, Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, Uni Genf 1985

[6] Lachavanne J.B.
Choulat Ch.
Munteanu A.
Evolution de la basse plaine du Rhône, objet naturel d'importance nationale Bulletin Technique de la Suisse Romande, 101e année 1975, No. 18

[7] Dienst M.
Stark H.
Die Dynamik der Schilffront am Bodensee-Untersee von 1984 bis 1987 Mensch und Natur, Nr. 5, 1987

[8] Dittrich A.
Westrich B.
Bodenseeufererosion: Bestandesaufnahme und Bewertung, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Mitteilung Nr. 68, 1988

[9] Jäggi M.
Peter W.
Naturnahe Gestaltung einer Flussmündung, Hydraulische Modelluntersuchung für das Projekt eines Reussdeltas am Urnersee Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH, Mitteilung Nr. 68, 1983

[10] Statistisches Amt Biel — Windmessungen 1960

[11] Schweizerische Meteorologische Anstalt — Annalen, Jahrgänge 1971 bis 1980

[12] Section hydrométrique de l'Inspectorat fédéral des travaux publics — Observations hydrométriques suisses pour l'année 1890, Tableau de récapitulation, principaux résultats 1897

[13] Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie — Hydrologische Jahrbücher der Schweiz

[14] Stambach E. — Die Juragewässerkorrektion Schweizerische Technische Zeitschrift, Nr 24/25, 1970

[15] Müller R. — Die II. Juragewässerkorrektion, Biel, Juni 1959

[16] Office fédéral de l'économie des eaux — Effets du règlement de régularisation 1980/82 sur l'environnement, rapport et annexes, avril 1984

[17] Dep. of the Army Corps of Engineers — Shore Protection Manual, Vol. 1, U.S. Army, Coastal Engineering Research Center, 1977

[18] Gutsche H. — Ueber den Einfluss von Strandbuhnen auf die Sandwanderung an Flachküsten, Mitteilung des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover, Heft 20, 1961

[19] Niemeyer H. D. — Wellenerzeugte Strömungen und Sedimenttransport, Mitteilung des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, Heft 41, 1974

[20] Lambert A. — Das Delta der Linth im Walensee - ein Vergleich der Seegrundaufnahmen von 1931 und 1979, Wasser, Energie, Luft 1980, Heft 7/8

[21] Lambert A.
Schlund R.A.
Die topographische Neukartierung des Walensees
"Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik"
Heft 11, 1983

[22] Lambert A.
Pfeiffer Ch.
Erosion und Sedimentation im Ritomsee
Ergebnisse der Neuvermessung vom September 1983
Wasser, Energie, Luft 1985, Heft 7/8

[23] Lambert A.
Seegrundvermessungen im Lago Maggiore,
Das Wachstum des Maggia- und Ticino/Verzasca-Deltas von 1890 bis 1986
Wasser, Energie, Luft 1988, Heft 1/2

[24] Schlund R.A.
Alpnachersee, Topographie 1 : 2000
mit Konzessionsgebiet der Sand und Kies AG - Alpnachstad,
Baudepartement des Kantons Obwalden 1987

[25] Lambert A.
Das Delta der grossen Melchaa im Sarnersee
Wasser, Energie, Luft 1989, Heft 4/5

Aperçu de l'annexe 1
Uebersicht zum Anhang 1

Répartition des vents à Chables (Lac de Neuchâtel)
Mesures de l'Institut suisse de météorologie.
Trois mesures effectuées par jour.

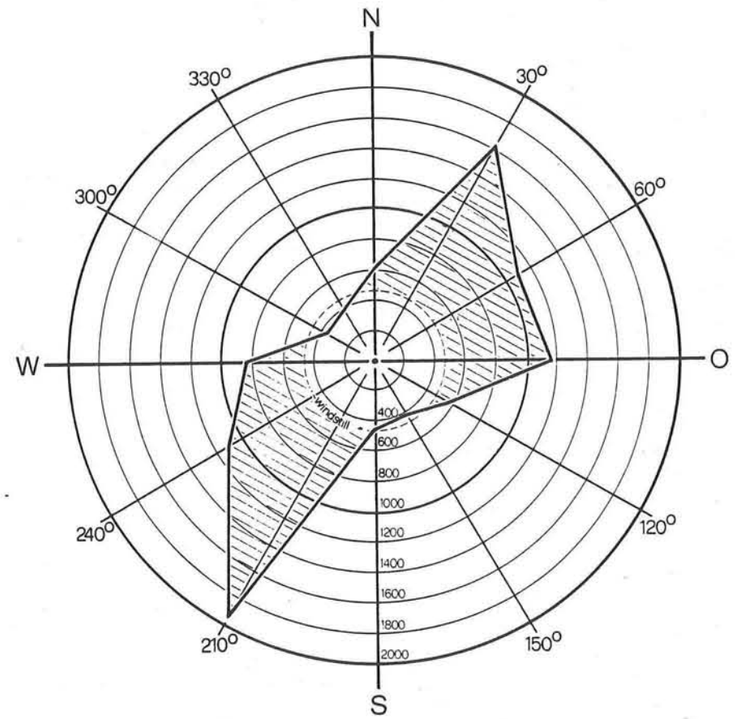
Windverteilung in Chables (Neuenburgersee)
Messungen der Meteorologischen Zentralanstalt
3 Ablesungen/Tag

Annexe Anhang	période Zeitinterwall
1A	1971 - 1980 I - XII moyens/mittel
1B 1	1971 - 1980 IV - IX " "
2	1971 - 1980 X - III " "
1C 1	1971
2	1972
1D 1	1973
2	1974
1E 1	1975
2	1976
1F 1	1977
2	1978
1G 1	1979
2	1980

Annexe 1A
Anhang 1A

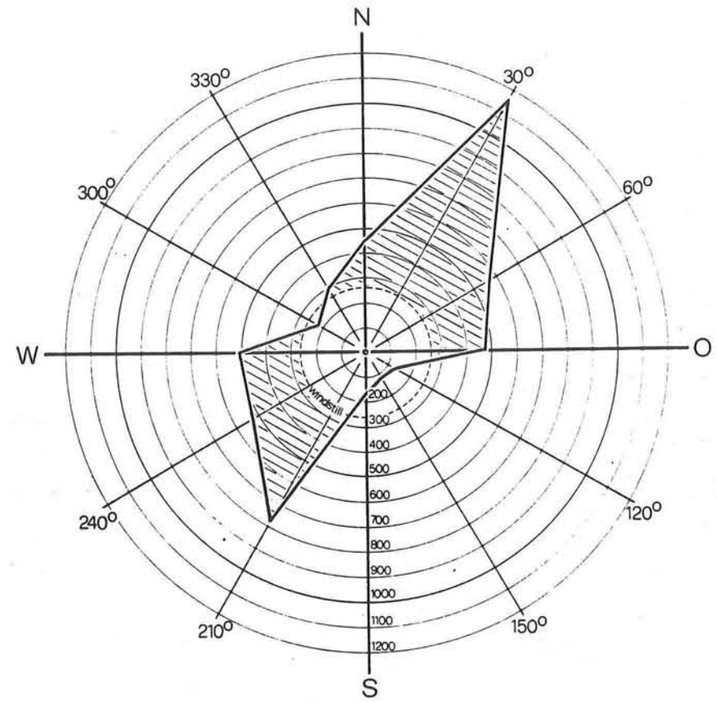
1.

1971 – 1980



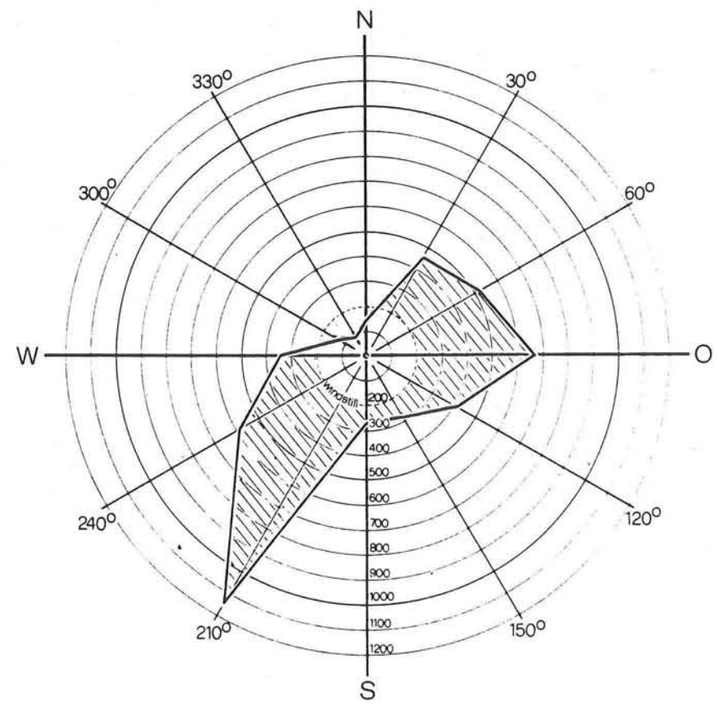
Annexe 1B
Anhang 1B

1.



April – Sept.
1971 – 1980

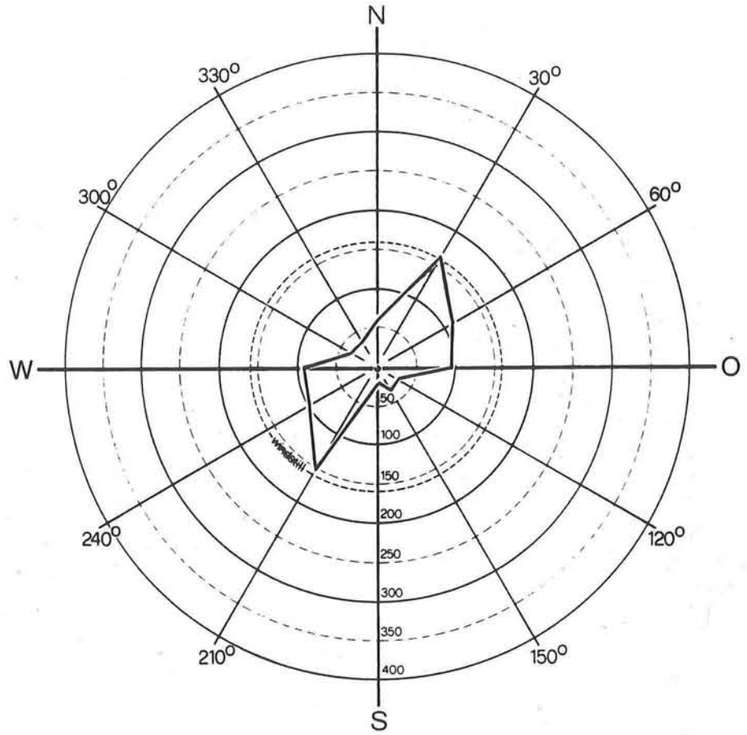
2.



Okt. – März
1971 – 1980

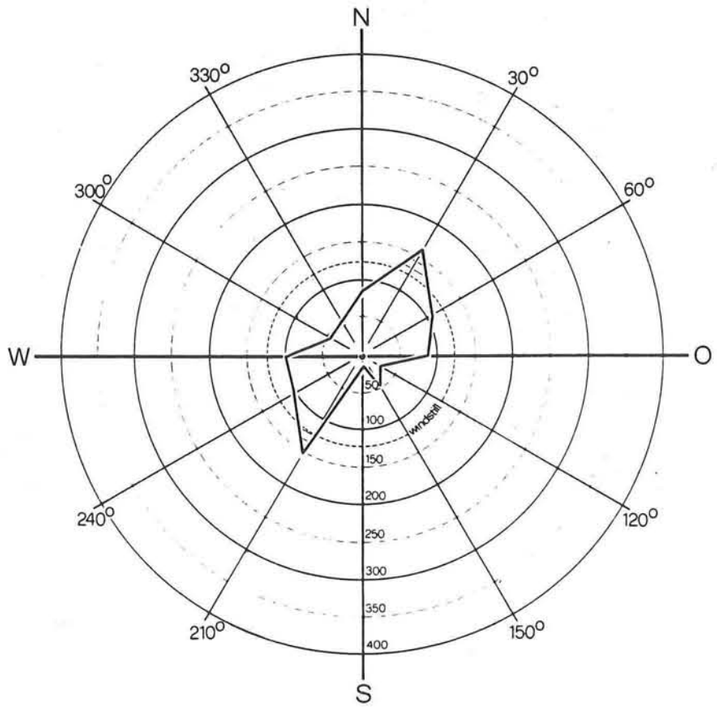
Annexe 1C
Anhang 1C

1.



1971

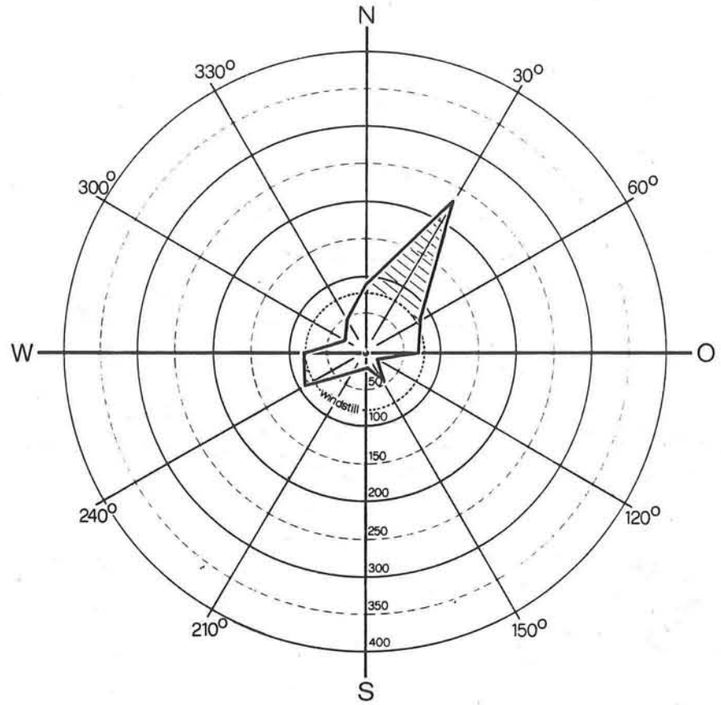
2.



1972

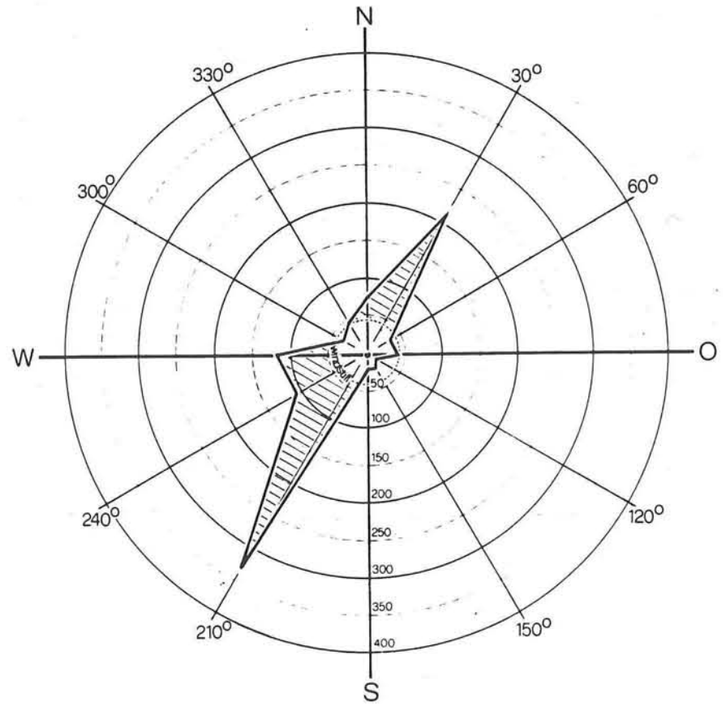
Annexe 1D
Anhang 1D

1.



1973

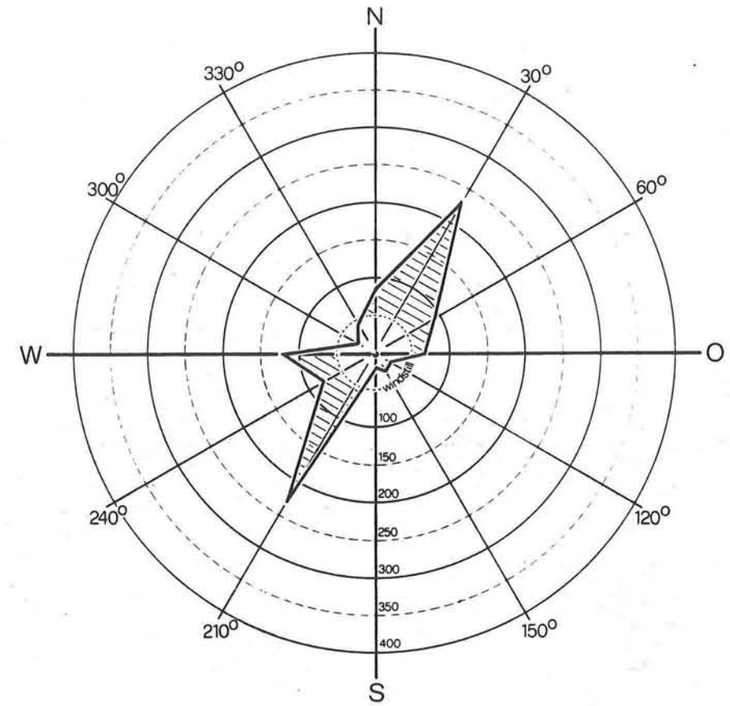
2.



1974

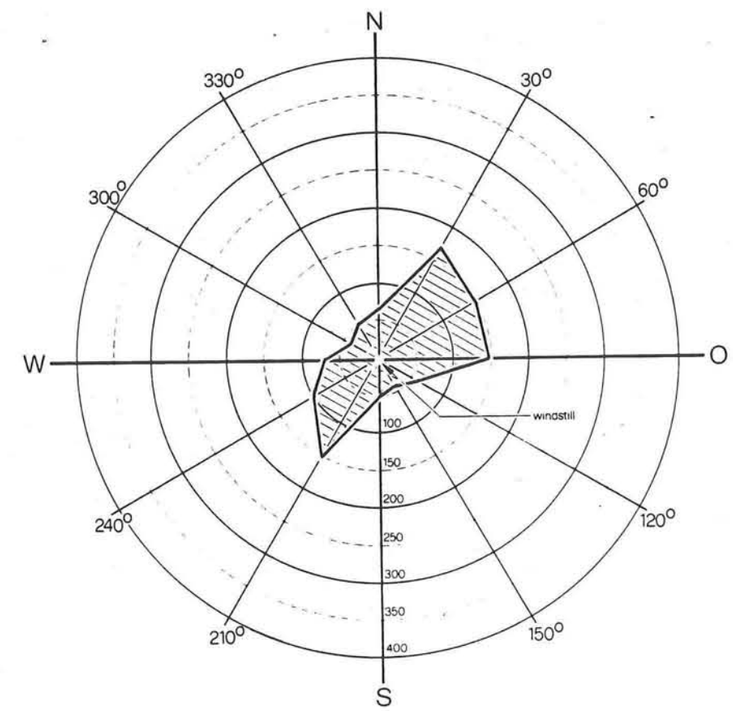
Annexe 1E
Anhang 1E

1.



1975

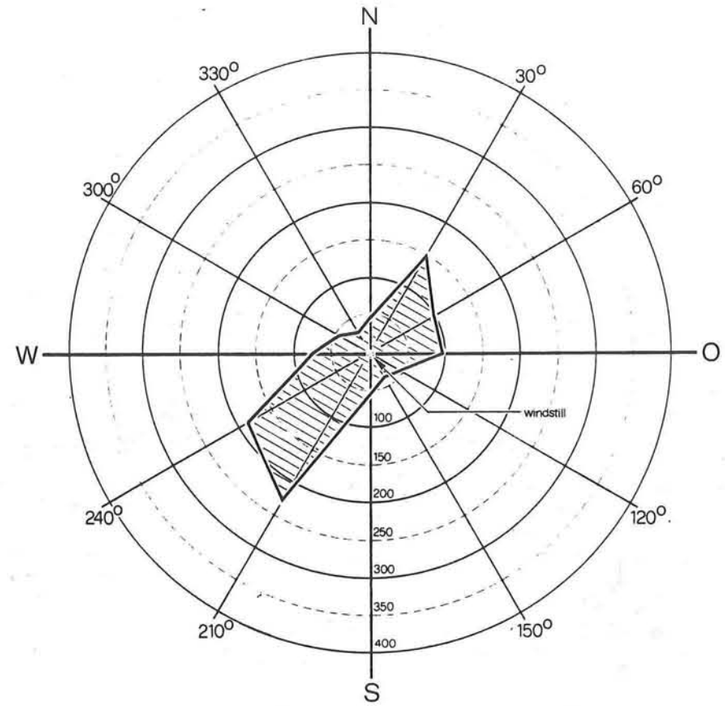
2.



1976

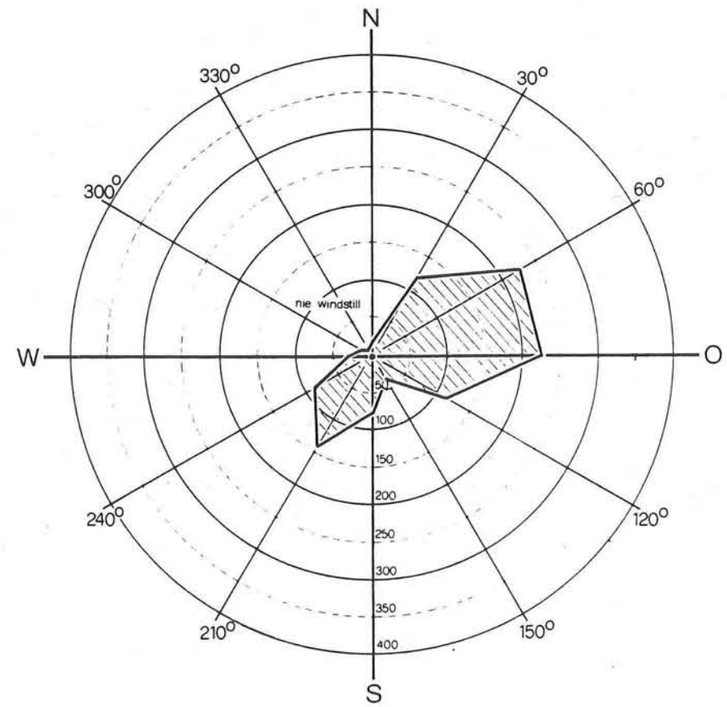
Annexe 1F
Anhang 1F

1.



1977

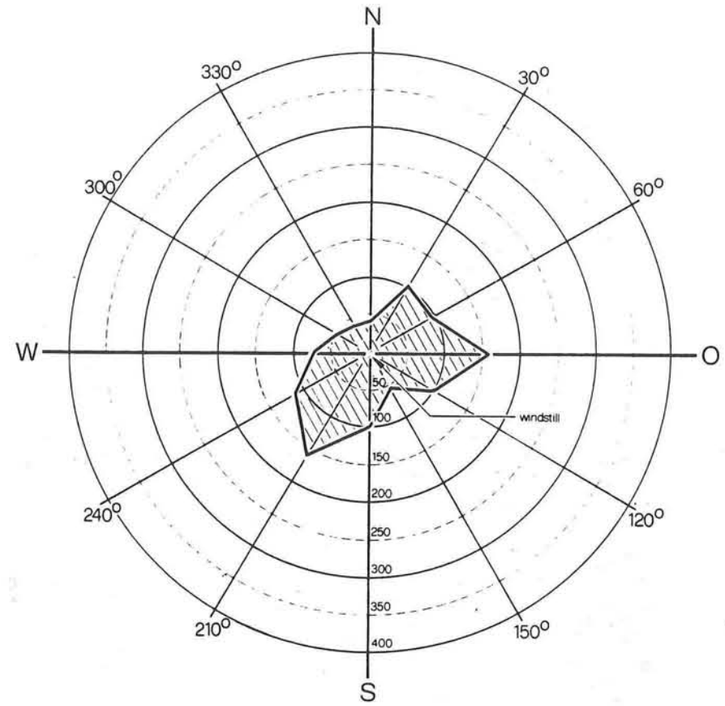
2.



1978

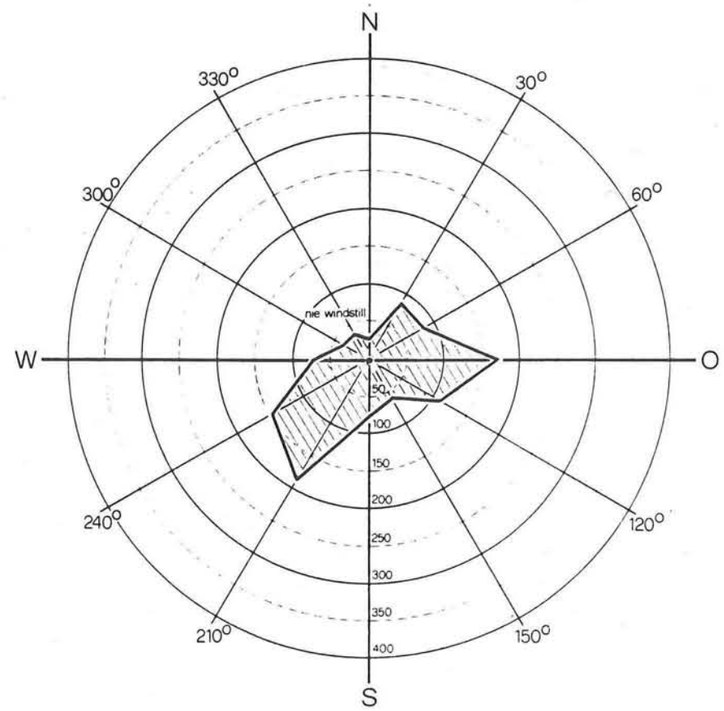
Annexe 1G
Anhang 1G

1.



1979

2.



1980

Aperçu de l'annexe 2

Uebersicht zum Anhang 2

Cartes de l' évolution de la rive sud du Lac de Neuchâtel

Südufer des Neuenburgersees, Karten über die Veränderungen

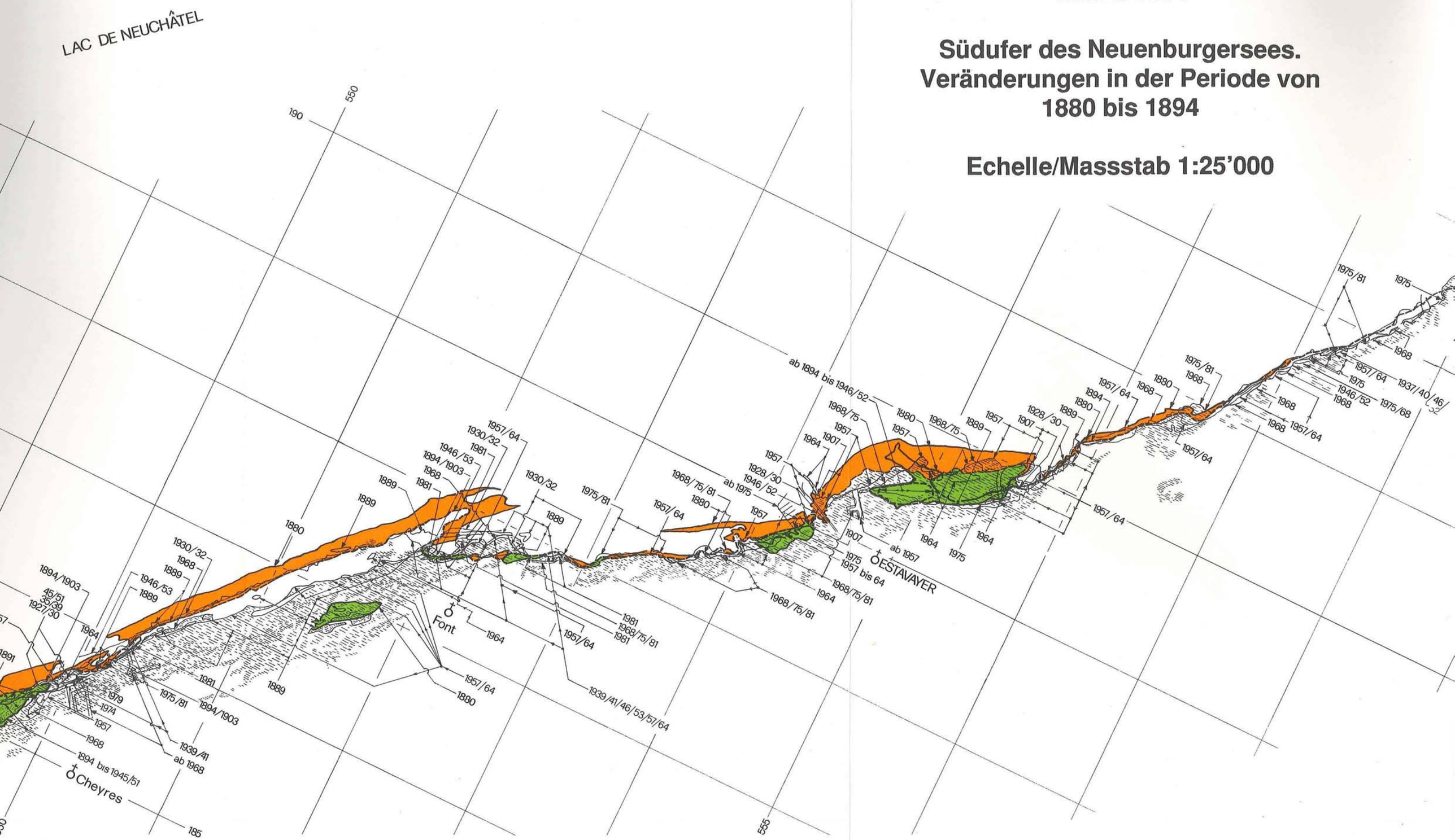
Annexe Anhang	Période Zeitintervall
2A	1880 - 1894
2B	1894 - 1926/27/32
2C	1926/27/32 - 1957/61
2D	1957/61 - 1979/86

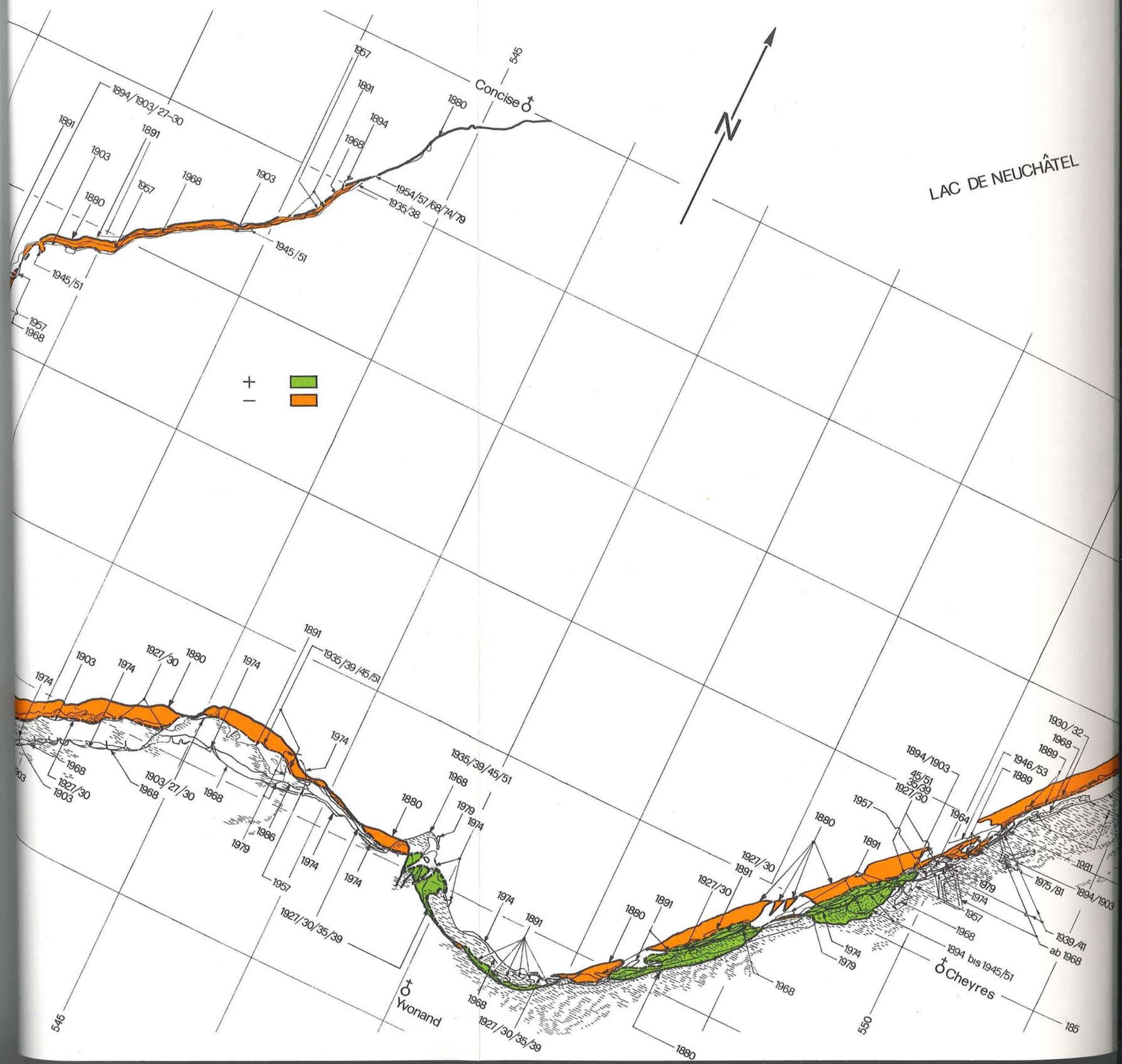
Annexe/Anhang 2A

Rive Sud du Lac de Neuchâtel. Evolution pendant la période allant de 1880 à 1894

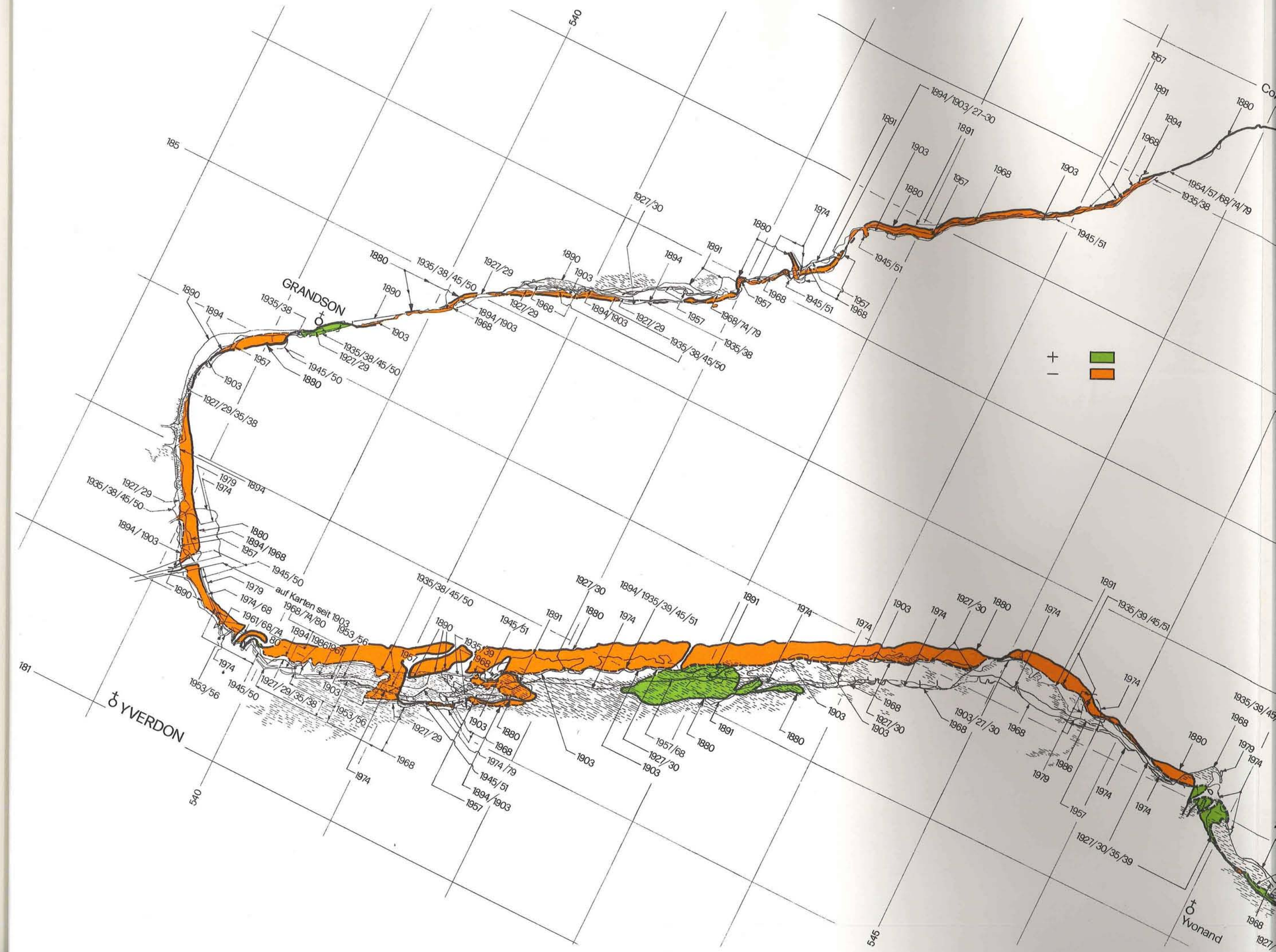
Südufer des Neuenburgersees. Veränderungen in der Periode von 1880 bis 1894

Echelle/Massstab 1:25'000





LAC DE NEUCHÂTEL
N
Concise ♂
Yvonand
♂ Cheyres
545
550
185
1894/1903/27-30
1954/57/68/74/79
1935/38
1945/51
1935/39/45/51
1927/30/35/39
1903/27/30
1894/1903
45/51
35/39
1930/32
1946/53
1975/81
1939/41
ab 1968
1894 bis 1945/51

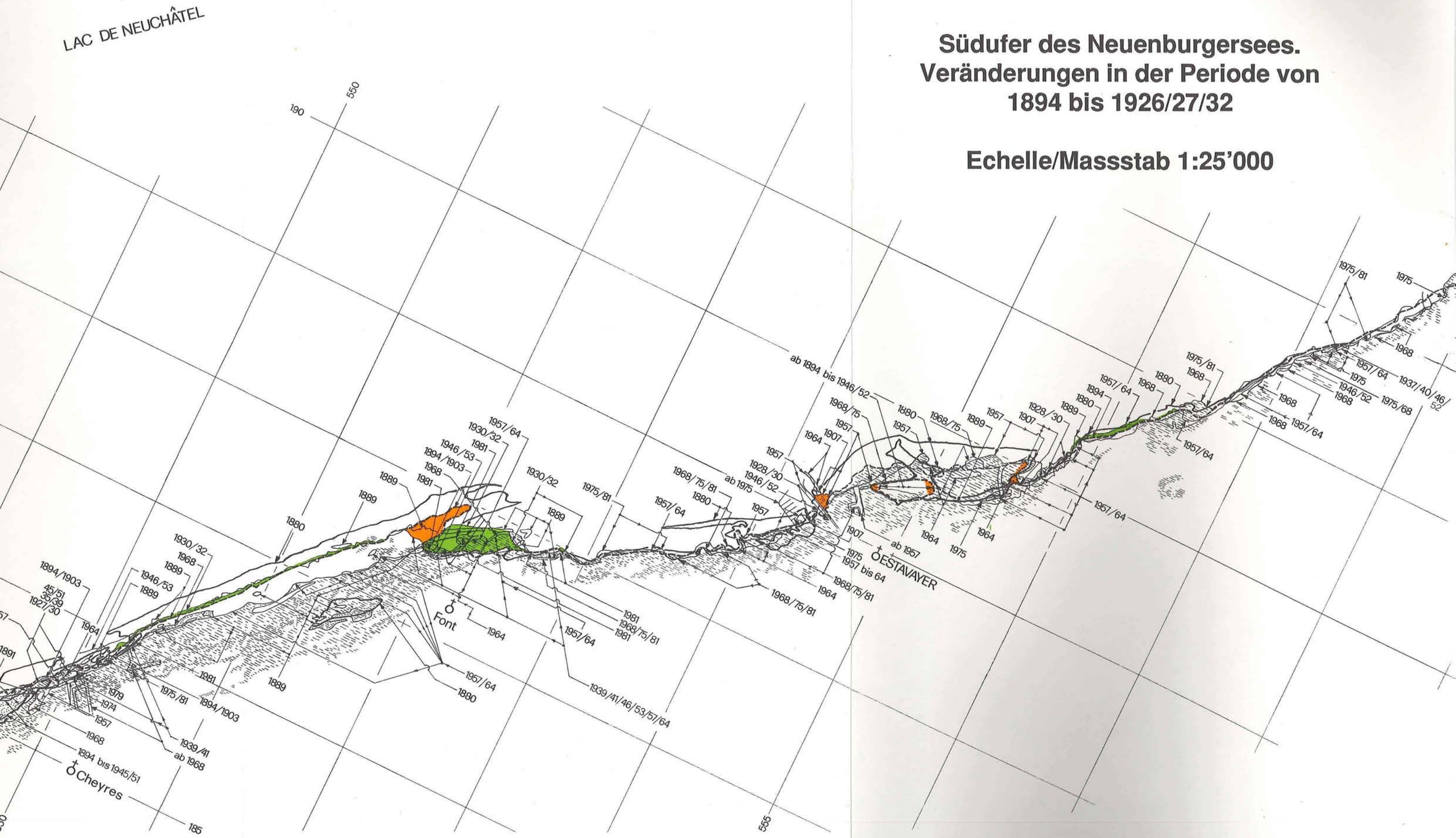


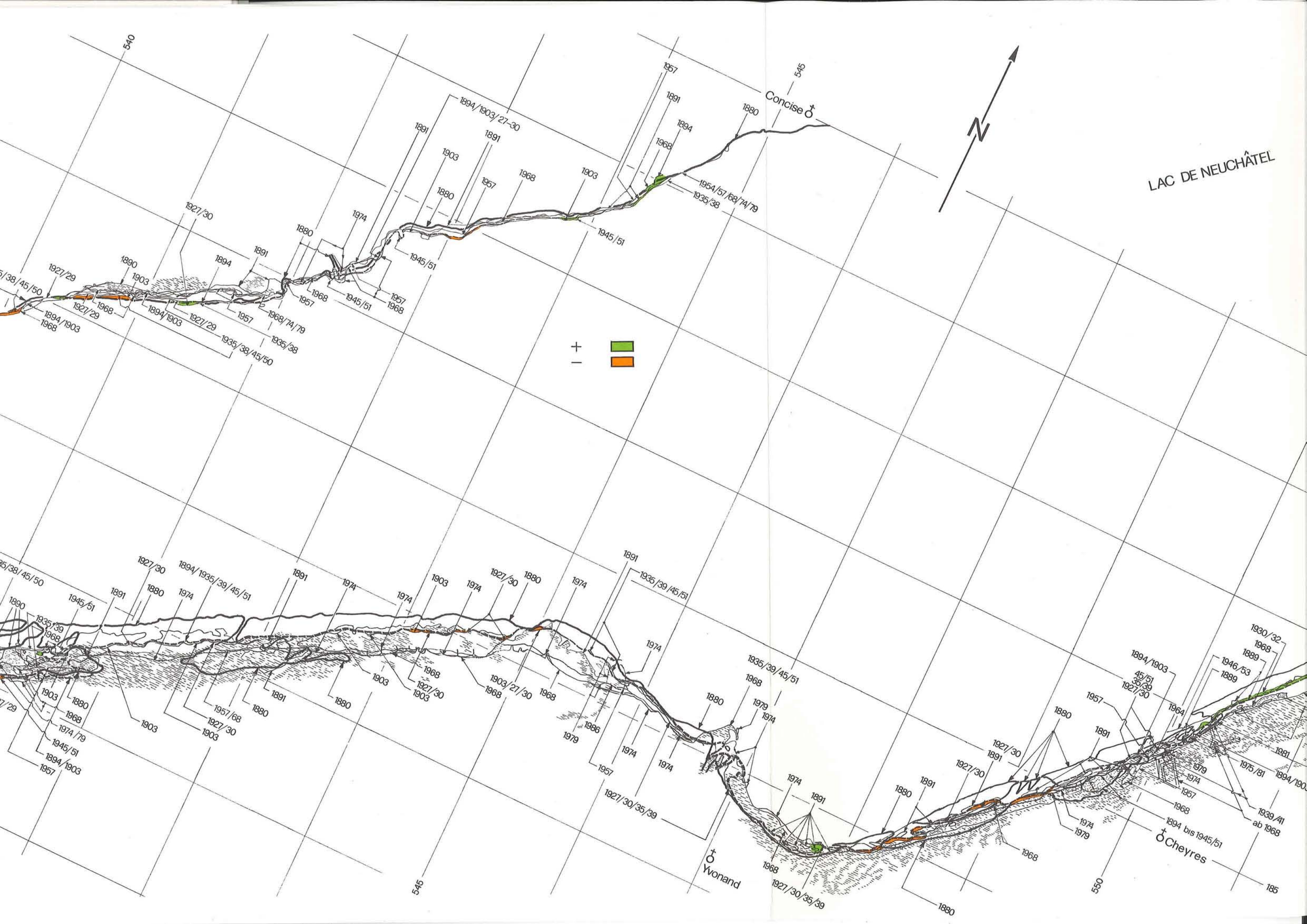
GRANDSON
YVERDON
Yvonand
auf Karten seit 1903
185
181
540
545

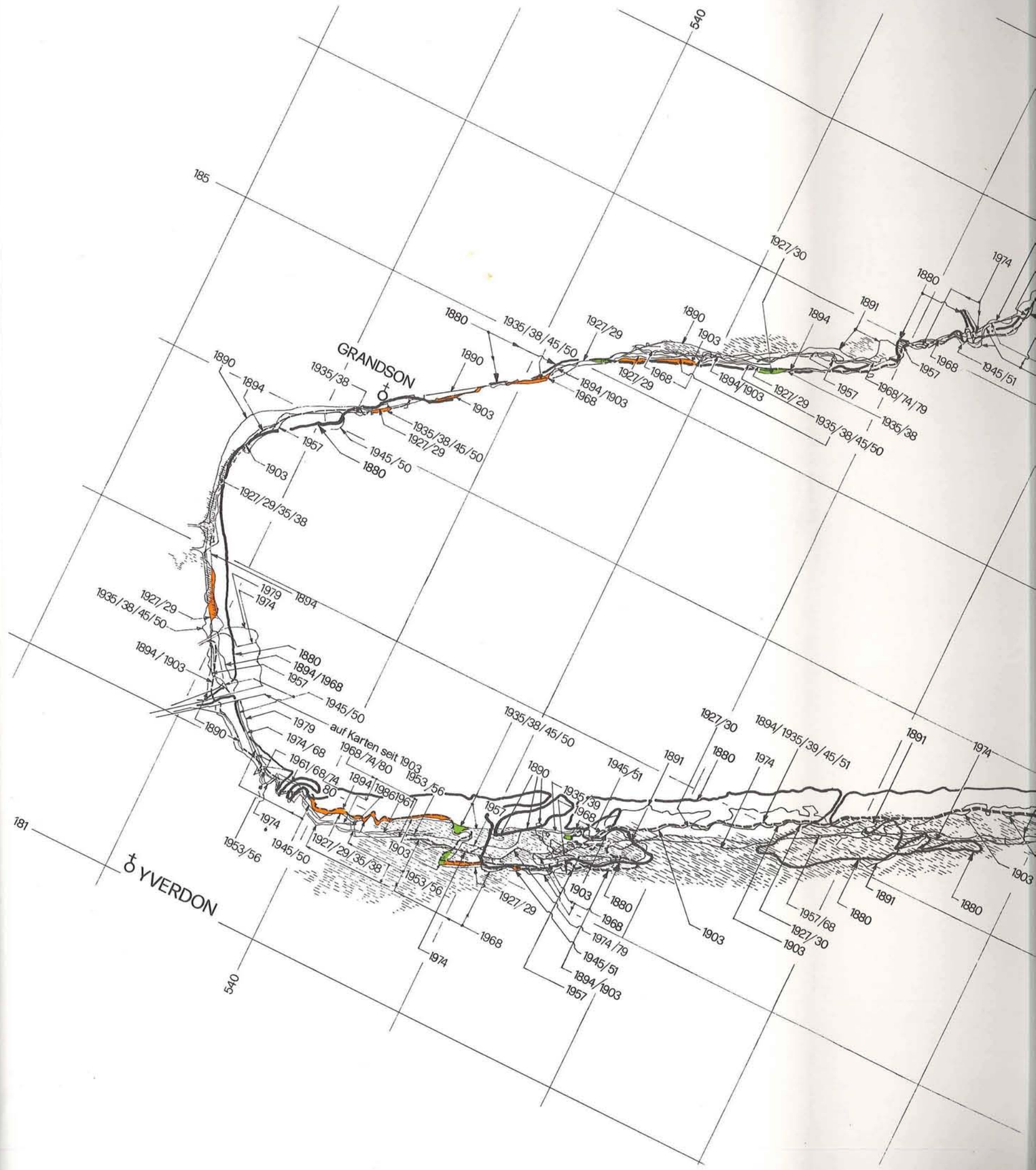
Rive Sud du Lac de Neuchâtel. Evolution pendant la période allant de 1894 à 1926/27/32

Südufer des Neuenburgersees. Veränderungen in der Periode von 1894 bis 1926/27/32

Echelle/Massstab 1:25'000



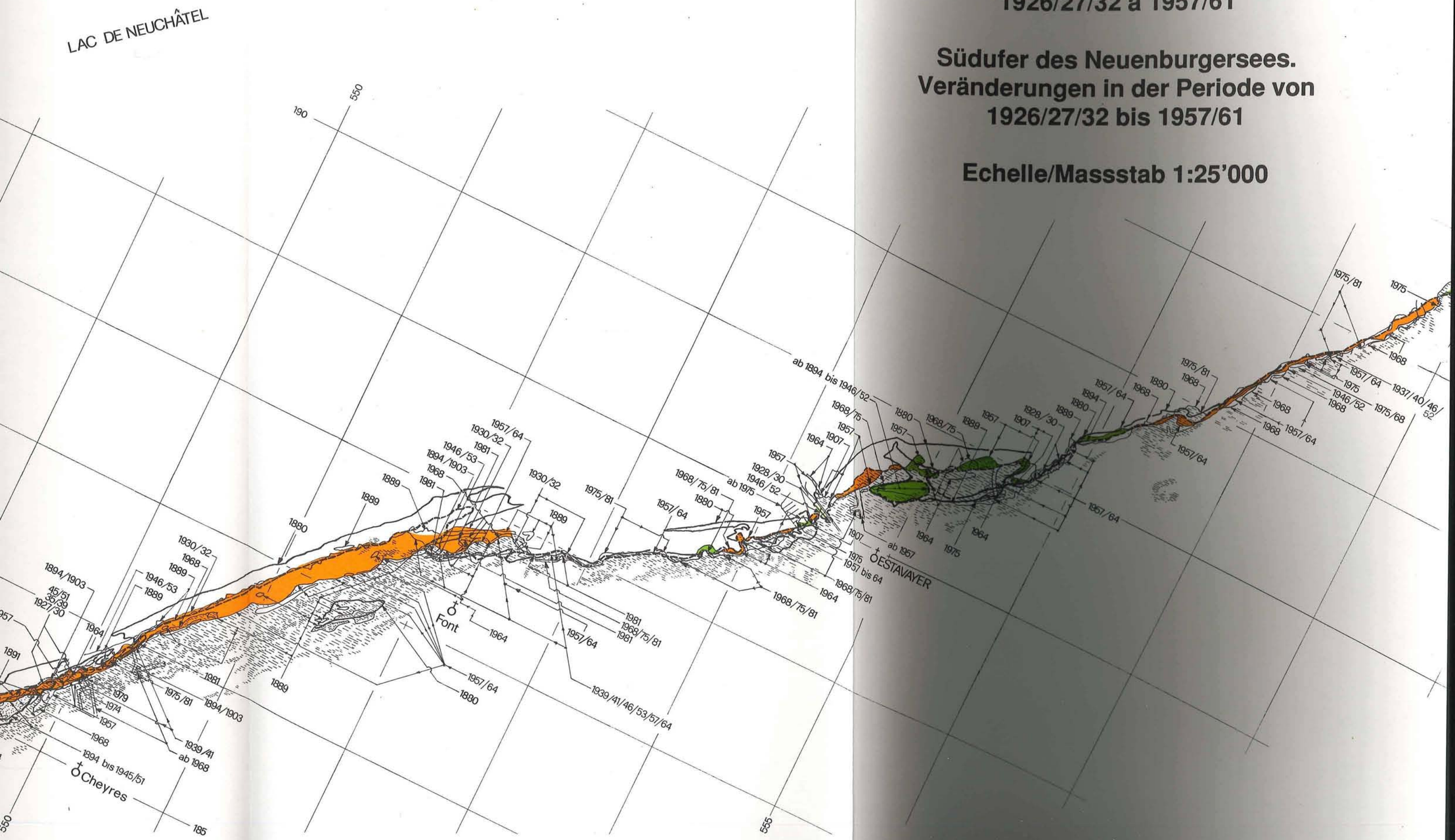

540
545
550
185
Concise ♂
Yvonand ♂
♂ Cheyres
LAC DE NEUCHÂTEL
+
–
1957
1891
1894/1903/27–30
1903
1880
1968
1894
1954/57/68/74/79
1935/38
1945/51
1974
1927/30
1890
1927/29
1894/1903
1935/38/45/50
1957/68
1968/74/79
1894/1935/39/45/51
1903/27/30
1986
1979
1927/30/35/39
1935/39/45/51
1946/53
1889
1930/32
1964
1981
1975/81
1939/41
ab 1968
1894 bis 1945/51

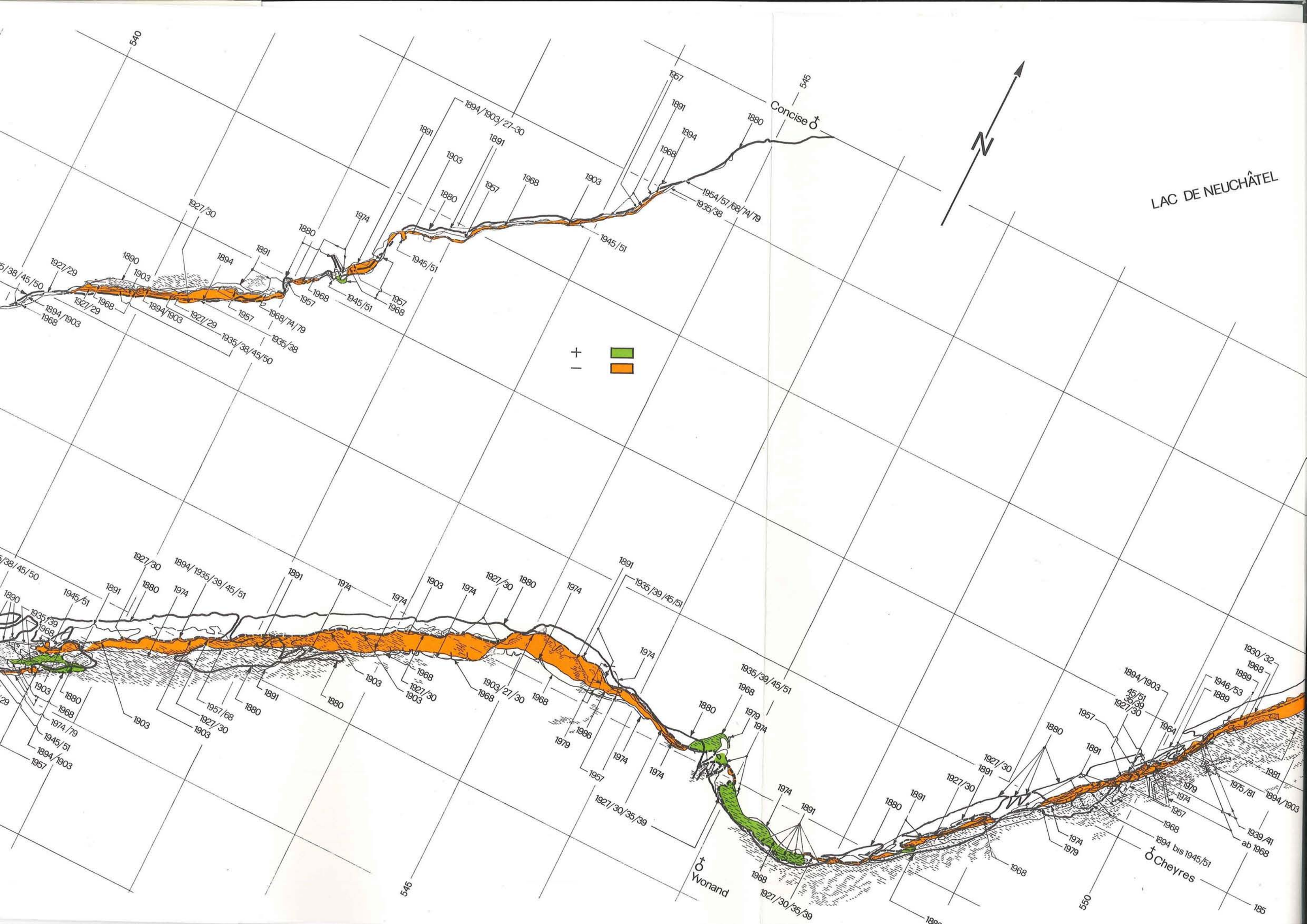

GRANDSON
YVERDON
auf Karten seit 1903
185
181
540
1880
1890
1894
1903
1927/30
1974
1891
1968
1957
1945/51
1935/38/45/50
1927/29
1894/1903
1968/74/79
1935/38
1927/29/35/38
1945/50
1979
1974
1894/1968
1974/68
1961/68/74
1968/74/80
1894/1986/1961
1953/56
1894/1935/39/45/51
1935/39
1957/68
1974/79

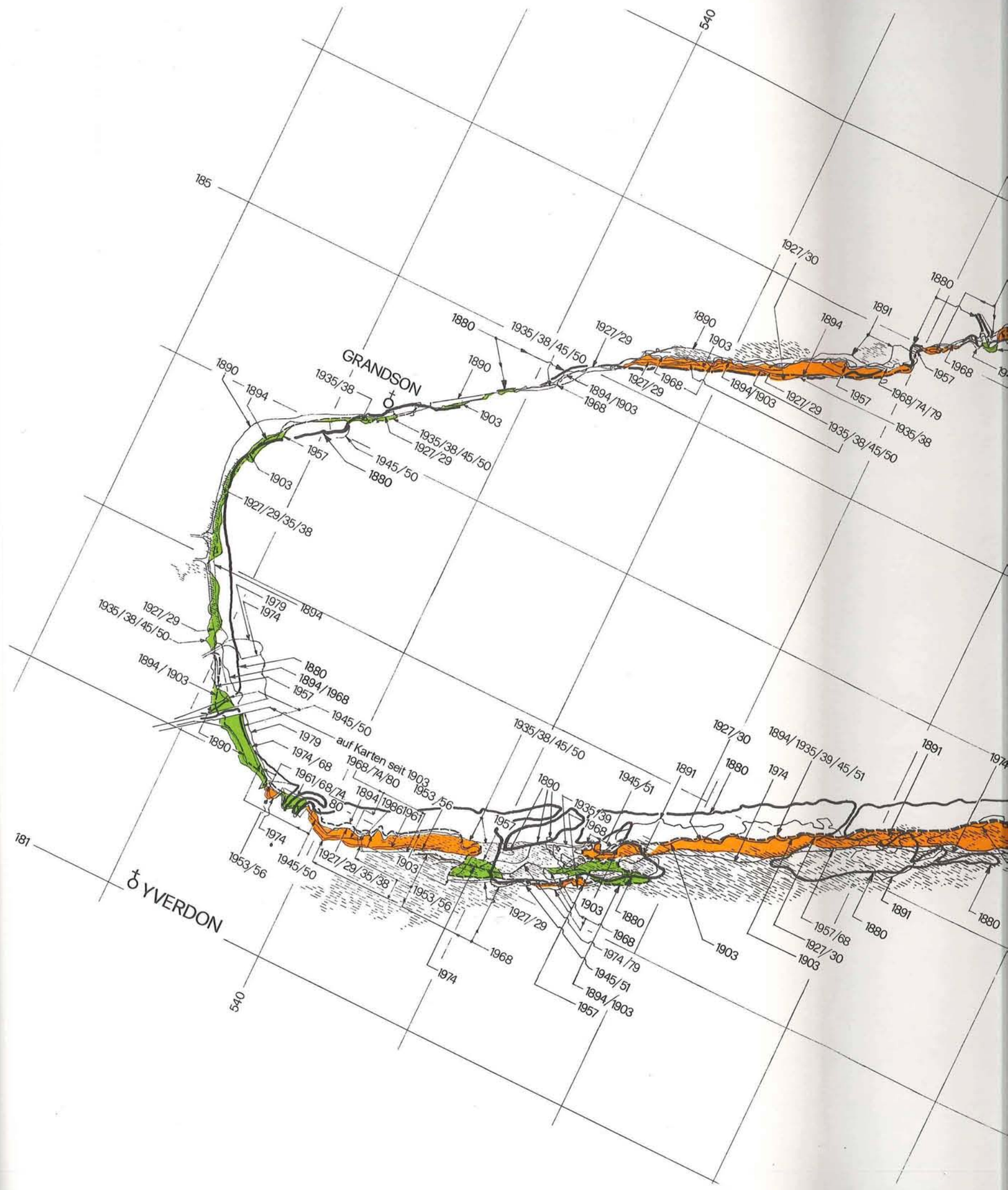
Rive Sud du Lac de Neuchâtel. Evolution pendant la période allant de 1926/27/32 à 1957/61

Südufer des Neuenburgersees. Veränderungen in der Periode von 1926/27/32 bis 1957/61

Echelle/Massstab 1:25'000



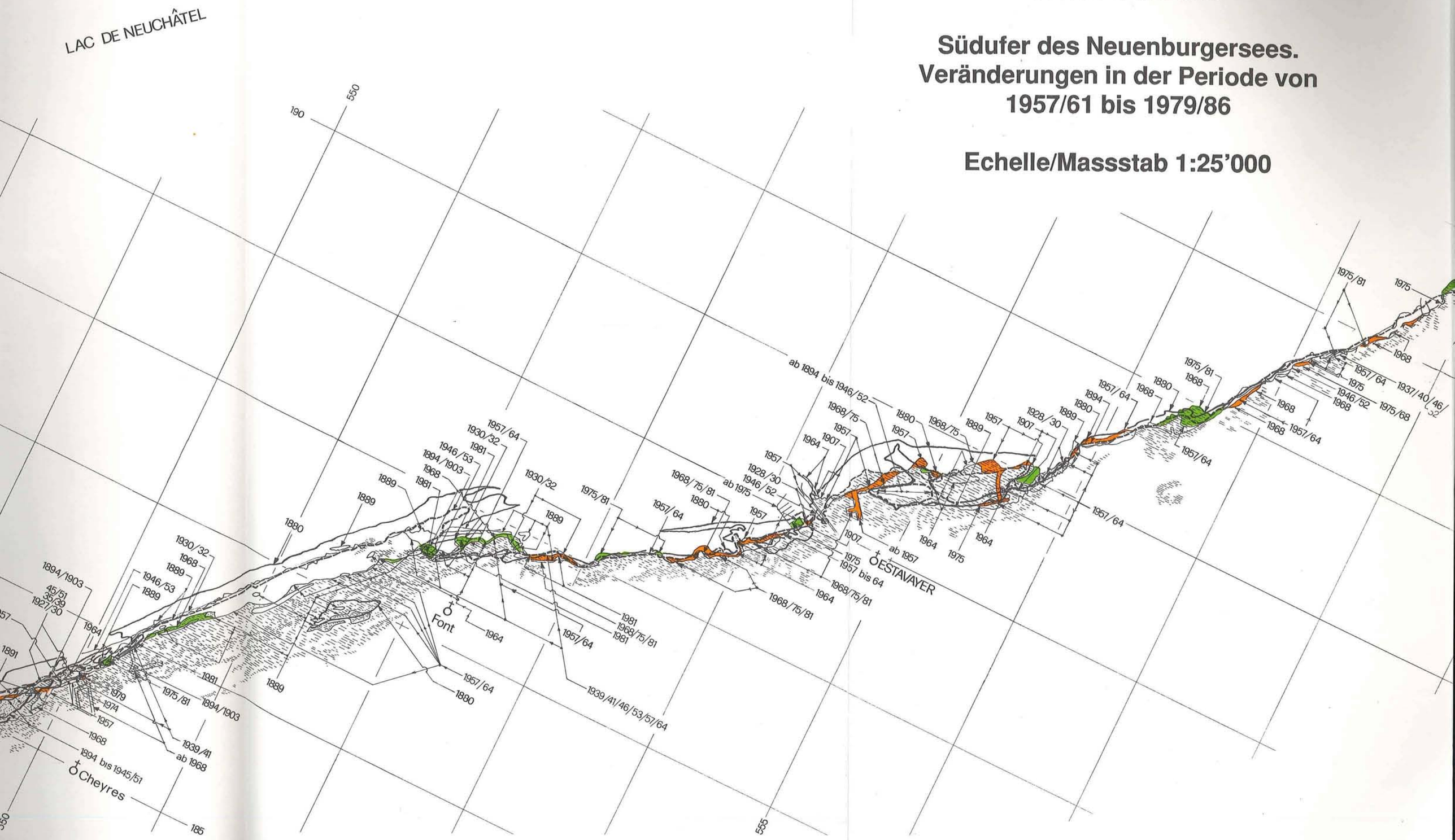

LAC DE NEUCHÂTEL
Concise ♂
♂ Yvonand
♂ Cheyres
540
545
550
185
+
–

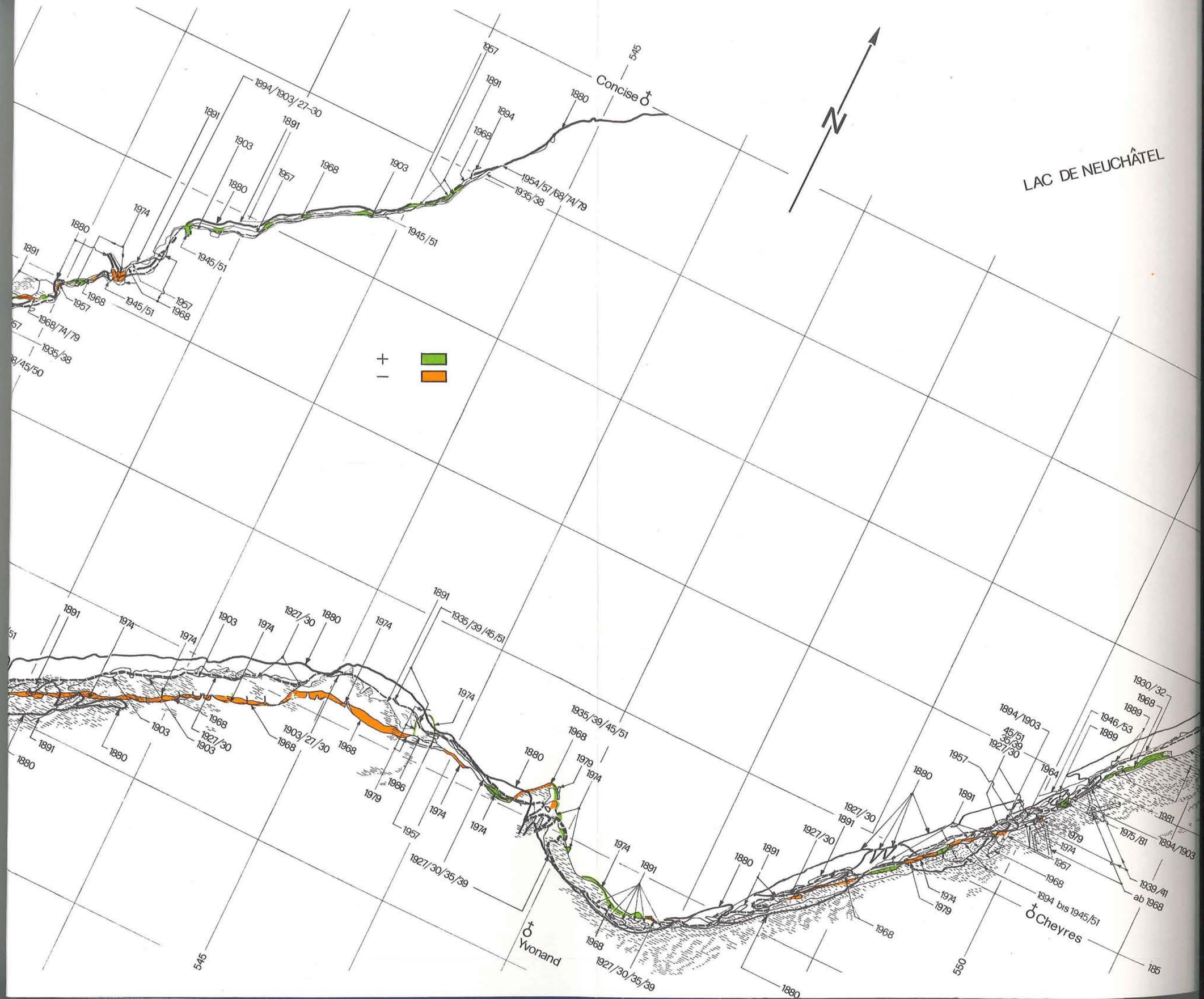

540
185
GRANDSON
YVERDON
181
540
1880
1935/38/45/50
1927/29
1890
1903
1894
1891
1927/30
1968
1957
1968/74/79
1935/38
1894/1903
1935/38
1945/50
1927/29/35/38
1979
1974
1894
1880
1894/1968
1957
1945/50
auf Karten seit 1903
1968/74/80
1953/56
1961/68/74
80
1986
1961
1974/68
1979
1974
1953/56
1945/50
1927/29/35/38
1903
1968
1974
1927/29
1957
1935/38/45/50
1945/51
1935/39
1968
1903
1880
1968
1974/79
1945/51
1894/1903
1957
1894/1935/39/45/51
1974
1880
1891
1903
1927/30
1957/68
1880
1891
1880

Rive Sud du Lac de Neuchâtel. Evolution pendant la période allant de 1957/61 à 1979/86

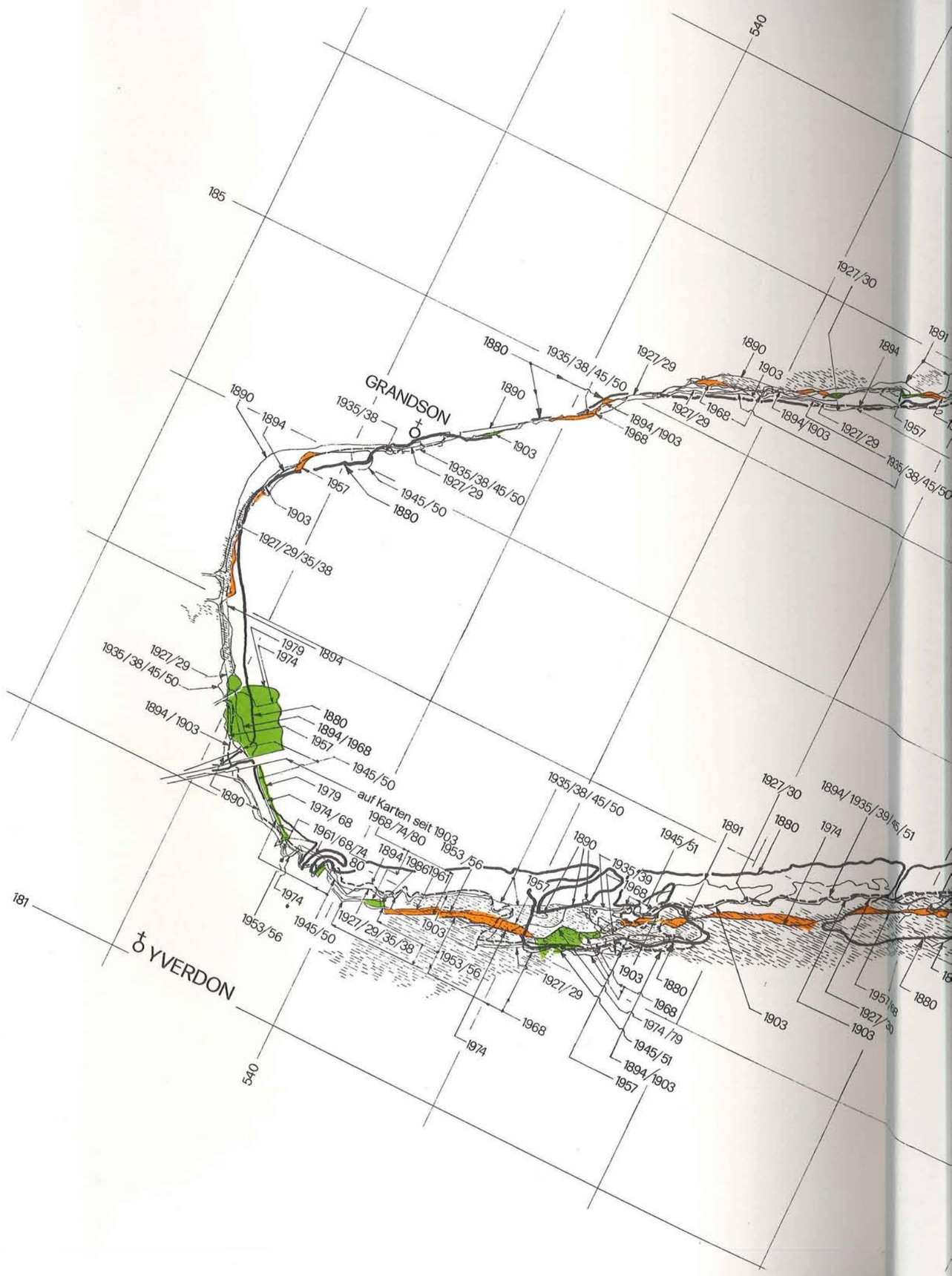
Südufer des Neuenburgersees. Veränderungen in der Periode von 1957/61 bis 1979/86

Echelle/Massstab 1:25'000





LAC DE NEUCHÂTEL
N
Concise ♂
Ywonand
♂ Cheyres
545
550
185
1894/1903/27-30
1954/57/68/74/79
1935/38
1945/51
1968/74/79
1935/39/45/51
1927/30/35/39
1903/27/30
1930/32
1946/53
1889
1894/1903
1894 bis 1945/51
1939/41
ab 1968
1975/81
1981
1964
1986
1979
1974
1957
1968
1903
1891
1880
1894
1927/30
45/51
35/39



GRANDSON
YVERDON
auf Karten seit 1903
1927/30
1935/38/45/50
1927/29
1935/38
1945/50
1927/29/35/38
1894/1903
1894/1968
1974/68
1961/68/74
1968/74/80
1953/56
1935/39
1945/51
1894/1935/39/45/51
1974/79
1957/68
1880
1890
1891
1894
1903
1957
1968
1974
1979
1961
1986
540
185
181